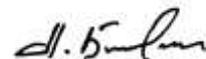


ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ (НИТУ «МИСиС»)

*На правах рукописи*



**БАРИНОВ НИКОЛАЙ ГЕОРГИЕВИЧ**

**ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КОРУНДООБРАЗОВАНИЯ И  
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТИПОМОРФНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ  
МИНЕРАЛОВ КОРУНДОВОЙ ГРУППЫ**

Специальность

1.6.10 Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук

Научный консультант  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор В.В. Щипцов

Москва 2021

## Оглавление

|  |           |
|--|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОРУНДОВ НА<br/>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ УРОВНЕ .....</b>                             | <b>17</b> |
| 1.1 КОНСТИТУЦИЯ И СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ ГРУППЫ КОРУНДА .....  | 17        |
| 1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ И ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОРУНДОВ .....  | 23        |
| 1.2.1 Прецизионное изучение микроэлементного состава корундов на квадрупольном масс-<br>спектрометре X-SERIES 2 Termo..... | 23        |
| 1.2.2 Изучение ИК-спектров образцов корунда .....  | 26        |
| 1.2.3 Изучение химического состава корундов с использованием электронно-зондового<br>микроанализатора .....                | 33        |
| 1.2.4 Изучение флюидных включений .....  | 37        |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1 .....  | 41        |
| <b>ГЛАВА 2. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОРУНДОВ .....</b>   | <b>42</b> |
| 2.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....   | 42        |
| 2.2 МАГМАТИЧЕСКИЙ КЛАСС .....  | 52        |
| 2.3 ПЕГМАТИТОВЫЙ КЛАСС .....   | 53        |
| 2.4. СКАРНОВЫЙ КЛАСС .....   | 56        |
| 2.5 ПНЕВМАТОЛИТО-ГТДРОТЕРМАЛЬНЫЙ КЛАСС.....  | 57        |
| 2.6 МЕТАМОРФОГЕННЫЙ ( МЕТАМОРФОГЕННО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИЙ КЛАСС.....   | 59        |
| 2.7. КОРЫ ВЫВЕТРИВАНИЯ .....   | 61        |
| 2.8 РОССЫПИ.....   | 62        |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2. ....  | 64        |
| <b>ГЛАВА 3. МИНЕРАГЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ КОРУНДОВ .....</b>   | <b>66</b> |
| 3.1 ПРОВИНЦИИ, ПОЯСА, РУДНЫЕ РАЙОНЫ.....   | 66        |
| 3.1.1 Индокитайская рубин-сапфиросная провинция .....  | 70        |
| 3.1.2 Южно-Азиатская сапфир-рубиноносная провинция.....  | 70        |
| 3.1.3 Карело-Кольская сапфир-рубиноносная провинция .....  | 72        |
| 3.1.4 Восточно-Австралийский преимущественно сапфиросный пояс.....   | 73        |
| 3.1.5 Дальневосточный сапфиросный пояс .....   | 74        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.1.6 Восточно-Китайский сапфиноносный пояс.....   | 75         |
| 3.1.7 Уральский сапфир-рубиноносный пояс.....  | 75         |
| 3.1.8 Восточно-Африканский сапфир-рубиноносный пояс.....   | 78         |
| 3.1.9 Восточно-Бразильский рубин-сапфиноносный пояс.....   | 80         |
| 3.1.10 Гренландский юго-западный рубиноносный пояс.....  | 81         |
| 3.1.11 Нигерийский сапфиноносный район.....  | 84         |
| 3.1.12 Колумбийский сапфиноносный район.....   | 84         |
| 3.1.13 Восточно-Американский рубиноносный район.....   | 85         |
| 3.1.14 Западно-Американские рубин-сапфиноносные районы.....  | 85         |
| 3.1.15 Канадские рубин-сапфиноносные районы.....   | 86         |
| <b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3 .....</b>   | <b>86</b>  |
| <b>ГЛАВА 4. ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЛАГОРОДНЫХ КОРУНДОВ.....</b>   | <b>89</b>  |
| 4.1 ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА КОРУНДОСОДЕРЖАЩИХ ПОЛЕЙ.....   | 92         |
| 4.2 ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОРУНДОВ.....  | 97         |
| 4.3 РОЛЬ МЕТАМОРФИЗМА ПРИ ОБРАЗОВАНИИ БЛАГОРОДНОГО КОРУНДА.....  | 101        |
| 4.4 ЧЕТЫРЕ ОСНОВНЫХ ПЕРИОДА КОРУНДООБРАЗОВАНИЯ В МИРЕ.....   | 103        |
| 4.5 КОРУНДОНОСНЫЕ КОМПЛЕКСЫ ЗА РУБЕЖОМ.....  | 108        |
| 4.6 ИССЛЕДОВАНИЯ КОРУНДОНОСНЫХ КОМПЛЕКСОВ РОССИИ.....  | 121        |
| 4.6.1 Рубин проявления Рай-Из (Полярный Урал) народами.....  | 125        |
| 4.6.2 Рубины месторождения «Незаметнинское» (Хабаровский край)слоем.....   | 128        |
| 4.6.3 Рубины Хитострова (северная Карелия).....  | 132        |
| <b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4 .....</b>   | <b>139</b> |
| <b>ГЛАВА 5. ГОРНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ<br/>КОРУНДА.....</b>   | <b>140</b> |
| 5.1 ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ И ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ГОРНЫХ РАБОТ И АНАЛИЗ<br>ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОРУНДА.....          | 141        |
| 5.2 К ВОПРОСУ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ РАЗРАБОТКИ<br>МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОРУНДА.....                                       | 145        |
| <b>ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 5 .....</b>   | <b>147</b> |
| <b>ГЛАВА 6. ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ОСВОЕНИЯ КОРЕННЫХ<br/>МЕСТОРОЖДЕНИЙ КОРУНДА В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГОРЬЯ.....</b> | <b>149</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 6.1 РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОТРАБОТКИ КРУТОПАДАЮЩИХ МАЛОМОЩНЫХ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....   | 149        |
| 6.2 РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ГИДРОВЗРЫВА КОРУНДОСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ОТРАБОТКЕ ЖИЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ..... | 155        |
| 6.3 ОТБОЙКА СФОРМИРОВАННЫХ ГИДРОВЗРЫВОМ БЛОКОВ ПРИ ВЕДЕНИИ ОЧИСТНЫХ РАБОТ ЗАРЯДАМИ ВВ С ЭФФЕКТОМ ДЕКАПЛИНГА.....                        | 164        |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 6 .....   | 174        |
| <b>ГЛАВА 7. МЕХАНИЗМ СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ КОРУНДОСОДЕРЖАЩИХ ГОРНЫХ ПОРОД С ЦЕЛЬЮ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА .....</b>         | <b>175</b> |
| 7.1 МЕХАНИЗМ СЕЛЕКТИВНОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИИ ГОРНЫХ ПОРОД СЕМЕЙСТВА МИНЕРАЛОВ КОРУНДА .....   | 175        |
| 7.2 СЕЛЕКТИВНАЯ ДЕЗИНТЕГРАЦИЯ И РОЛЬ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ .....  | 177        |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 7 .....   | 198        |
| <b>ГЛАВА 8 ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ВСКРЫТИЯ КОРУНДОНОСНЫХ ПОРОД .....</b>   | <b>200</b> |
| 8.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ .....  | 200        |
| 8.2 ТЕХНОЛОГИИ ВСКРЫТИЯ КОРУНДОСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД.....  | 203        |
| 8.3 ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ .....  | 209        |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 8 .....   | 215        |
| <b>ГЛАВА 9. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОРУНДОВ.....</b>  | <b>217</b> |
| ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 9 .....   | 218        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>   | <b>219</b> |
| <b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>   | <b>225</b> |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Происхождение корундов остается одним из актуальных вопросов геммологии. К благородным разновидностям корунда многие годы сохраняется практический интерес, продиктованный особенностями рынка. Благоприятные условия для спокойного роста прозрачных кристаллов рубина и сапфира весьма редки. Подавляющее большинство известных промышленных месторождений рубина и сапфира представлено аллювиальными, делювиально-аллювиальными россыпями или остаточными древними корами химического выветривания рубино- или сапфиринозных горных пород, образующих группу элювиальных и элювиально-делювиальных россыпей.

В последние десятилетия в связи с освоением большого числа месторождений разных генетических типов, сокращением удельного веса жильных месторождений в добыче руд существенно изменились акценты в промышленной значимости тех или иных типов коренных корундсодержащих месторождений и проявлений [Giuliani et al, 2014; Saul, 2015; Барнов и др., 2015; Барнов и др., 2016; Giuliani et al, 2020; и др.]. Связано это в основном с возможностью освоения крупных месторождений, представленных рудными телами большой мощности.

**В ранге актуальных обосновываются задачи по комплексной оценке геологических, минералого-технологических, горных и геомеханических условий и характеристик месторождений благородного корунда. Существует необходимость в научном обосновании экологически и экономически целесообразной технологии получения из корундсодержащих комплексов промышленных продуктов для различных целей. Важным становится вопрос, связанный со способами вскрытия и методами доступа к коренным благородным корундам.**

Оценка обнаруженных проявлений благородного корунда базируется на геологической аналогии с промышленными месторождениями драгоценных

камней [Киевленко и др., 2001; Буканов, 2014]. 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 селективную дезинтеграцию горных пород и благородного корунда.

Настоящая ситуация сводится к тому, что усилия исследователей концентрируются на вопросах усовершенствования технологий разработки коренных месторождений промышленных минералов корундовой группы – это вопрос № 1.

### **Степень разработанности темы исследований**

В странах с высокоразвитой горнорудной промышленностью подземная разработка является основным способом добычи драгоценных минералов. В настоящий период в Канаде, Австралии и ЮАР разработка месторождений практически полностью осуществляется подземным способом. За рубежом в основном добыча руд проводится с применением гибких систем разработки, подэтажными штреками, магазинированием руды и т.п.. Самым крупным достижением в области совершенствования технологии очистной выемки считается появление «механизированного варианта системы разработки горизонтальными слоями (высотой до 5 м) с закладкой», применяемых в сравнительно устойчивых рудах и вмещающих породах (Giuliani et al, 2020).

Термины «поиск» и «добыча драгоценных камней» обозначают всю совокупность методов от традиционных поисков в горных потоках и реках с помощью примитивных средств до современных технологий с использованием новых технологий и модернизированного оборудования.

В общем балансе добычи благородного корунда, как было указано выше, основное значение традиционно имеют аллювиальные, делювиально-аллювиальные россыпи и элювиальные, элювиально-делювиальные остаточные месторождения кор выветривания.

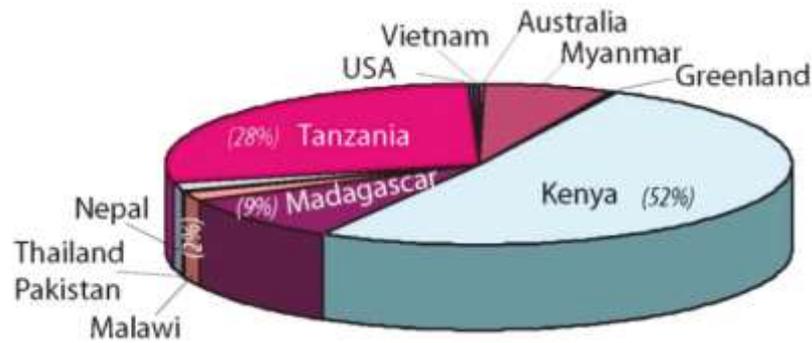


Рисунок 1 – Мировая добыча рубина по странам мира по состоянию на 2019 г. [Guiliani et al, 2020]

В силу сложных горно-геологических, геомеханических и особенно горнотехнических условий коренные месторождения корунда, расположенные, как правило, в высокогорных районах, не являются привлекательными объектами для инвестиций [Баратов, Россовский, 1986; Гансер, 1967; Галченко, 1981; Галченко, Сабянин, 2011; Guiliani et al, 2020]. Известные месторождения данной группы в Таджикистане, Афганистане, Пакистане, Индии, Мьянме и др. располагаются на высоте свыше 2,0 км от уровня моря. Несмотря на то что высокое качество, стоимость сырья и преобладающая возможность штольневого вскрытия месторождений способны обеспечить высокую прибыльность разработки и минимальные сроки окупаемости капитальных вложений, данные условия в районах расположения месторождений на большой высоте в труднодоступных местах из-за отсутствия воды, электричества, достаточного содержания кислорода в воздухе и пр. трудновыполнимы.

**Идея работы состоит в том, что:**

**- для оценки коренных месторождений благородных корундов рассматривается роль геологических, технолого-минералогических и горных факторов;**

**- для обоснования перспективности проявлений используется метод аналогий объектов корундов мира с учетом сложных горно-геологических условий.**

**Задачи работы**

Для поэтапного достижения цели решались следующие задачи:

- представить типизированную генетическую классификацию корундовых месторождений мира;
- детализировать минералого-геохимические особенности корундов коренных месторождений на основе исследований геологии корундсодержащих месторождений с применением современных методов;
- дать прогноз геологическим и минерало-технологическим параметрам оценки месторождений благородных корундов различного генезиса;
- провести сравнительный анализ геотехнологий освоения коренных месторождений благородного корунда;
- разработать комплексную схему дезинтеграции горных пород и ценного компонента группы минералов корунда;
- предложить новые методы обогащения коренных проявлений благородного корунда.

### **Методы исследований и фактический материал**

Изучение особенностей минералов группы корундов было проведено на примере корундов различных генетических типов, собранных автором или полученных в дар из месторождений и проявлений Памира, Афганистана, Мьянмы, Шри Ланки, Индии, России и других стран. Корунды изучены комплексно с использованием современных методов в нескольких аналитических центрах научно-исследовательских институтов как с минералогической и геохимической, так и технологической позиций, что является важной составляющей данной работы и существенно дополняет данные предыдущих исследователей.

Электронно-микроскопические исследования кристаллов корунда проводились на растровом сканирующем электронном микроскопе фирмы Carl Zeiss EVO-LS-10, оснащенный энергодисперсионной приставкой Oxford MAX 50. Образцы анализировались без специальной подготовки, без напыления в режиме низкого вакуума при ускоряющем напряжении 20 kV. Диапазон увеличений 5х–1 000 000х.

Прецизионное изучение микроэлементного состава (содержания редких и рассеянных элементов) корундов проведено на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 Terhmo (Y, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu).

Анализ поверхности образцов корунда выполнен на цветном 3D лазерном сканирующем микроскопе VK-9700 Generation - ИГ КарНЦ РАН.

Изучение поверхности кристаллов корунда, «загрязненного» минеральными включениями, проведено на лазерном микроскопе Color 3D VK-9710K. Анализ характера включений показал, что ширина характерных слоев с диаспором может достигать 100 мкм при их глубине 20-30 мкм.

Химический состав минералов изучался на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы JEOL в лаборатории анализа минерального вещества (ИГЕМ РАН). Анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 kV, токе на цилиндре Фарадея 20 nA, диаметре зонда 3-5 мкм. Время экспозиции на основные элементы составляло 10 с. Для обеспечения электропроводимости, образцы напылялись тонким слоем углерода. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF-коррекции с использованием программы фирмы JEOL.

Мультиэлементное картирование и анализ вариаций химического состава отдельных минералов выполнялись на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энергодисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) (ИГ КарНЦ РАН). Вариации состава породообразующих минералов корундсодержащих гнейсов рассчитаны по данным анализов на электронном сканирующем микроскопе с энергодисперсионной приставкой Tescan.

ИК-спектры отдельных микрозерен получены на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 380 с использованием микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific (ЦНИГРИ).

При исследованиях минерального состава корундов рентгенофазовым анализом использован рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA, съемка спектра осуществлялась на компьютеризированном аппарате ADP2 – 01 с использованием

Fe K $\alpha$  излучения. По оси ординат – интенсивность отраженного излучения (имп/с), по оси абсцисс – угол отражения (20 град) (ИГ КарНЦ РАН).

Для анализа состава корундов использовались волновой рентгенофлуоресцентный спектрометр ARL 9900 Workstation. Элементный анализ выполнен методом «бесстандартного анализа» с использованием программы UniQuant.

Качественный фазовый анализ выполнялся с использованием базы данных ICDD PDF-2 и программного пакета Crystallographica Search-Match.

Для визуального наблюдения флюидных включений, а также термометрических и криометрических исследований из образцов были изготовлены двусторонние прозрачно-полированные пластинки толщиной 0.250.3 мм. Площадь пластинок составляла несколько квадратных сантиметров.

Микроскопическое изучение флюидных включений (ФВ) производилось с использованием оптического микроскопа Olimpus BX-51. При микроскопическом изучении определялось наличие или отсутствие приемлемых по размеру флюидных включений в изучаемом минерале (их форма, размеры, количество фаз во включениях). Производился отбор включений по первоначальным ассоциациям, измерялись объемы фаз и их соотношения. Микротермометрические исследования флюидных включений проводились в секторе минераграфии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG–600 фирмы «Linkam» (Англия), микроскопа «Olimpus» (Япония), снабженного набором длиннофокусных объективов, видеокамеры и управляющего компьютера.

Использован метод компьютерного моделирования применительно к проблеме обоснования селективного дробления горных пород. В ходе исследований также применялись методы натуральных измерений с помощью тензометрических датчиков, акустический и др.

В диссертации при исследованиях использованы образцы корундов различных генетических типов из многих стран мира, собранных автором в разные годы. Оригинальный материал представлен корундами, рубинами и

сапфирами Танзании (обр.1, 4 Merelani, обр.18, 21, 27, 37, 40, 48, 59 Gairo Mogoogo), Таджикистана (обр. 2 Снежное), Индии (обр. 3 Mysore, обр. 6 Karnakata, обр. 9 Занат, обр.11, 12, 15 Мансур, обр. 29 Кашмир, обр. 33 Петерсит, обр. 39 Музор, обр. 47, 49, 51 Майсор, обр. 54, 55 Модроса, обр. 57 Могога, обр. 61 Иаскар, обр. 62 Тамилнад; Мьянмы (обр. 64 Mogok), Мадагаскара (обр.5 Zazafotsy Quagru), обр. 22 Анцерабе, обр. 23 Ihosu, обр. 30 Ватондради, обр. 31 Анудрабе, 2 обр. 34 Амбуситра, обр. 56 Пакака, обр. 60, 66 Ambahatraso), России (обр.7, 20, 32 Будун на острове Ольхон, Байкал, обр. 8, 38 Колташи, Урал, обр.10, 17, 24 Рай-Из, Полярный Урал, обр.13, 50, 53 Хитостров, Карелия, обр.19, 28, 35, 46 Ильменские Горы, Урал, обр.25, Потанинские Горы, Урал, обр. 52 Вишневые Горы, обр. 63 Синарское, Урал), Афганистана (обр.14 (Jegdalek), Шри-Ланки (обр.16, 67 Ratnapura), Пакистана (обр.26 Hunza), Норвегии (обр. 36 Санднессьезн), Вьетнама (обр. 44 провинция Йен-Бай, обр. 45, Luc Yen), Китая (обр. 58 Пенглай на о-ве Хайнань), Таиланда (обр. 65 Chanthaburi-Trat), Австралии (обр. 68 Австралия).

### **Научная новизна**

Впервые в соответствии с формулой специальности 1.6.10 изучены геологические условия формирования типовых месторождений благородных корундов, что позволило усовершенствовать генетическую классификацию месторождений группы благородных корундов.

Изучены геологические объекты различных иерархических групп, отражены особенности геологического строения и показаны закономерности пространственного размещения в различных геотектонических блоках земной коры.

Для сложных геологических и горнотехнических условий предложено совершенствование поисковых признаков, методов оценки, поисков и разведки объектов с благородными корундами. Для крутопадающих маломощных жил с благородным корундом предлагается новый способ 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. Все это позволяет уменьшить экологическую нагрузку на среду обитания человека и исключить из процесса проходки подготовительные горные выработки.

Корунд представляет собой минерал широкой области использования, помимо драгоценных разновидностей. Предложено в промышленной классификации месторождений твердых полезных ископаемых относить его к классу «промышленное сырье» группы «корунд».

### **Практическая ценность**

В результате комплексных исследований обосновано многообразие промышленных типов благородных корундов, показаны особенности корундообразования и роль вещественного состава корундовых комплексов, что позволяет использовать полученные данные в проектной документации на постановку геологоразведочных работ в перспективных на благородный корунд районах России.

Отмечены положительные результаты работ по изучению закономерностей дробления руды при отбойке скважинами с диаметром бурения 65 мм с интервалом замедления между рядами скважин 25 мс. Эти показатели получены экспериментально.

Разработана методика расчета эффективности селективного дробления с использованием различных режимов силового воздействия. Лабораторные испытания показали наилучшие результаты селективного дробления с сохранением неразрушенных зерен корунда в режиме всестороннего сжатия, в т.ч. при сжатии «в слое». Полученный результат имеет важное практическое значение при извлечении ценных минералов.

Положения, выносимые на защиту:

### **Первое защищаемое научное положение**

Выделены коренные моногенетические и полигенетические месторождения благородных корундов. К первым отнесены месторождения магматического, пегматитового и собственно метасоматического (постмагматического) происхождения, ко вторым – полихронные и полифациальные собственно

метаморфические и метаморфогенно-метасоматические месторождения. Установлено и показано, что генетическая типизация месторождений рубина и сапфира отличается от ранее известных разделением метасоматических месторождений на две самостоятельные группы: 1) собственно метасоматические, обязанные своим происхождением действию постмагматических гидротермальных растворов и 2) метаморфогенно-метасоматические, генезис которых является логическим завершением в локальных зонах, как правило, многоэтапных процессов регионального метаморфизма.

### **Второе защищаемое научное положение**

Приводимое обобщение имеющихся данных по размещению основных месторождений и крупных проявлений благородных корундов зарубежья и России характеризует особенности корундообразования различных генотипов. С учетом важности комплексной оценки коренных источников корундов рекомендовано выделенные корундсодержащие метаморфические толщи докембрия относить к перспективным площадям на корунды. Принимая во внимание горно-геологические, минералого-технологические, экономические и экологические факторы, показана возможность применения корундов в получении отечественной продукции многоцелевого назначения.

### **Третье защищаемое научное положение**

Достигнуто повышение эффективности оценки корундообразования на основе экспериментальных работ по изучению закономерностей дробления руды при отбойке скважинами и разработанной методики расчета селективного дробления с использованием различных режимов силового воздействия. На базе компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении эффекта при дроблении породы «в слое» для сохранения целостности благородных корундов и обоснованы параметры технологии гидроразрыва при освоении коренных месторождений корунда в сложных условиях.

### **Четвертое защищаемое научное положение**

Исследованием доказано, что по извлечению корундосодержащих руд установлены пороги выделения областей принадлежащих корунду цветных пространствах RGB, Yuv и HLS и показана возможность использования метода оптической сортировки при извлечении полезного компонента и отнесению корундов в промышленной классификации месторождений твердых полезных ископаемых в качестве самостоятельного класса «промышленное сырье» группы «корунд».

### **Личный вклад автора**

Автор личный участвовал в проведении работ на всех этапах научных исследований: постановка цели и задач, разработка методик теоретических и экспериментальных исследований, их анализ и обобщение. Фактический материал работы основан на итогах поисково-оценочных и тематических работ, проводившихся на месторождении Снежное и на аналогичных проявлениях на протяжении последних двадцати лет. Автором составлена карта размещения месторождений и крупных проявлений корундов в мире. Каменное сырье собиралось с месторождений всего мира с 1992 г. На базе компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении большего эффекта при дроблении породы «в слое», что достигается в условиях равномерного всестороннего сжатия. Выполнены лабораторные эксперименты, которые подтвердили реализацию механизма дробления материнской породы мрамора с включениями корунда и рубина. Для сохранения целостности рубинов в качестве альтернативы имеющимся технологиям освоения тонких и маломощных жильных месторождений обоснованы характеристики и параметры технологии гидроразрыва для освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья.

**Апробация результатов работы.** Важнейшие результаты исследований докладывались на различных совещаниях и конференциях: XX, XXII, XXIII, XXIV Международных научных симпозиумах «Неделя горняка» – 2012, 2014,

2015, 2016, Москва; Международной научно-практической конференции, посвященной 110-летию горного факультета – 2015, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург; VI Международной конференции ИМЕТ РАН – 2015, Москва; II Международной научной школе академика К.Н. Трубецкого «Разработка крутопадающих маломощных жильных месторождений с применением технологии гидроразрыва», ИПКОН РАН – 2016, Москва; Международной конференции «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья», Плаксинских чтениях, НПК «Механообр-Техника» – 2016, Санкт-Петербург; XIII Международной научно-практической конференции «Новые идеи в науках о Земле», ГГРУ – 2017, Москва; Международной научно-практической конференции «Стратегия развития геологического исследования недр: настоящее и будущее», ГГРУ – 2018, Москва; 25 International conference « Mechanics Engineering» Svratka, Czech Republic 2019.

Публикации. Основные положения по теме диссертации опубликованы в 50 научных работах, включая 20 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и шесть патентов на изобретение.

### **Структура и объем работы**

Работа объемом 242 страниц машинописного текста состоит из 9 глав, введения и заключения, содержит 6 таблиц и 126 рисунков. Список литературы включает 179 наименований.

### **Благодарности**

Автор выражает искреннюю благодарность за поддержку и методическую помощь научному консультанту доктору геолого-минералогических наук, профессору Щипцову Владимиру Владимировичу, за полезные советы при обсуждении аспектов и результатов работы сотрудникам ФГБУ «ИМГРЭ»: к.г.-м.н.И.Г. Спиридонову, к.г.-м.н. В.А. Килипко, д.г.-м.н. Е.Н. Левченко, , сотрудникам ФГБУ «ЦНИГРИ» д.т.н.И.Ф. Мигачеву, д.т.н. Г.К. Хачатрян.

Автор признателен сотрудникам МГРИ-РГГРУ д.г.-м.н., профессору П.А.Игнатову и д.г.-м.н.А.К. Литвиненко за высказанные замечания и помощь в

работе над диссертацией, а так же главному геологу экспедиции «Чамаст» Республики Таджикистан Н.Н. Журавлеву и всем ученым, причастным к созданию данной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

### ГЛАВА 1. Физические и химические параметры корундов на технологическом уровне

#### 1.1 Конституция и свойства минералов группы корунда

Впервые кристаллическая структура корунда описана L.Pauling и S.B.Hendrics [Pauling & Hendrics, 1925]. Ими установлено, что атомы Al располагаются в октаэдрических пустотах гексагональной плотнейшей упаковки атомов O по «корундовому» мотиву, а именно: атомы Al заполняют 2/3 октаэдрических пустот. Октаэдрические слои наложены один на другой таким образом, что в вытянутых вдоль оси колонках из октаэдров чередуются два заполненных октаэдра с незаполненными слоями.

Корунд является единственной природной модификацией глинозема. По структуре отвечает искусственному  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ . Среди искусственных соединений установлен ряд неустойчивых модификаций  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , получающихся в результате нагревания гиббсита, байерита и бемита и представляющих промежуточные продукты при переходе тригидратов и бемита в корунд ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) [Дир и др., 1966].

Все разновидности корунда, включая и ювелирные, кристаллизуются в дитригонально-скаленоэдрическом виде симметрии тригональной сингонии. Для рубина характерен короткостолбчатый габитус с хорошо образованными гранями гексагональной призмы (1120), ограниченными пинакоидом (0001).

Показатели преломления корундов исключительно постоянны со значениями  $n_e 1,760$  и  $n_o 1,768$ . Удельный вес бесцветного корунда равен 3,984, а для окрашенных – 3,99-4,01. В.W.Andersen и С.J.Paune [Andersen & Paune, 1940] предложили использовать удельный вес ювелирного корунда как эталон.

Двойники по (1011) обычно полисинтетические, проявляющиеся в виде штриховатости на базопинакоиде, двойники срастания, редко двойники по (0001). Механизм образования двойников по (1011) и по (0001) связан, по-видимому, с фактором давления.

В кристаллах благородного корунда в той или иной степени проявляется отдельность по ромбоэдру или пинакоиду. Излом минерала неровный или раковистый, блеск стеклянный, близкий к алмазному. Твердость корунда 9 по Моосу и уступает лишь алмазу, плотность большинства ювелирных разновидностей 3,96-3,99 г/см<sup>3</sup>, достигает 4-4,1 у зеленых и сине-зеленых сапфиров Австралии.

Химический состав корунда отвечает формуле Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в нем обычно в небольшом количестве присутствуют примеси железа, титана, хрома, ванадия и др. Часто содержит включения рутила, гематита, ильменита, граната, шпинели др.

Рубин и сапфир вместе с алмазом, изумрудом и жемчугом всегда занимали и занимают особое место в мире драгоценных камней.

Окраска корунда очень разнообразная и зависит от примесей элементов-хромофоров. Благодаря этим элементам получающиеся в итоге цвета чаще всего чистые и яркие и охватывают почти весь цветовой спектр. Он может быть и красным, и синим, и оранжевым, и зеленым [Банк, 1979]. Химически чистый корунд бесцветен.

Главными носителями цвета, первого свойства, на которое обращается внимание при взгляде на самоцвет, или хромофорами, обуславливающими идиохромотическую окраску драгоценных камней, – являются ионы переходных металлов: Fe, Co, Ni, Mn, Си, Cr, V, и Ti. Они способны поглощать определенные длины волн в видимой области спектра, определяя таким образом цвет. В качестве элементов-примесей в состав рубина и сапфира входят 5 из них – Cr, V, Ti, Fe, Mn.

Красный цвет рубина связан с примесью Cr<sup>3+</sup>, изоморфно замещающий Al<sup>3+</sup> в алюмоокислородных октаэдрах. Оттенки цвета рубина определяются присутствием других хромофорных ионов: желтовато-коричневый оттенок создается примесью Fe<sup>3+</sup>, а синева-фиолетовый – V<sup>3+</sup>. Окраска сапфиров вызвана примесями Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Ti<sup>4+</sup>, иногда Mn<sup>4+</sup>, Cr<sup>3+</sup>. Например, желтый цвет обусловлен центрами Fe<sup>3+</sup> и ионной парой Fe<sup>3+</sup>+Fe<sup>3+</sup>, зеленый парой

$\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+}$ , синий  $\text{Fe}^{2+}+\text{Ti}^{4+}$  или парой  $\text{Fe}^{3+}+\text{Fe}^{2+}$ , желто-розовый –  $\text{Mn}^{3+}$ , а красновато-оранжевая окраска маложелезистых сапфиров – папараджа – сочетанием центров О- и  $\text{Cr}^{3+}$ . Голубые и серовато-голубые сапфиры обладают александритовым эффектом, приобретая при искусственном освещении красноватый или фиолетово-красный оттенок. Этот эффект вызывается примесями  $\text{Cr}^{3+}$  и  $\text{V}^{3+}$ . Другие примеси или радиационные центры окраски могут влиять на изменение цвета камня, но это изменение является весьма ограниченным и определяется термодинамическими и геологическими условиями роста кристаллов.



Рисунок 1.2 Кристалл сапфира(<http://wiki.web.ru>)



Рисунок 1.3 Кристалл рубина



Рисунок 1.4 Звездчатый сапфир  
<http://geo.web.ru>)



Рисунок 1.5 Папараджа  
(<http://www.goldium.ru>)



Рисунок 1.6 Обыкновенный корунд  
(<http://upload.wikimedia.org>)

Способность к плеохроизму слабо выражена в благородном корунде. Схема абсорбции:  $N_g > N_p$ . Рубины и хромсодержащие сапфиры интенсивно люминесцируют в ультрафиолетовых и инфракрасных лучах, возбуждающих ионы хрома в кристаллической структуре минерала. Поэтому рубины и фиолетовые сапфиры при дневном или ярком электрическом освещении приобретают ярко-красное свечение, что в определенной мере компенсирует недостаток игры света, обусловленный малой величиной дисперсии преломления.

Эксперименты по сложению цветов и исследования цветового зрения людей позволили установить спектральную чувствительность трех отдельных цветовых рецепторов глаза человека, связанных с колбочками. Максимумы их чувствительности оказались близки к красному, зеленому и синему цветам. Таким образом, эти три цвета для человека оказываются особенными, выделенными. Возможно, что и особая привлекательность цветов изумруда, рубина и сапфира для большинства людей связана с физиологическими особенностями нашего зрения.

Общая характеристика месторождений мира приводится в табл. 1.1.

Таблица 1.1 Обобщенная характеристика корундов мира (с использованием материалов в работе J.E. Arem [Arem, 1977])

| Страна<br>(район) | Разновидность | Цвет | $N_{g_g}$ | $N_{p_e}$ | Двупреломление | Уд. вес |
|-------------------|---------------|------|-----------|-----------|----------------|---------|
|                   |               |      |           |           |                |         |

|                                   |        |                                  |               |             |             |          |
|-----------------------------------|--------|----------------------------------|---------------|-------------|-------------|----------|
| Австралия                         | Сапфир | Светло-голубой                   | 1.761         | 1.769       | 0.008       | 4.02     |
|                                   |        | Темно-голубой                    | 1.763         | 1.772       | 0.009       | 3.99     |
|                                   |        | Зеленый                          | 1.763         | 1.772       | 0.009       | 4.00     |
|                                   |        | Желтый                           | 1.765         | 1,774       | 0.009       | 3.97     |
|                                   |        | Желто-зеленый                    | 1.767         | 1,775       | 0.008       | 3.99     |
|                                   |        | Золотисто-желтый-                | 1.763         | 1.772       | 0.008       | 4.01     |
| Бразилия<br>(Jauru, Matto Grosso) | Сапфир | Темно-голубой                    | 1.762         | 1.770       | 0.008       | 3.954.05 |
| Мьянма                            | рубин  | Ярко-красный                     | 1.760-1.769   | 1.768-1.778 | 0.008-0.009 | 3.996    |
|                                   | Сапфир | Темно-голубой                    | 1.762         | 1.770       | 0.008       | 4.00     |
| Индия<br>Кашмир                   | Сапфир | Ярко-голубой                     | 1.762         | 1.770       | 0.008       | 3.99     |
| Колумбия                          | Сапфир | Голубой, фиолетовый              | 1.762         | 1.770       | 0.008       | 3.994.02 |
| Япония                            | Рубин  | От пурпурно-красного до розового | 1.761         | 1.769       | 0.008       | 3.89     |
| Малави                            | Сапфир | Различный                        | 1.760 - 1.761 | 1.770       | 0.009       | –        |
|                                   | Рубин  | Красный                          | 1.7621.763    | 1.7711.772  | 0.009       | –        |
| Непал<br>(Тапледжунг)             | Рубин  | Красный                          | 1.760         | 1.768       | 0.008       | 3.98     |

|                            |        |                           |                |                 |            |               |
|----------------------------|--------|---------------------------|----------------|-----------------|------------|---------------|
| Пакистан<br>(Долина Хунза) | Рубин  | Красный                   | 1.762          | 1.770           | 0.008      | 3.99          |
| Шри-Ланка                  | Рубин  | Красный                   | 1.7611.76<br>3 | 1.7691.77<br>2  | 0.008      | 3.994.0<br>0  |
|                            |        | Голубой                   | 1.757<br>1.760 | 1.7651.76<br>8  | 0.008      | 4.00          |
|                            | Сапфир | Желтый                    | 1.7601.76<br>1 | 1.768 -<br>1769 | 0.008      | 3.994.0<br>1  |
|                            |        | Зеленый                   | 1.765<br>1.770 | 1.7731.77<br>9  | 0.0080.009 | 4.00-<br>4.01 |
| Танзания                   | Рубин  | Красный                   | 1.764          | 1.772           | 0.008      | 3.99          |
| Лонгидо                    | Сапфир | Оранжевы<br>й             | 1.7601.76<br>3 | 1.7681.77<br>2  | 0.0080.009 | 3.99          |
| Долина реки Амба           | Сапфир | Красно-<br>коричневы<br>й | 1.7631.76<br>5 | 1.7711.77<br>3  | 0.008      | 3.994.0<br>6  |
| Таиланд                    | Рубин  | Красный                   | 1.7601.76<br>4 | 1.7681.77<br>2  | 0.008      | 4.01          |
|                            | Рубин  | Темно-<br>красный         | 1.768          | 1.776           | 0.008      | 4.00          |
| Югославия<br>(бывшая)      | Рубин  | Красный                   | –              | ~1.765          | –          | 3.803.9<br>8  |

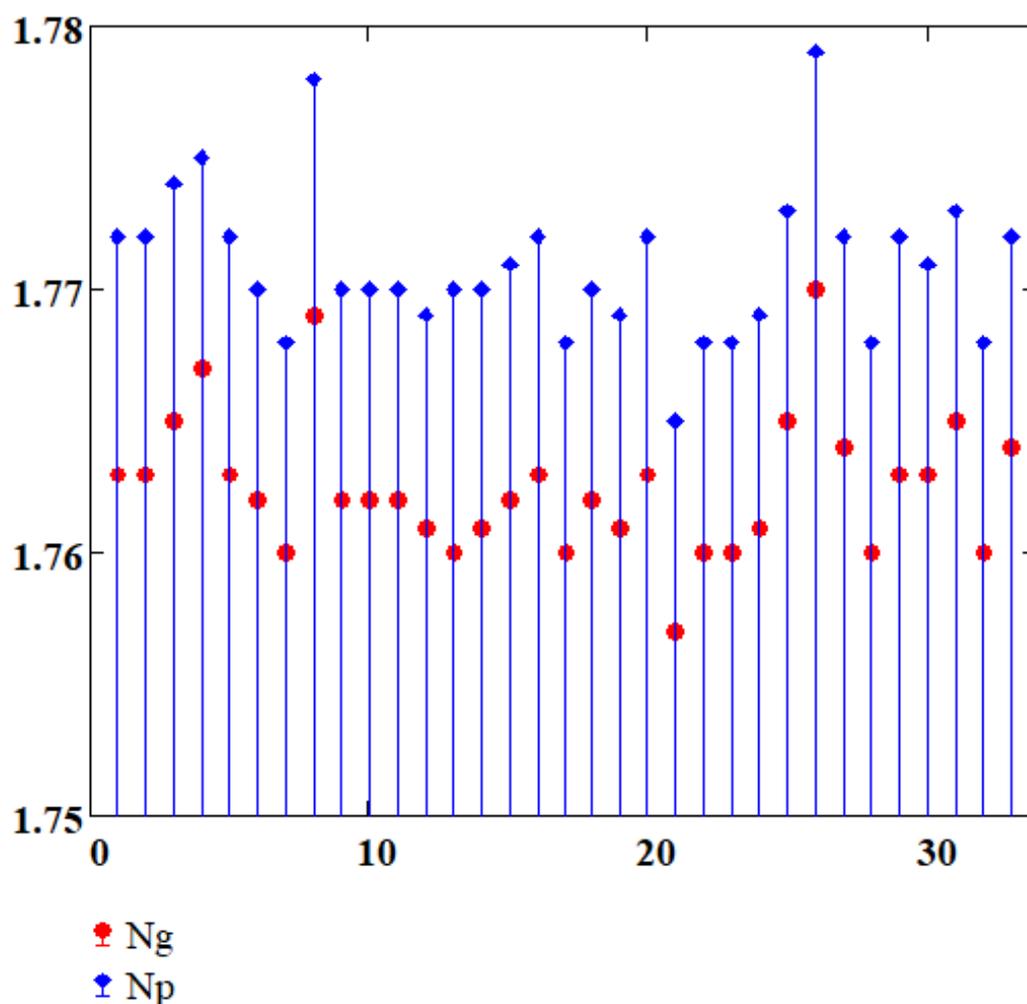


Рисунок 1.7 – Характеристика корундов мира по показателям  $N_{g_g}$  и оборудования  $N_{p_e}$

## 1.2. Физические и химические методы исследований корундов

### 1.2.1 Прецизионное изучение микроэлементного состава корундов на квадрупольном масс-спектрометре X-SERIES 2 Terhmo

Препарат пробы вводился в масс-спектрометр в потоке аргона в виде аэрозоля и ионизировался в индуктивно-связанной плазме. Разделение ионов осуществляется анализатором с двойной фокусировкой – магнитной и электростатической. Детектирование ионов производилось электронным умножителем, сохраняющим линейность в диапазоне  $1 \dots 1 \cdot 10^{10}$  ионов в секунду.

Калибровка чувствительности прибора по всей шкале масс осуществлялась с помощью стандартных 68-элементных растворов (ICP-MS-

68А, НРС, растворы А и В), включающих все анализируемые в пробах элементы. Для контроля качества измерений и учета дрейфа чувствительности прибора анализы проб чередовались с анализами стандартного образца с периодичностью 1:10. В качестве стандартных использовались аттестованные образцы ВНВО-2 и СОQ-1, разложенные с серией исследуемых проб. Пределы обнаружения элементов составляли от 0.1 нг/г для тяжелых и средних по массе элементов с возрастанием до 1 нг/г для легких элементов. Погрешность анализа составляла 13 отн.%. Для расчета концентраций элементов использовалась серия калибровочных растворов, приготовленных из стандартного раствора ICP-MS-68А, НРС (А и В) с диапазоном концентраций 0.03-10 ppb.

В тщательно отмытые и высушенные фторопластовые виалы Savillex помещали порошок пробы весом от 70 до 100 мг для разложения проб. В виалу с навеской добавляли 2 мл концентрированной HCl. Виалы помещали в автоклавы и выдерживали при температуре 220 °С в течение 3 сут. Из виал смесь переводили в одноразовые полипропиленовые пробирки с 0.5 Н раствором HNO<sub>3</sub> объемом 50 мл путем многократного смывания, выдерживали дважды по 25 мин в ультразвуковой ванне с подогревом до 60 °С и оставляли еще на 3-4 дня.

Непосредственно перед измерением готовую пробу разбавляли в одноразовых полипропиленовых пробирках в 100 раз для разбавления концентрированной алюминиевой матрицы и добавляли раствор In в качестве внутреннего стандарта для контроля стабильности интенсивности сигнала при измерении.

Все операции выполняли весовым методом. Для разложения использовали HCl и HNO<sub>3</sub> категории Ос.Ч., подвергшиеся перегонке, и дважды дистиллированную воду. Контроль загрязнения производили путем использования холостых образцов и их последующего вычитания.

Прецизионное изучение микроэлементного состава ( содержания элементов- примесей и рассеянных элементов) оригинальных образцов

корундов проведено на квадрупольном масс-спектрометре X- SERIES 2 Termo. На спайд- диаграмме ( рис. 1.8) показана основная одинаковая тенденция при некотором преобладании легких элементов с четко выраженной отрицательной европиевой аномалией. Содержание РЗЭ отражает относительную чистоту корундов (18 – корунд, Танзания «winza», 32 – синий корунд, остров Ольхон, Байкал, Россия ( магматический), 34 – лейкосапфир, Амбуситра, Мадагаскар ( хлоросапфир), 40 – розовый корунд, Gaigo Morogoro, Танзания, 41 – корунд, Jegdalek, Афганистан, 42 – корунд черный ( корундоносный гнейс), Майсур, Южная Индия ( метаморфический), 47 – рубин, Майсор, Карнатака штат, Индия ( метаморфический), 49 корунд, Майсор, Карнатака штат, Индия ( метаморфический), 54 корунд ( рубин), Модроса, Индия, 55 – рубин с астеризмом, Модроса, Индия, 56 – корунд розовый зональный, Пакака, Мадагаскар, 60 - рубин (в гнейсе), Мадагаскар, 1 Танзания, 2 Индия).

Результаты анализа приведены на спайд-диаграмме ( рисунок 1.8).

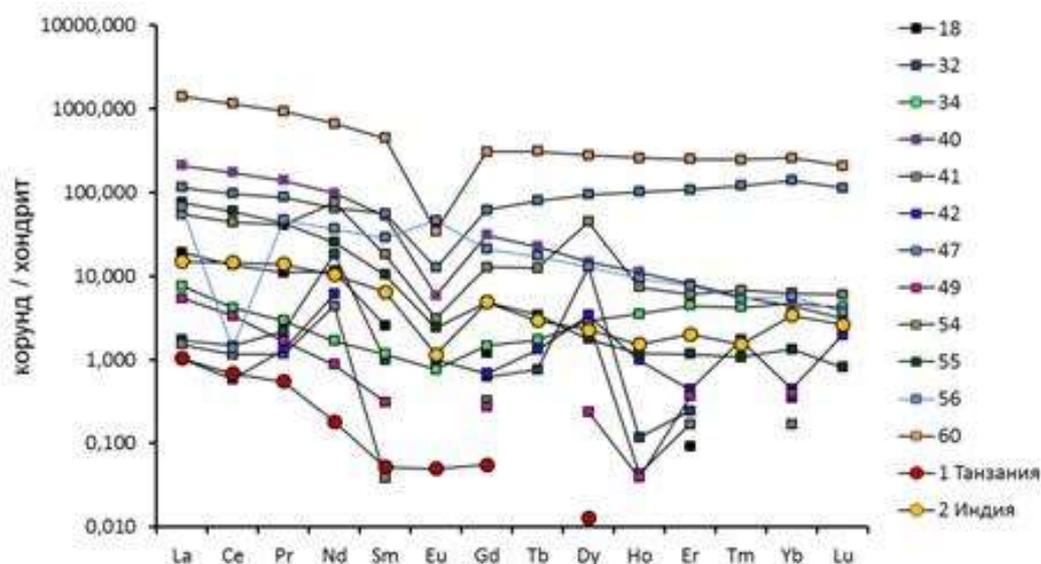


Рисунок 1.8 Мультиэлементная спайд – диаграмма для корундов мира. Нормализованные по хондриту [автора Thomhson, 1982]. Содержание элементов- примесей и РЗЭ в корундах, ppm

### 1.2.2 Изучение ИК-спектров образцов корунда

Исследования проводились на ИК- Фурье спектрометре Nicolet 380 с использованием микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific. Особенностью работы на этой аппаратуре является использование специальной компьютерной программы OMNIC, необходимой для автоматизированного получения спектров, контроля их качества, а также анализа и обработки данных. При работе на ИК- микроскопе пробоподготовка практически не требуется. Единственным ограничением являются размеры анализируемого образца. Оптимальная толщина частиц составляет от 0,005 до 0,015 мм. ИК- микроскоп Centaurus, обладающий высокочувствительным детектором МСТ-А, позволяет анализировать микрочастицы размером от 40 мк в диапазоне 600-4000 см<sup>-1</sup> в режимах пропускания и отражения. Интерпретация полученных спектров осуществлялась с помощью базы данных и по методике, разработанной в ЦНИГРИ [ Хачатрян, Кряжев, 2010].

Результаты исследования. ИК- спектры отдельных микрозерен в одном и том же образце варьируют ( рис. 1.9), что указывает на неоднородности состава корунда. Особенно значительно отличаются друг от друга спектры прозрачных и полупрозрачных зерен. Большинство изученных образцов обнаруживает ИК- поглощение в трех спектральных интервалах 4000-2500 см<sup>-1</sup>, 2200-1900см<sup>-1</sup> и 1500-700 см<sup>-1</sup>. Последний интервал соответствует собственным колебаниям кристаллической решетки корунда. Это подтверждается тем, что в бесцветном прозрачном корунде, не содержащем видимых примесей, прослеживаются лишь линии в интервале 1500-700 см<sup>-1</sup> ( рис. 1.10).

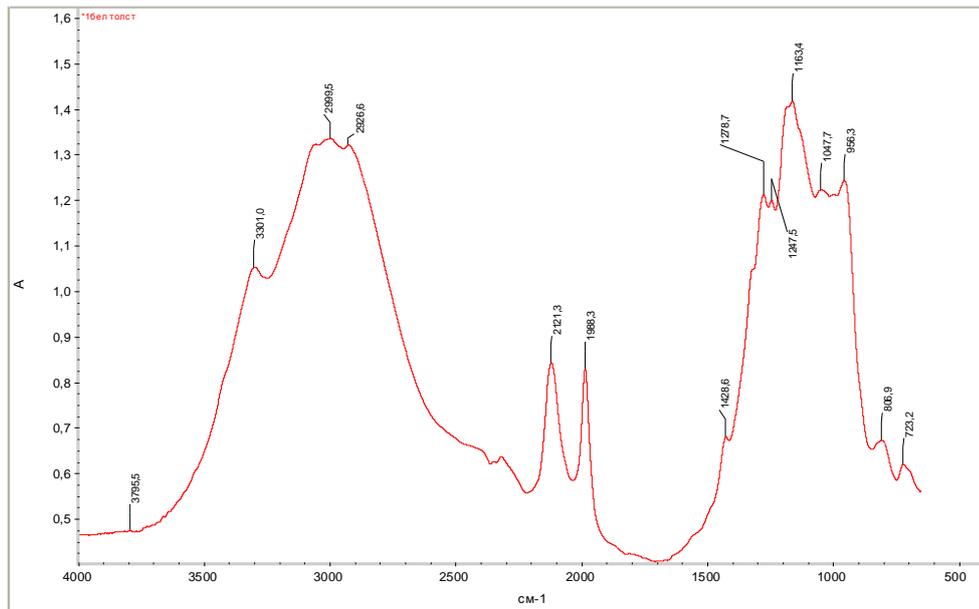


Рисунок 1.9 ИК- спектр корунда ( обр. 34 – лейкосапфир, Амбуситра, Мадагаскар)

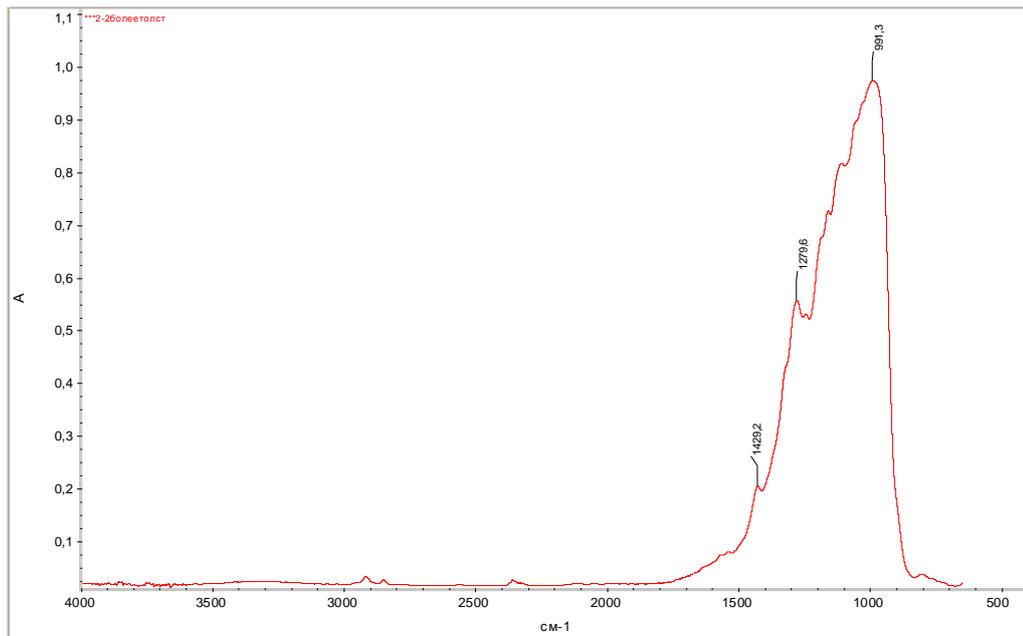


Рисунок 1.10 ИК- спектр корунда ( обр. 2, месторождение Снежное, Таджикистан)

В области 4000-2500 см-1 проявляются валентные колебания ОН- и NH- группировок ( рис.11).

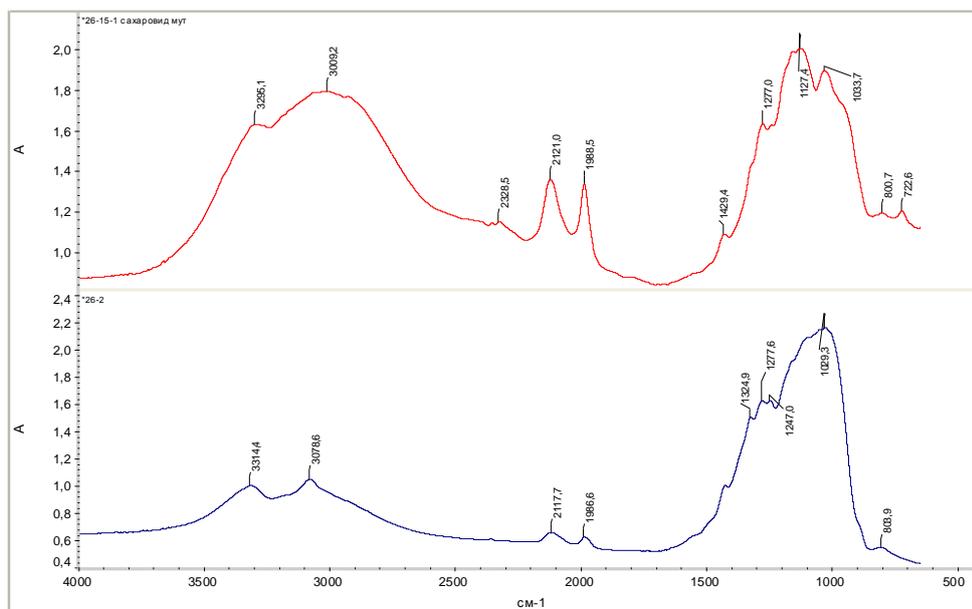


Рисунок 1.11 ИК- спектр корундов (обр. 26/15 – светлый корунд, Хунза, Пакистан)

В данном случае это, скорее всего, гидроксильные группы, входящие в состав адсорбированной воды (газово-жидкие включения, межзерновая вода), а также структурные гидроксильные группировки, весьма типичные для корунда. Можно предположить, что четкие линии около 3310, 3292, 3080 см<sup>-1</sup> и некоторые другие (рис. 1.11) относятся именно к валентным колебаниям структурных ОН-групп. Эти группировки можно рассматривать в качестве типоморфных свойств корунда из разных месторождений. Узкие линии 2120 и 1990 см<sup>-1</sup>, по-видимому, связаны с деформационными колебаниями структурных ОН-групп.

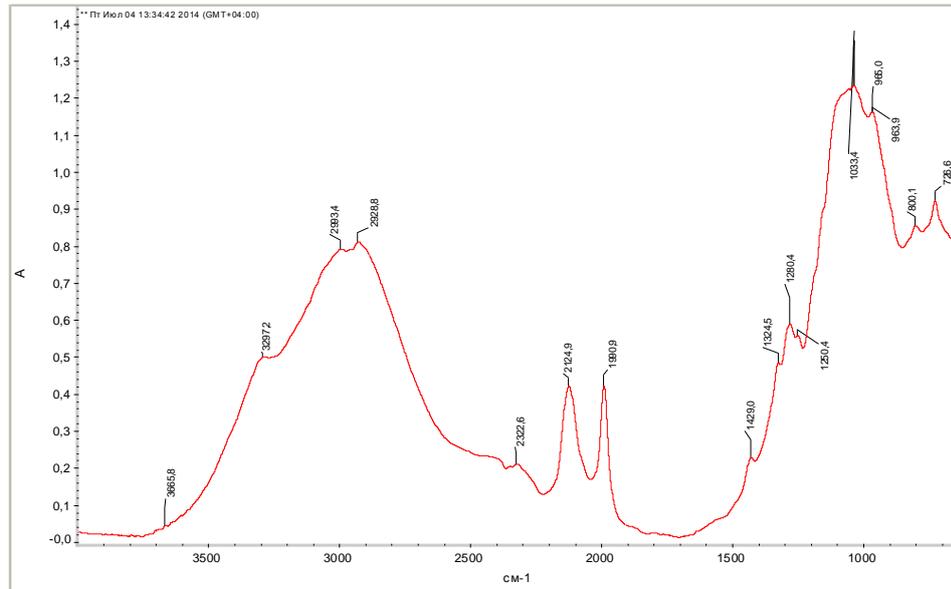


Рисунок 1.12 ИК- спектр корунда ( обр. 33/54, сапфир, Петерсит, Индия)

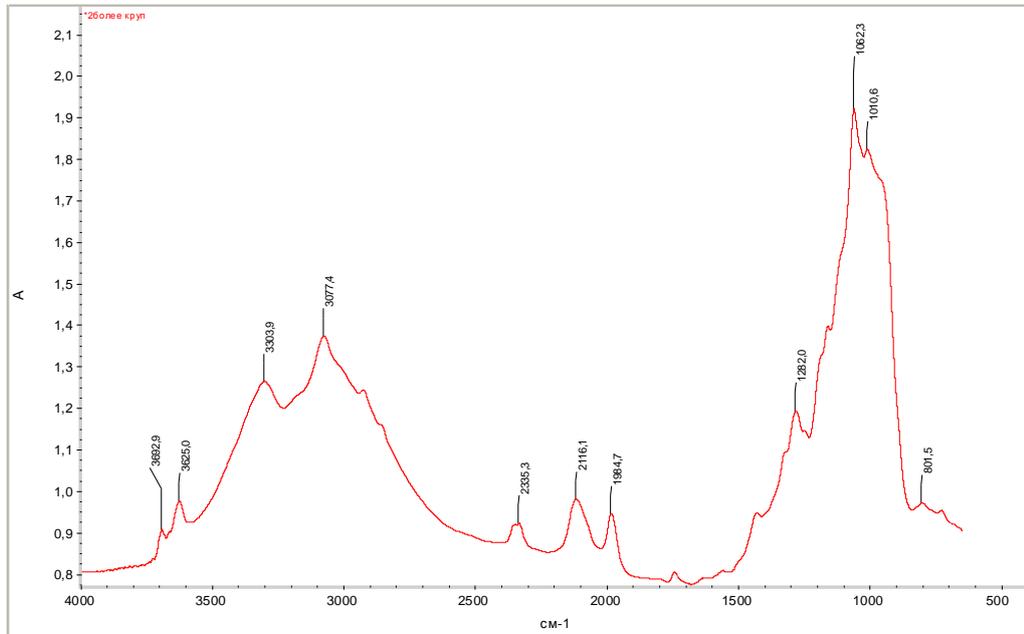


Рисунок 1.13 ИК- спектр корунда ( обр. 56, корунд розовый зональный, Илакака, Мадагаскар)

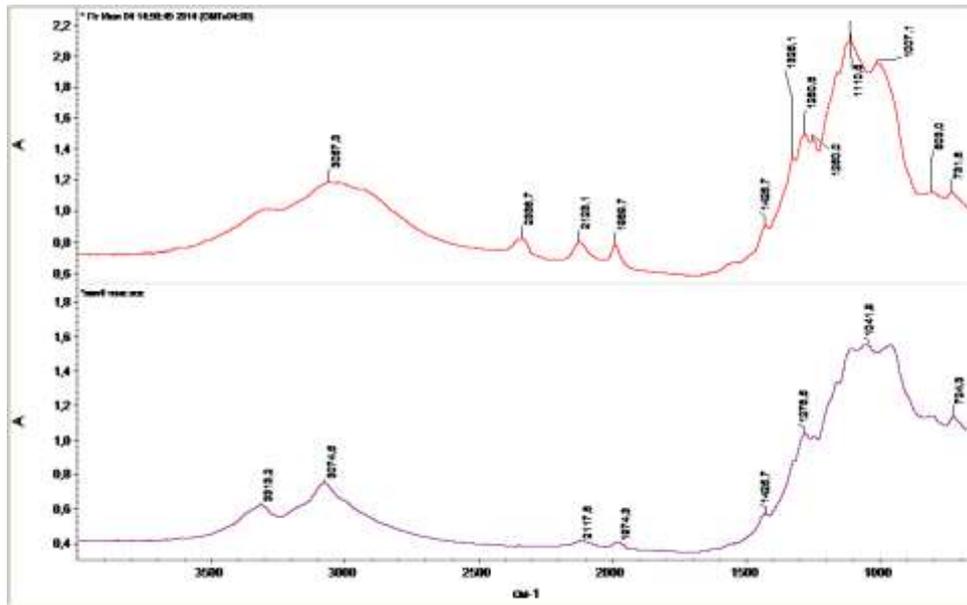


Рисунок 1.14 ИК-спектр корунда (обр.1, Танзания, Merelani)

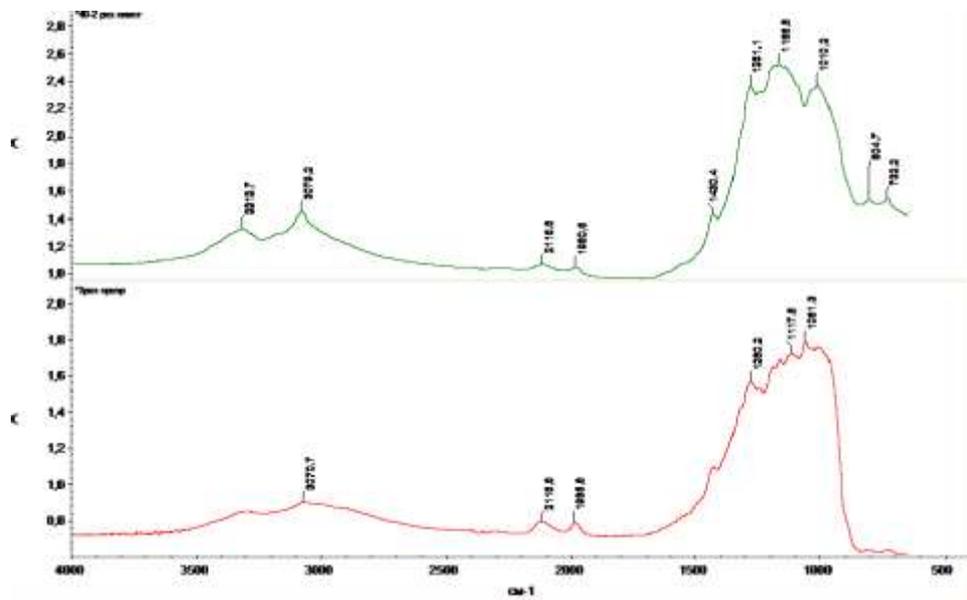


Рисунок 1.15 ИК-спектр корунда (обр. 40, Танзания, Gairo Morogoro)

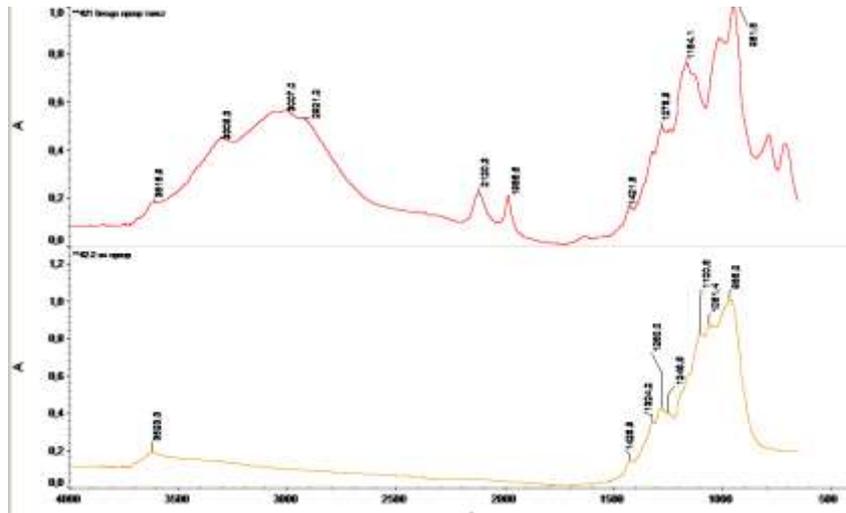


Рисунок 1.16 ИК- спектр корунда ( обр. 42, Индия, Майсур)

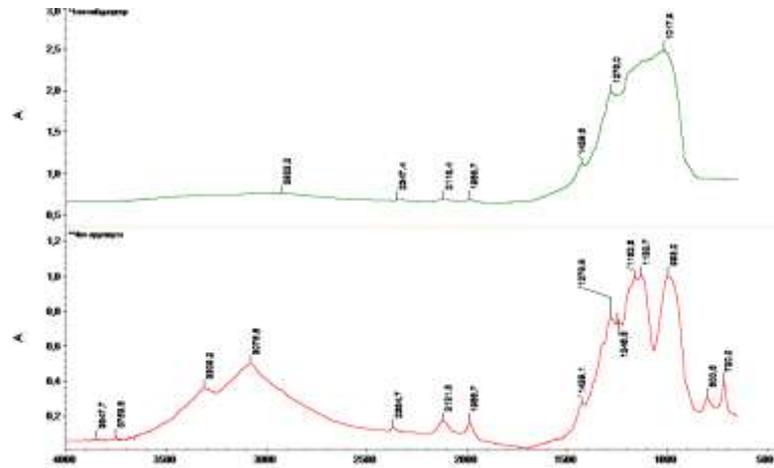


Рисунок 1.17 ИК- спектр корунда ( обр. 44, Вьетнам, провинция Йен- Бай, Лус Yen)

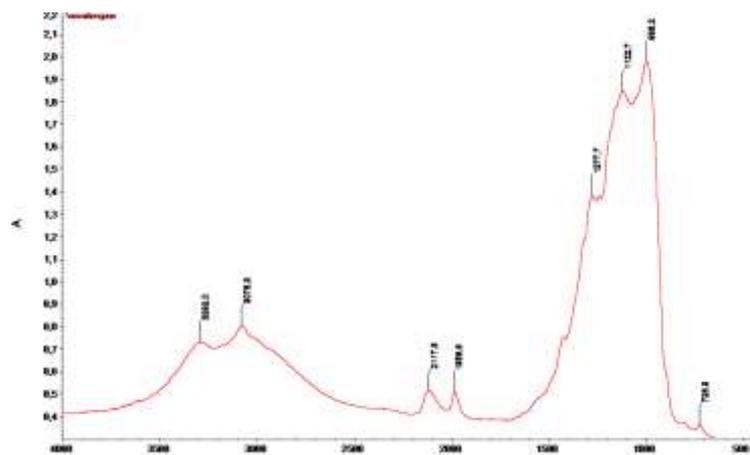


Рисунок 1.18 ИК- спектр корунда ( обр. 47, Индия, Майсор)

)



Рисунок 1.19 ИК- спектр корунда ( обр. 53, Россия, Хитостров, Карелия)

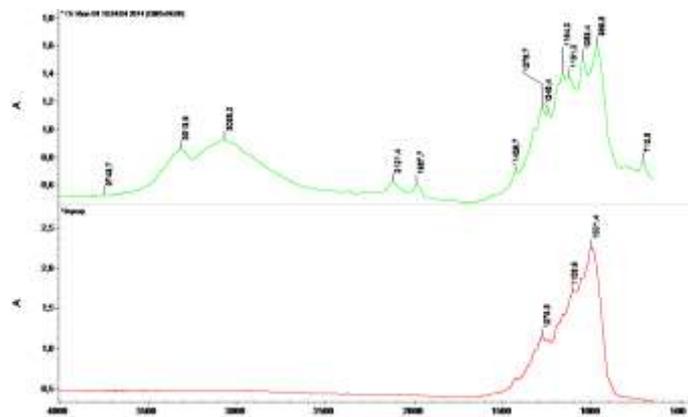


Рисунок 1.20 ИК- спектр корунда ( обр. 55, Индия, Модроса)

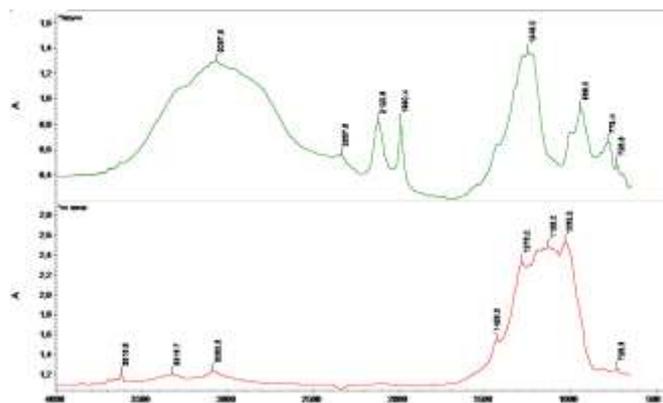


Рисунок 1.21 ИК- спектр корунда (обр.60, Мадагаскар)

### 1.2.3 Изучение химического состава корундов с использованием электронно-зондового микроанализатора

Химический состав минералов изучался на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы JEOL в лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН. Анализ осуществлялся при ускоряющем напряжении 20 kV, токе на цилиндре Фарадея 20 nA, диаметре зонда 35 мкм. Время экспозиции на основные элементы составляло 10 с. Для обеспечения электропроводимости образцы напылялись тонким слоем углерода. Расчет поправок осуществлялся по методу ZAF-коррекции с использованием программы фирмы JEOL.

Анализ корундов и силикатных фаз проводился с использованием следующих стандартов:

Si – санидин, Na – жадеит, Fe – альмандин, K – санидин, Ni – NiO, Al – корунд, Mg – оливин, Mn – спессартин, Ca – анортит, Cr – хромит, Ti – сфен. При анализе рудных включений применялись стандарты: Ti – ильменит, Mg – хромит, Fe – магнетит, Ca – сфен, Ni – Ni, Si – альмандин, Mn – спессартин, Nb –  $Rb_2Nb_4O_{11}$ , V – V, Cr – хромит, Al – хромит. Для одиночных включений циркона использовались такие эталоны: Si – циркон, P – апатит, Zr – циркон, U –  $UO_2$ , Hf –  $HfO_2$ , Y –  $Y_2O_3$ , Th –  $ThPO_4$ , S –  $BaSO_4$ , Nb –  $Rb_2Nb_4O_{11}$ .

Изучаемая поверхность образцов полировалась и для обеспечения электропроводимости напылялась тонким слоем углерода.

В результате проведенной работы были выявлены минеральные включения, представленные окислами и гидроокислами железа, цирконом, амфиболами, слюдами, хлоритом, апатитом, рутилом, ильменитом и минералами редких земель. В исследованных образцах наблюдается развитие вторичных минералов – окислов и гидроокислов алюминия. В диссертации приводятся микрофото по материалам исследований на электронно-зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы JEOL (рисунки

1.191.29: обр. №14; обр. № 6; обр. № 12; обр. № 22; обр. № 23; обр. № 26; обр. № 34; обр. № 36; обр. № 44; обр. № 42; обр. № 47).

В некоторых образцах отмечаются примеси элементов-хромофоров: железо, хром, титан. Газово-жидких и флюидных включений не обнаружено.

Условные обозначения: Crn- корунд, Dsp- диаспор, Rt- рутил, Grt- гранат, Pl- плагиоклаз, Ap- апатит, Mc- микроклин, Zrn- циркон, Chl- хлорит, Pcl- пироксид, Ms- мусковит, Kln- каолинит, Mag - магнетит.

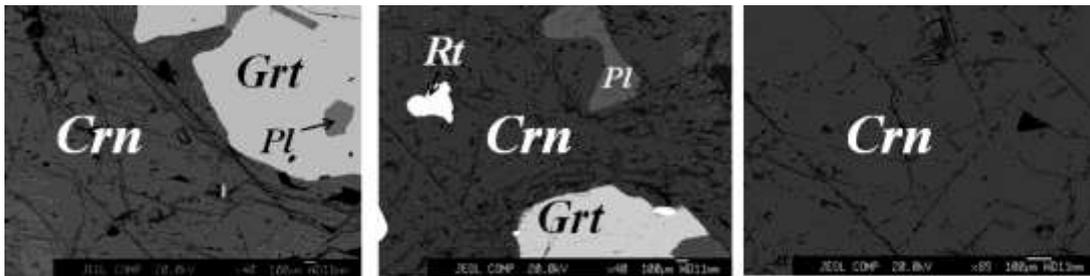


Рисунок 1.22- Минеральные включения в корунде (обр. №14 – корунд, Jegdalek Афганистан)

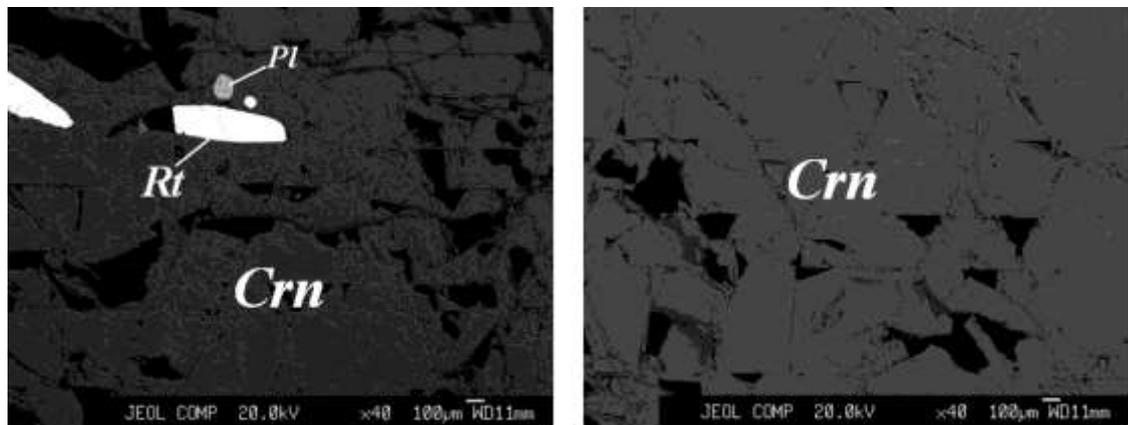


Рисунок 1.23- Минеральные включения в корунде (обр. № 6, Karnataka, Mysore district, Индия)

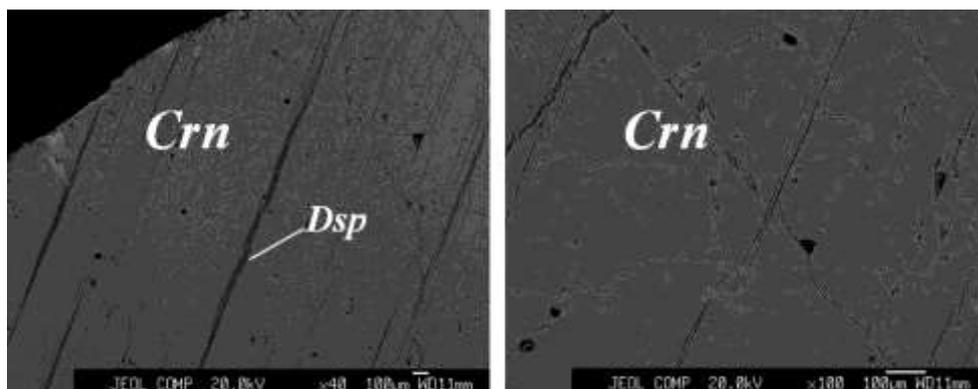
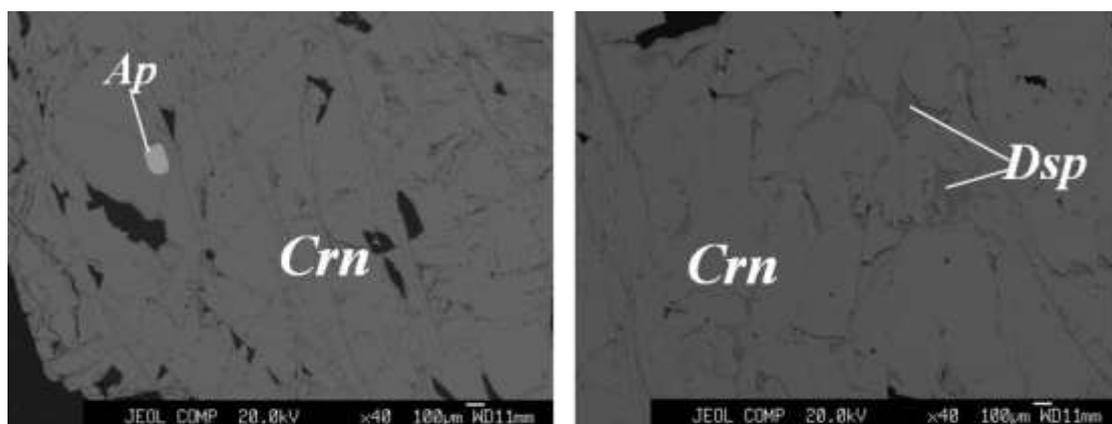


Рисунок 1.24- Минеральные включения в корунде (обр. № 12, подножье горы Мансур, Индия)



| Спектр<br>определения | Содержание, % |      |      |       |      |      |      |      |      |      |       |        |
|-----------------------|---------------|------|------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|--------|
|                       | SiO2          | TiO2 | FeO  | Al2O3 | CaO  | Na2O | K2O  | NiO  | MgO  | MnO  | Cr2O3 | Total  |
| Crn                   | 0.16          | 0.00 | 0.50 | 99.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | 0.00 | 0.42  | 100.22 |
| Crn                   | 0.16          | 0.00 | 0.52 | 99.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.38  | 100.44 |
| Dsp                   | 0.17          | 0.01 | 0.48 | 78.94 | 0.02 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.37  | 80.01  |
| Dsp                   | 0.16          | 0.01 | 0.39 | 76.91 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.41  | 77.80  |

Рисунок 1.25- Минеральные включения в корунде и таблица составов по спектрам определения (обр. № 22, Анцерабе, Мадагаскар)

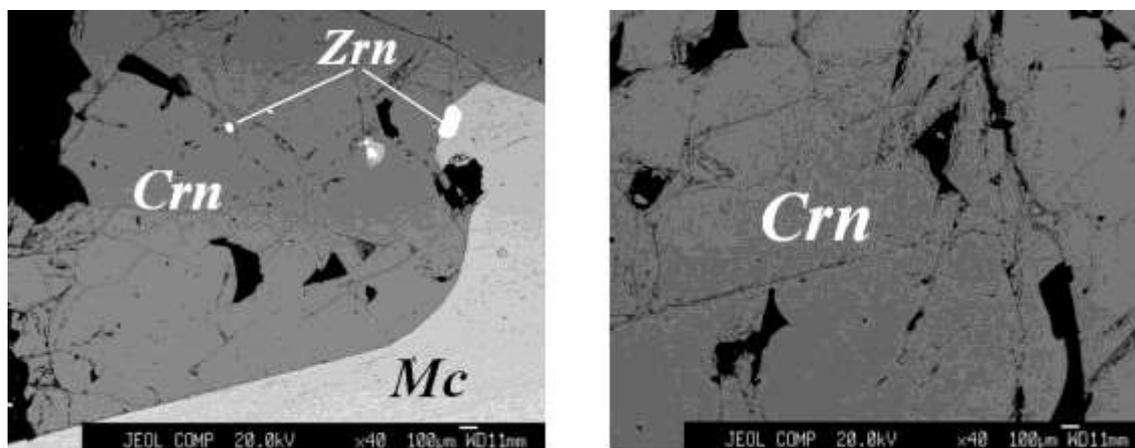


Рисунок 1.26- Минеральные включения в сапфире (обр. № 23, Ихози, Мадагаскар)

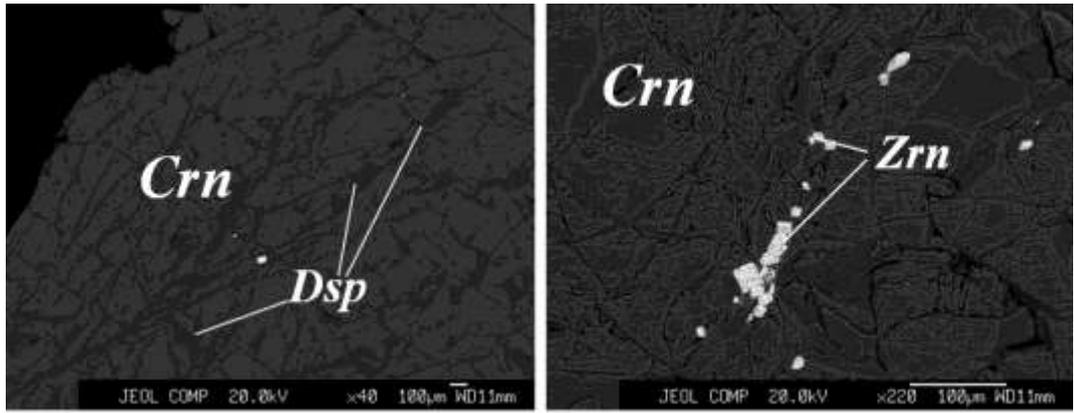


Рисунок 1.27- Минеральные включения в лейкосапфире (обр. № 34, Амбуситра, Мадагаскар)

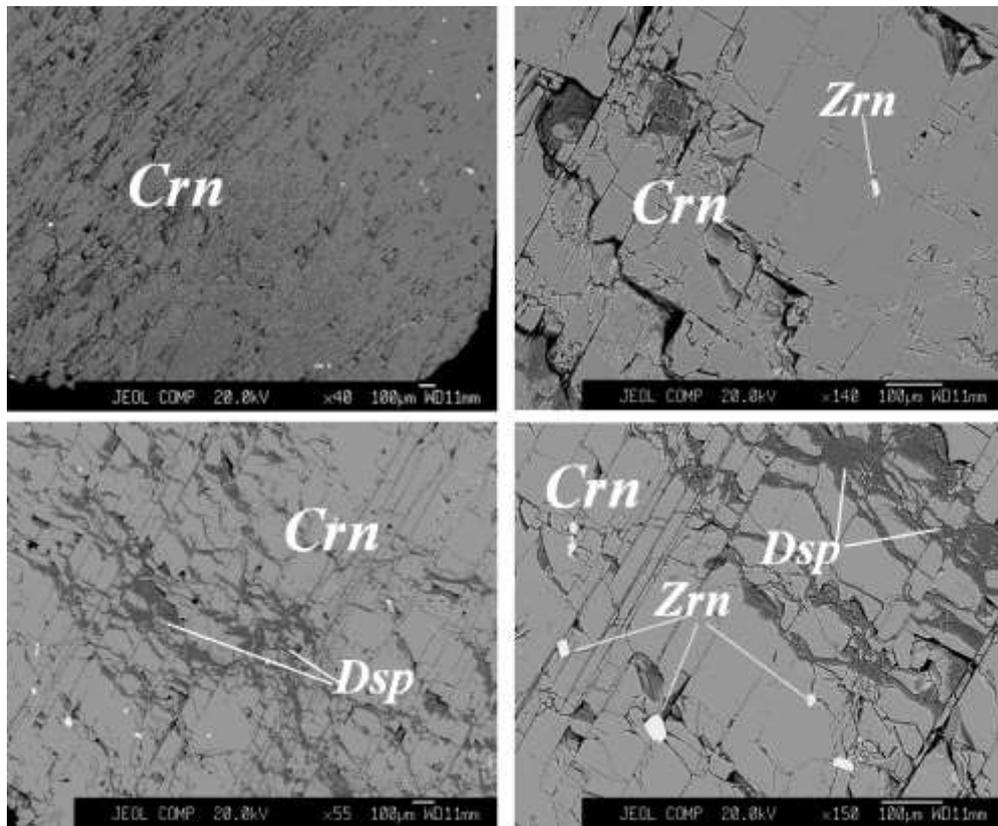


Рисунок 1.28- Минеральные включения в корунде (обр. № 36, Норвегия)

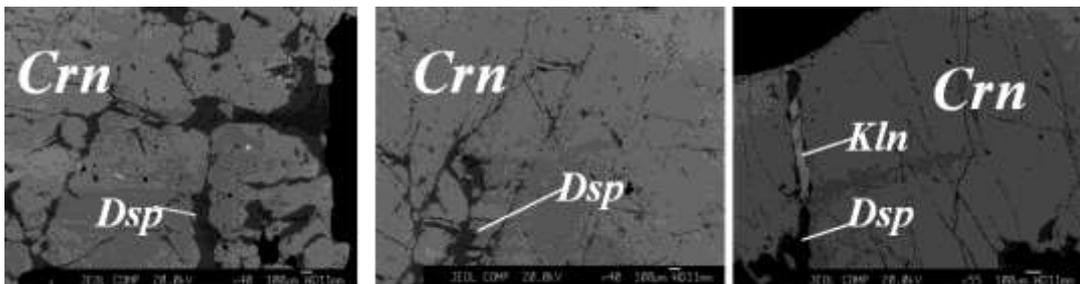


Рисунок 1.29- Минеральные включения в корунде (обр. № 44, провинция Йен- Бай, Вьетнам)

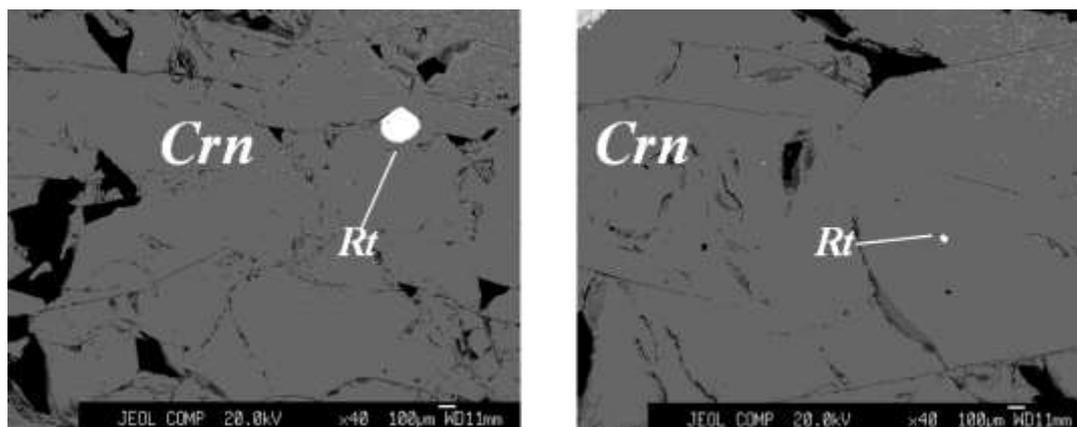


Рисунок 1.30- Минеральные включения в корунде ( обр. № 42, Майсур, Южная Индия)

#### 1.2.4 Изучение флюидных включений

##### Методика изучения флюидных включений

Для визуального наблюдения флюидных включений (ФВ), а также термометрических и криометрических исследований из образцов корундов были изготовлены двусторонние прозрачно-полированные пластинки толщиной 0.250.3 мм. Площадь пластинок составляла несколько квадратных сантиметров.

С использованием оптического микроскопа Olympus BX-51 определялись форма и размеры ФВ. Микротермометрические исследования ФВ проводились в секторе минераграфии ИГЕМ РАН с использованием измерительного комплекса, созданного на основе микротермокамеры THMSG-600 фирмы «Linkam» (Англия).

В целях получения достоверных микротермометрических данных исследования проводились на группах минимум из двух флюидных включений с одинаковыми фазовыми соотношениями и близкими температурами фазовых переходов, чтобы убедиться в исходной гомогенности захваченного флюида. Точность измерения температур составляла  $\pm 0,2$  °C для температурного интервала от -60 до +60 °C и  $\pm 1,5$  °C за его пределами.

Результаты интерпретировались по стандартным методикам [Roedder, 1984; Goldstein, Reynolds, 1994]. Состав основных солевых компонентов растворов определялся по температурам плавления эвтектики (Тэвт).

Состав основных солевых компонентов растворов определялся по температурам плавления эвтектики (Тэвт). Интервал Тэвт от  $-21,2$  до  $-33,6$  °С соответствует Na- хлоридным растворам, Тэвт от  $-33,6$  до  $-49,8$  °С интерпретировались как растворы  $MgCl_2$ , температуры ниже  $-49,8$  °С – растворам с преобладанием  $CaCl_2$ . Измеренные Тэвт растворов большинства изученных включений имеют значения ниже, чем Тэвт химически чистых систем, что обусловлено присутствием во флюидах небольших количеств иных катионов. Приведенные в тексте составы растворов отражают лишь количественно преобладающую в них соль. Концентрация (С) растворов двухфазных водно- солевых ФВ определялась по температуре плавления льда (Тпл. льда), соленость флюидов многофазных ФВ, содержащих растворимые твердые фазы, – по температурам растворения последних кристаллов соли. Результаты интерпретировались с использованием данных из работы [Vodnar, Vityk, 1994].

Количество примесей, содержащихся в углекислоте (в процентах), определялось по температурам плавления твердой углекислоты и температурам гомогенизации углекислоты с использованием диаграмм. Давление для сингенетичных водно- солевых и углекислотных включений оценивалось по методу В.А. Калюжного [Калюжный, 1991].

Петрографическая характеристика флюидных включений.

По петрографическим характеристикам среди ФВ выделены: первая группа – ФВ, которые встречаются по одному или образуют хаотичные незакономерные скопления в центральных частях и иногда по краям зерен. Иногда эти флюидные включения приурочены к зонам роста кристаллов; вторая группа – ФВ, образующие цепочки и плоскости, приуроченные к трещинам, пересекающим несколько зерен.

В соответствии с критериями E. Roedder (Roedder, 1984) первая группа включений отнесена к первичным, захваченным во время роста кристаллов, вторая группа отнесена к вторичным, которые содержат флюид, проникший по трещинам после кристаллизации минерала. Размер первичных включений составляет от 2 до 50 мкм, они обладают округлой вытянутой или неправильной формой или формой отрицательных кристаллов с элементами кристаллографической огранки. Размер вторичных включений не превышает 10 мкм. Для изучения выбраны первичные флюидные включения размером от 5 мкм и в некоторых случаях – крупные вторичные включения (от 5 мкм).

В отдельную группу отнесены образцы, в которых не было обнаружено ни одного ФВ: обр. № 16- рубин, Ратнапура, Шри- Ланка; обр. № 17- корунд, Рай- Из, Полярный Урал, Россия; обр. № 42- корунд черный (корундоносный гнейс), Майсур, Южная Индия. При микроскопическом изучении все эти образцы имеют общие признаки: они трещиноваты, деформированы, содержат минеральные и расплавные включения и не содержат ни первичных, ни вторичных включений. В образце № 17 также обнаружены зерна более позднего граната.

Основные формы ФВ – округлая, вытянутая, неправильная и отрицательные кристаллы с элементами кристаллографической огранки.

Размер первичных ФВ составляет от 2 до 50 мкм, они обладают округлой вытянутой или неправильной формой, или формой отрицательных кристаллов с элементами кристаллографической огранки. Размер вторичных ФВ не превышает 10 мкм.

По фазовому составу при комнатной температуре все включения однофазные. При охлаждении и нагревании было обнаружено, что все ФВ содержат жидкую углекислоту. Перечень основных проанализированных проб (пр. № 3, Мюссе, Кашмир, Индия (синий), № 29, Запскор, Кашмир; № 47, рубин, Майсор, Карнахака штат, Индия; пр. № 4, Мура- Бора, Танзания, № 5, Ihosy, № 40, розовый корунд, Моро- Горо (Gairo Morogoro), № 48,

рубин в мусковите, Моро- Горо, Танзания; Мадагаскар ( пегматит); № 7, остров Ольхон, Байкал, Россия; № 10, Рай- Из, Полярный Урал, Россия; № 19, Ильменский заповедник, Урал, Россия; № 20, Будун на Ольхоне, Байкал; № 32, синий корунд, остров Ольхон, Байкал, Россия; № 23, Ихози, № 30 Ватондради; № 34, лейкосапфир, Амбуситра, Мадагаскар; № 36, Санднессьезн, Норвегия; № 38, синий корунд, деревня Колташи, Средний Урал, Россия; № 39, корунд, Музор, Индия.

В отдельных корундах обнаружены двухфазные ФВ – газ + жидкость. По соотношению фаз в них можно выделить 2 типа: 1-й – с газовой фазой, занимающей не более 30 % объема ФВ; 2-й – с газовой фазой, занимающей до 50 % объема ФВ. Флюидные включения первого типа содержат водно-солевой флюид. Флюидные включения второго типа содержат углекислотно- метановый флюид.

Вероятно, что кристаллизация всех корундов происходила в условиях гетерогенной среды, состоявшей из несмесимых слабосоленого водно-солевого и высокоплотного углекислотного флюидов. Включения первого типа встречаются цепочками и плоскостями рядом с цепочками включений второго типа ( углекислотными), что позволяет предполагать их сингенетичность, т.е. одновременный захват.

Плавление углекислоты происходило в температурном интервале от  $-58,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-65,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в первичных включениях и при  $-59,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  во вторичных. Тпл. чистой  $\text{CO}_2$  соответствует температуре ( $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Гомогенизация углекислоты и в первичных, и во вторичных ФВ происходила в жидкую фазу. В первичных включениях температуры варьируют от  $+1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+29,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , во вторичных – от  $+6,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+12,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Количество примесей метана в первичных ФВ оценено в 1516 %, во вторичных – 9-10 %.

Преобладающим компонентом минералообразующей системы при кристаллизации корунда была высокоплотная углекислота с небольшим

количеством других газов. Количество примесей (метана) во включениях варьирует от 12 до > 1 %.

Давление для условного интервала температур от 200 °С до 700 °С в первичных ФВ было оценено в 1100-3600 бар, во вторичных – 700-2600 минералообразующей системы и давление менялось незначительно и в течение последующего времени, при залечивании трещин, о чем свидетельствуют вторичные ФВ.

#### Выводы по главе 1

*Корунд представляет собой единственную природную модификацию с так называемым корундовым мотивом упаковки атомов Al и O. Его кристаллы обладают целым рядом особенностей твердости, окраски и оттенков. 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.*

## ГЛАВА 2. Классификация месторождений корундов

### 2.1 Общие сведения

Геолого-петрологические условия кристаллизации корунда весьма разнообразны, однако, как это отмечали исследователи [Киевленко, 1980; Киевленко и др., 1982; Hughes, 1997; Simonet, 2000; Saul, 2015; и др.], образование драгоценных рубинов и сапфиров требует специфических условий, необходимых для роста прозрачных и достаточно крупных кристаллов.

Месторождения рубина и сапфира весьма редки, а подавляющее большинство известных промышленных месторождений представлены аллювиальными, делювиально-аллювиальными россыпями либо остаточными древними корами химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород, образующих группу элювиальных и элювиально-делювиальных россыпей. К наиболее важным коренным источникам, при разрушении которых создаются крупные россыпные месторождения драгоценного корунда, относятся рубиноносные мраморы и скарны, а также сапфиросные базальты [Graham et al, 2008; Simonet et al, 2008; Sutherland et al, 2019; и др.].

В общем балансе добычи ювелирного корунда основное значение имеют аллювиальные, делювиально-аллювиальные россыпи и элювиальные, элювиально-делювиальные остаточные месторождения древнего выветривания [Iyer, 1953; Smirnov et al, 2006; Tzen-Fu Yui et al, 2006; Nam et al, 2011; и др.]. Коренные рубино- и сапфиросные тела, за счет которых образуются вторичные месторождения, плохо изучены и недостаточно освещены в геологической литературе.

Критериями промышленной значимости эксплуатируемых месторождений являются показатели длительности отработки и сведения о качестве и количестве добытого сырья. Как и большинство других драгоценных камней, рубин и сапфир полигенны. В общем, корунд в

петрохимическом отношении типичен для ассоциаций, пересыщенных глиноземом и недосыщенных кремнеземом. Такие ситуации возникают в природе при различных геологических процессах.

В настоящее время разработана Международная генетическая классификация, в которой месторождения благородных корундов мира подразделены на три серии – магматогенная, метаморфогенная и осадочная (вторичная) [Giuliani et al, 2020]. Серии подразделяются на типы и подтипы. К магматогенной серии (I тип) относятся щелочные базальты (IA подтип) и кимберлиты (IB подтип). Породы претерпели метаморфизм условий амфиболитовой, гранулитовой или эклогитовой фаций. Вторая серия метаморфогенная включает два типа (тип IIА метаморфический *sensu stricto*) и тип IIВ метаморфогенно-метасоматический). Тип IIА имеет два подтипа: подтип II А1 и подтип II А2.

Подтип II А1 представлен мафит- ультрамафитами, верлитами и гнейсами - *Танзания* (Winza, Longido); *Мадагаскар* (Andriba; Bekily-Vohibory (Ejeda, Anavoaha, Gogogogo. Ianapera; Fotadrevo; Maniry; Vohitany); *Эфиопия* (Kibre mengist); *Кения* (Kitui; Mangare); *Малави* (Chimwadzulu); *Мозамбик* (Montepuez; M'sawize; Ruambeze); *Индия* (Mysore, Orissa; Kerala); *Пакистан* (Dir); *Франция* (Brittany; Lozere, French Central massif, Haut-Allier, Peygerolles); *Италия* (Piemont); *Норвегия* (Froland); *Финляндия* (Kittila); *Греция* (Paranesti); *Испания* (Alboran Sea); *Новая Зеландия* (Hokitika); *Россия* (Макар- Рузь).

Подтип II А2 – мраморы и кальциево- силикатные породы *Афганистан* (Jegdalek); *Непал* (Chumar; Ruyil); *Пакистан* (Hunza valley, Batakundi; Nangimali); *Таджикистан* (Turakuloma, Badakhshan); *Мьянма* (Mogok; *Mong Hsu*); *Китай* (Qinghai; Yuan Jiang); *Вьетнам* (Luc Yen, Yen Bai; Quy Chau); *Танзания* (Morogoro, Mahenge); *Кения* (West Pokot); *Канада* (Revelstoke); *Македония* (Prilep); *Швейцария* (Сатро Lungo); *Франция* (Pyrenees); *Россия* (Kyshtym, Ilmen Mountains); *Греция* (Xanthi).

Тип IIВ состоит из двух подтипов: подтип II В1 и подтип II В2.

Подтип II В1 включает в себя плюмазиты и метасоматиты ЮАР (Transvaal); *Зимбабве* (O'Breins); *Кения* (Mangare Area, Aqua; Penny lane, Rockland- John, Saul mine; Hard Rock); *Танзания* (Umbra- Kalanani, Mahenge, Kitwalo and Greyson mines); *Мадагаскар* (Vohibory area, Bekily, Anavoaha, Vohitany, Andilamena); *Россия* (Makar- Ruz, Hitostrov); *Австралия* (Poona, Harts Range); *Франция* (Haut Allier, Chantel); *Гренландия* (Aappaluttoq; Nuuk- Stove, Kangerdluarssuk); *США* (North Carolina, Corundum Hill).

Подтип II В2 – метасоматизированные гнейсы, сланцы, ультрабазит- базиты шир- зон *Мадагаскар* (Sahambano, Zazafotsy; Ionaivo, Ambatomena); *Индия* (Kerala); *Пакистан* (Nangimali formation).

Комплексы II В1 и II В2 подвержены метаморфогенно- метасоматическим процессам условий зеленосланцевой, амфиболитовой или гранулитовой фаций.

Во все времена и всеми народами рубины и сапфиры добывались и в настоящее время извлекаются главным образом из россыпей, образующихся на склонах и в долинах рек при разрушении первичных коренных месторождений и переходе корунда как минерала, чрезвычайно устойчивого к механическому и химическому воздействию, в осадочные речные, реже озерные и морские, песчано- галечные отложения, откуда он легко извлекается простым просеиванием или промыванием, что экономически весьма рентабельно. Именно эта детритовая серия является наиболее важной для добычи рубинов. К этой серии относятся два типа тип IIIА и тип IIIВ.

Тип IIIА представлен россыпными отложениями областей щелочных базальтов и кимберлитов *Австралия* (Lava Plains; Anakie fields, New England fields; Macquarie- Cudgegong, Barrington Tops; Tumbarumba, Western Melbourne fields); *Китай* (Muling); *Таиланд* (Chantaburi- Trat); *Камбоджа* (Pailin); *Мадагаскар* (Ankaratra massif; Vatomandry); *Кения* (Baringo); *Демократическая Республика Конго* (Mbuji- Mayi); *Бразилия* (Sgo Luis).

Тип ШВ составляют россыпи по метаморфическим комплексам *Шри Ланка* (Ratnapura; Elahera, Polonnaruwa); *Мьянма* (Mogok; Mong Hsu); *Мадагаскар* (Ilakaka, Andilamena; Didy; Zahamena); *Вьетнам* (Luc Yen; Yen Bai; Quy Chau); *Танзания* (Tunduru; Songea; Winza; Uмба valley, Morogoro; Mahenge); *Мозамбик* (Montepuez; M'sawize; Ruambeze); *Малави* (Chimwadzulu); *США* (North Carolina- Cowee Creek).

Комплексы ША и ШВ неметаморфизованные.

С учетом материалов предыдущих исследований [Россовский и др, 1992; Hughes, 1997; Hutchinson et al, 2004; Giuliani et al, 2007; Jons et al, 2008; Giuliani et al, 2014; Sutherland et al, 2015; Pignatelli et al, 2019; Keulen et al, 2020; Giuliani et al, 2020; и др.) и собственных данных [Барнов, 2010; Барнов и др., 2015; Барнов и др., 2016; и др.] в диссертации выделяются следующие генотипы месторождений благородных корундов:

1. Магматический

в интрузивных щелочных лампрофирах;

в вулканических щелочных базальтах;

2. Пегматитовый

в сиенитовых пегматитах;

в гранитных десилицированных пегматитах;

3. Скарновый;

4. Постмагматические гидротермальные (собственно метасоматические) (в плюмазитах, слюдитах, плагиоклазитах, генетически связанных с процессами магматизма и метаморфизма;

5. Метаморфогенный

в мраморах и кальцифирах; в кристаллических сланцах и гнейсах; в мигматитах, гранулитах, чарнокитах и кондалитах и других комплексах;

метасоматический (в локальных слюдит-плагиоклазитах, эндоконтактах мафит-ультраафитовых комплексов);

6. Экзогенный

россыпи

в экзогенных элювиально-делювиальных и аллювиальных отложениях.

При генетической систематике месторождений рассматриваемого типа учитывались их геолого-тектоническая позиция, современные представления о минерагеническом аспекте регионального метаморфизма и их приложение к конкретным объектам рубин-сапфировой минерализации. В предлагаемой классификации также все свойства благородных корундов определяются их первичным коренным происхождением. В генетической типизации месторождений благородных корундов, в отличие от международной классификации, предлагается выделить метасоматические месторождения в две самостоятельные группы: 1) собственно метасоматические, обязанные своим происхождением действию постмагматических гидротермальных растворов, и 2) метаморфогенно-метасоматические, генезис которых является логическим завершением в локальных зонах [Барнов и др., 2016]. Выделенные генетические группы месторождений рубина в их геологической позиции более точно определяют особенности структуры, состава и свойств минералов, т.е. типоминералогию [Барнов, Щипцов, в печати]. В исследованиях автора с коллегами [Барнов и др., 2016] выделяется положение о том, что к магматогенной серии относятся месторождения магматического, пегматитового, скарнового, собственно метасоматического (постмагматического) генезиса. В связи с изложенным вводятся понятия моногенетических и полигенетических месторождений (провинции, пояса, регионы). К первым относятся месторождения магматического, пегматитового, скарнового и собственно метасоматического (постмагматического) происхождения, ко вторым – полихронные и полифациальные собственно метаморфические и метаморфогенно-метасоматические месторождения.

Не все генетические типы месторождений рубина и сафира одинаково важны для добычи этих драгоценных камней. Так, благородные корунды пегматитового происхождения имеют очень малое промышленное значение. В незначительных объемах они добывались из образований

данного генетического типа в Индии ( штат Тамил Наду), Бразилии ( штат Гояс), Канаде ( Банкрофт), России ( Мурзинско- Адуйская полоса), но никогда не рассматривались в качестве перспективного источника их поступления на рынок. В связи с этим корундсодержащие пегматиты включены в рассмотрение только с целью общей характеристики мировых рубин- сапфиноносных провинций.

Из плотных коренных базальтов, мраморов, гнейсов можно добыть самоцветы только с применением буровзрывных работ, дробления и других технологических способов, резко удорожающих стоимость добычи, которая становится нерентабельной, а добытое сырье дефектным в результате образования в кристаллах многочисленных техногенных трещин. Поэтому россыпи во всем мире являются важнейшим источником получения рубинов и сапфиров, а их добыча из коренных относительно мягких, по сравнению с другими горными породами, мраморов в ограниченных объемах ведется ручным способом только в Афганистане, Пакистане, Индии, Мьянме и некоторых других странах.

Следует также отметить, что такой устойчивый к внешним воздействиям минерал, как корунд, практически не изменяется в россыпях, за исключением обычно слабого истирания благодаря своей очень высокой твердости. Все свойства благородных корундов определяются их первичным коренным происхождением.

Корунд принадлежит к числу полигенных минералов, распространен довольно широко и встречается среди разнообразных по составу и происхождению горных пород. Как пороодообразующий минерал он наблюдается в некоторых кристаллических сланцах и роговиках высоких ступеней метаморфизма, скарнированных мраморах, вторичных кварцитах, корундовых сиенит- пегматитах и плагиоклазитах ( плюмазитах, кыштымитах, марундитах). В виде единичных проявлений корунд отмечен в перидотитах, щелочных и нефелиновых сиенитах, гранитах, гранитных пегматитах, базальтах, андезитах, трахитах и других магматических породах.

Устойчивый к внешним воздействиям минерал, корунд практически не изменяется в россыпях, за исключением обычно слабого истирания благодаря своей очень высокой твердости. Вследствие этого все свойства благородных корундов определяются их первичным коренным происхождением, а физико-химические особенности рубинов и сапфиров и характеристика их главнейших типов месторождений становятся базисом для понимания роли особенностей генезиса.

Основные классы – это магматический, метаморфогенный и метасоматический [ Барнов, Мельников, 2015]. Магматические месторождения формируются из расплава основной и ультраосновной магмы, обогащенной рудными элементами – Fe, Co, Ni, Ti, Cr и др., возникающей на глубине порядка 100 км от дневной поверхности в слое Земли, именуемом верхняя мантия, при следующих термодинамических параметрах: температура  $\sim 1600$  °C и литостатическое давление  $\sim 10$ – $40$  тыс. атм (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 Поле стабильности анортита, корунда и других минералов при высоких давлениях и температурах [ Hughes, 1997]

Эта магма может внедряться в виде даек или тел сложной формы лампрофирового состава в твердую земную кору или изливаться на поверхность Земли в виде крупных базальтовых лавовых потоков,

испытывающих резкое охлаждение и быстрое застывание. Отмечается оплавление краевых частей зерен корундов. При снижении P-T-параметров фиксируется частичное растворение вплоть до полного уничтожения кристалломорфологических особенностей минерала. Нередко в корундах из базальтов наблюдается регенерация резорбированной поверхности кристалла с образованием полевошпатовой оторочки, защищающей его от дальнейшего растворения при подъеме базальтовой магмы к земной поверхности [Петров, 1980; Hughes, 1997]. Метаморфогенные месторождения возникают в условиях твердой земной коры на глубинах до 20–50 км при последующем сжатии и разогреве любых ранее образовавшихся горных пород в термодинамических условиях амфиболитовой и гранулитовой фаций метаморфизма (температура до 800 °С, литостатическое и тангенциальное давление до 15 тыс. атм) с формированием за счет вещества ранних минералов, становящихся неустойчивыми в изменившихся P-T-параметрах, других поздних минералов, для которых новые P-T-условия являются благоприятными для существования (рис. 2.2).

Минералообразование происходит в твердой среде при относительно стабильном температурном и флюидном режиме, а главное, при пониженных термодинамических параметрах, что способствует росту бездефектных кондиционных кристаллов. Образование при метаморфизме преимущественно красного корунда – рубина связывают с уменьшением его объема при вхождении хрома в структуру минерала [Годовиков, 1983].

Метасоматические месторождения образуются на относительно малых глубинах (до 2–3 км) при температурах 400–600 °С и давлении не более 1–3 тыс. атм. В этих условиях широкое развитие получают процессы аллохимического метасоматоза, десиликации пород и обогащения глиноземом минералообразующих растворов. Зоны метасоматоза развиваются, как правило, на контакте контрастных по составу пород (ультрамафитов и гранитоидов или мраморов и мафитов и т.п.) обменом компонентами между ними, дополнительным привнесением вещества из

глубинных зон Земли и частыми вариациями химического состава циркулирующих по зонам метасоматоза минералообразующих растворов. Все это способствует частым изменениям состава, вариациям структуры и свойств растущих кристаллов.

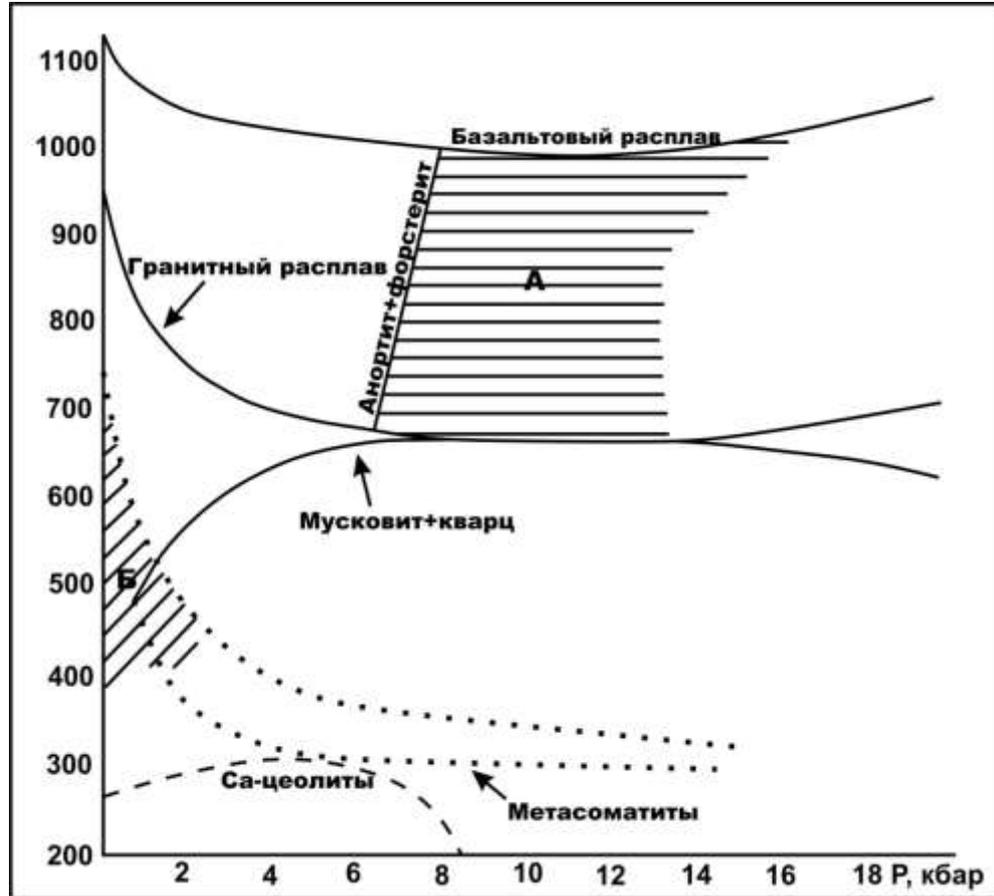


Рисунок 2.2 Термодинамические параметры кристаллизации благородного корунда метаморфического (А) и метасоматического (Б) генезиса [ Добрецов и др., 1970]

Предлагаемые систематизация и обобщение имеющихся материалов и собственных данных по месторождениям благородных корундов мира позволяют констатировать [ Барнов, Мельников, 2015], что, во-первых, генетическая типизация месторождений рубина и сапфира обосновывает разделение на две самостоятельные группы: собственно метасоматические, обязанные своим происхождением действию постмагматических гидротермальных растворов; метаморфогенно- метасоматические, генезис которых является логическим завершением в локальных зонах, как правило, многоэтапных процессов регионального метаморфизма. Установлены

отличия выделенных генетических групп месторождений рубина и сапфира в их геологической позиции, определяющей особенности структуры, состава и свойств минералов. Во-вторых, в связи с изложенным вводятся понятия моногенетических и полигенетических месторождений (в масштабе провинций, поясов, регионов) [ Барнов, Мельников, 2015]. К первым относятся месторождения магматического, пегматитового, скарнового и собственно метасоматического ( пневматолито- гидротермального) происхождения, ко вторым – полихронные и полифациальные собственно метаморфические и метаморфогенно- метасоматические месторождения. Первая группа представлена магматическими месторождениями Восточной Австралии, российского Дальнего Востока, Восточного Китая, Индокитайского полуострова, Нигерии, Колумбии, США ( штат Монтана), пегматитовыми месторождениями Бразилии, метасоматическими месторождениями Кении, Танзании, Малави и др. Вторая группа объединяет однотипные по генезису ( метаморфогенно- метасоматические) месторождения Южной Азии ( Мьянма, Таджикистан, Афганистан, Шри Ланка и другие страны), Восточной Африки ( Мадагаскар, ЮАР), Среднего и Южного Урала, Карело- Кольского региона ( Россия), Восточной Бразилии ( штат Минас- Жерайс и др.), Северной Каролины ( США).

Благородные разновидности корунда формируются в благоприятной обстановке для спокойного роста прозрачных кристаллов, но такие условия в природной среде крайне редки. Например, корунды щелочных основных лампрофиров кристаллизуются из богатых алюминием магм на глубоких ( мантийных) уровнях [ Brownlaw & Komorowsky, 1988]. Рубиноносные мраморы и связанные с ними россыпи рубина распространены на обширной площади Могокского горнорудного района в Северной Мьянме и в нескольких районах Таиланда. Крупнейшие россыпи сапфира развиты на востоке Австралии, в Шри- Ланке, Таиланде и Камбодже, где их коренные источники сапфиросные базальты занимают значительную территорию.

Немногочисленные находки мегакристаллов корунда *in situ* известны только в базальтоидах, прорывающих континентальную кору и приурочены к районам обширного воздымания континентов.

Электронно-микроскопические исследования кристаллов корунда проводились на электронном микроскопе фирмы Carl Zeiss EVO-LS-10, оснащенный энергодисперсионной приставкой Oxford MAX 50. В результате проведенных исследований поверхности кристаллов корунда для ряда образцов были получены качественные спектры ЭДС, а также осуществлено картирование отдельных участков по химическому составу.

## 2.2 Магматический класс

Общим условием корундообразования является протокристаллизация из расплавов в глубинных магматических очагах при условии последующего быстрого застывания основной массы расплава. Характерными корундсодержащими объектами являются корундовые сиениты и сиенит-пегматиты, образующие дайки и жилы среди щелочных сиенитов или гранито-гнейсов и гнейсов вблизи контактов их с массивами щелочных или нефелиновых сиенитов. К ним относятся месторождения Ильменских и Вишневых гор в России, провинций Онтарио и Квебек в Канаде, Мадраса и Кашмира в Индии, острова Шри-Ланка и другие.

За счет избыточного глинозема в магматическом расплаве образуется корунд, а кристаллизация его происходит на большой глубине при условии быстрого подъема магмы на поверхность [Guo et al., 1996]. Особенности геохимического состава мегакристаллов клинопироксена и граната из россыпного месторождения сапфиров Дак Нонг (Вьетнам) и модельные расчеты показали, что они образовались в результате кристаллизации щелочных базальтов в глубинной промежуточной камере (давление 1415 кбар), что близко к границе МОХО (50 км) для этой части Юго-Восточной Азии [Hong-sen et al., 2002]. Избыток глинозема, необходимый для кристаллизации корунда, как правило, фиксируется на контактах гипербазитов с дайками кислых или основных полевошпатовых пород. В

таких условиях большая роль принадлежит метасоматическим процессам, которые развиваются на фоне десилификации алюмосиликатных пород, контактирующих с ультрамафитами, когда происходит образование мелко-, средне- и грубозернистых пород, содержащих корунд. В кыштымитах, например, содержание корунда достигает 90 % (Борзовское месторождение корунда на Урале). Корундсодержащие щелочные лампрофиры кристаллизуются из богатых алюминием магм на глубоких (мантийных) уровнях (месторождения Його-Галч в штате Монтана, США) и кайнозойские оливиновые и фельдшпатоидные щелочные базальты (месторождение Анаки в Австралии, Пайлин в Камбодже, Канбури и др. в Таиланде), в последних отмечаются скопления сапфиров.

### 2.3 Пегматитовый класс

Корунды отмечены в щелочных пегматитах различных районов мира. Прекрасные сапфиры находят в пегматитах Индии, но особенно славятся месторождения хребта Заскар в северо-западных Гималаях, в Кашмире. Сиенитовые пегматиты Шри-Ланка богаты сапфиром синего, васильково-синего, черно-синего цвета. Часто это замечательные звездчатые сапфиры со структурами распада рутила [Gübelin & Koivula, 1986 и др.]. В темноокрашенных сапфирах обильны пластинчатые ламелли распада гематита и изометричные тельца распада магнетита [Hughes, 1996].

Образцы анализировались без специальной подготовки, без напыления в режиме низкого вакуума при ускоряющем напряжении 20 kV. Было получено более 150 фотографий разной ориентации кристаллов. Ниже приводится пример картирования отдельных участков корундов по химическому составу.

Показано, что из реально присутствующих включений отмечаются циркон, апатит, гидроокислы алюминия, рутил, магнетит, слюды, хлорит и кальцит.

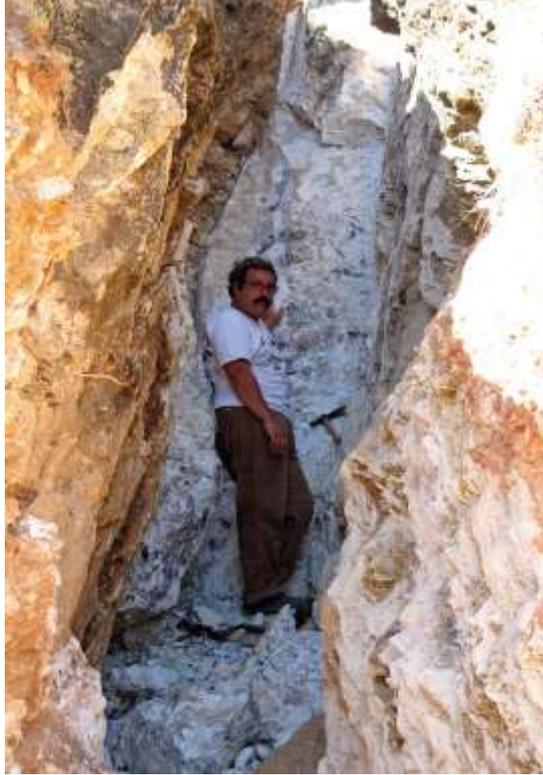
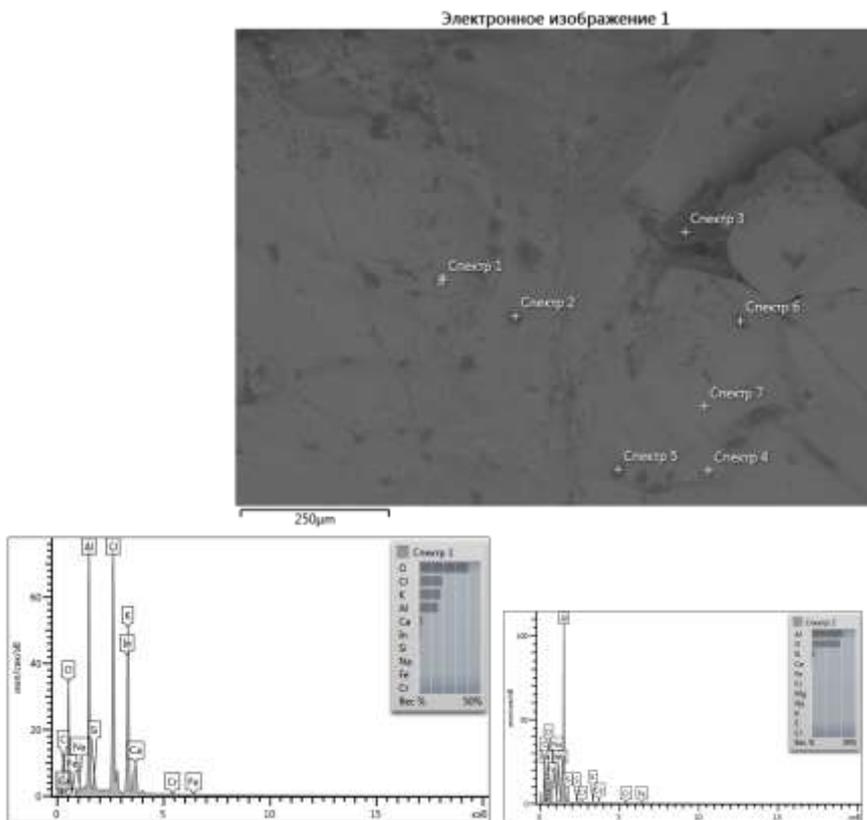


Рисунок 2.3 Пегматитовая жила с корундом в мраморах Ambalamahatsara, Мадагаскар. Photo: Asia Gajowniczek, Springer Minerals



Рисунок 2.4 Сапфир. Вуоннемиокр, Хибинь. Фото: Э.М. Спиридонов



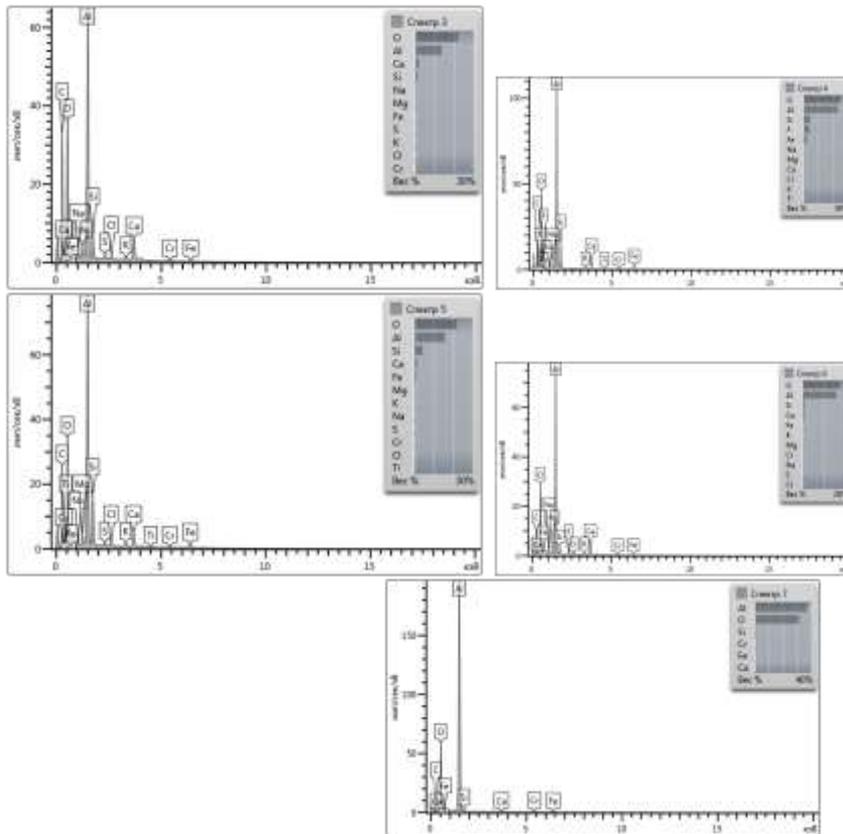


Рисунок 2.5 Спектры составов минеральных включений кристаллов корунда ( обр. 22- корунд, Анцерабе, Мадагаскар)

#### 2.4. Скарновый класс

Сказочные цвета голубиной крови рубины развиты в участках перекристаллизованных кальцифиров со шпинелью хондритом, форстеритом, диопсидом, F- флогопитом, F- тремолитом, F- дравитом, маргаритом, Cr- рутилом в телах глубинных низко щелочных магнезиальных скарнов повышенной фтористости, расположенных рядом с телами лейкогранитов и гранитных пегматитов, Могок ( Мьянма), Чантхабури и Паинтован ( Таиланд), Хунза ( Пакистан), во Вьетнаме, на Ю. Урале [ Киевленко и др., 1982; Gübelin & Koivula, 1986; Coenraads, 1992; Peretti et al., 1996; Hughes, 1997; и др.]. Важное значение имеют сапфиноносные эндоскарны. Ювелирные рубин и сапфир месторождений Могок ( Мьянма) и Чантхабури ( Таиланд) образованы в зонах скарнированных доломитовых мраморов и кальцифирах. Предполагается, что алюмосиликатные эндоскарны с корундом образуются благодаря внедрению

пегматитовых расплавов в доломитизированные мраморы [ Silva, Siriwardena, 1988].

## 2.5 Пневматолито- гидротермальный класс

К пневматолито- гидротермальным месторождениям корунда относятся скопления рубина в каолинизированных плагиоклазитах и флогопитовых грейзенах в серпентинитовых массивах Восточной Танзании (месторождение Умба). Примером может служить рубиновая минерализация массива Рай-Из (Полярный Урал), связанная с плагиоклаз- корундовыми и слюдит корундовыми образованиями среди мелко- и среднезернистых дунитов с линзами метасоматических гигантозернистых дунитов и хромитовых руд. Гидротермальная формация представлена корунд- андалузитовыми штоками во вторичных кварцитах на месторождении Семиз- Бугу в Казахстане, где руды комплексные и служат источником абразивного корунда и андалузита. В России этот класс является источником не ювелирного рубина, а коллекционных образцов рубинсодержащих слюдитов. Вторая гидротермальная формация рассматриваемого класса – корунд- андалузитовая во вторичных кварцитах. Форма рудных тел – линзы и штоки. Руды комплексные и служат источником абразивного корунда и андалузита. Примером служит месторождение Семиз- Бугу в Казахстане (рис. 2.6).

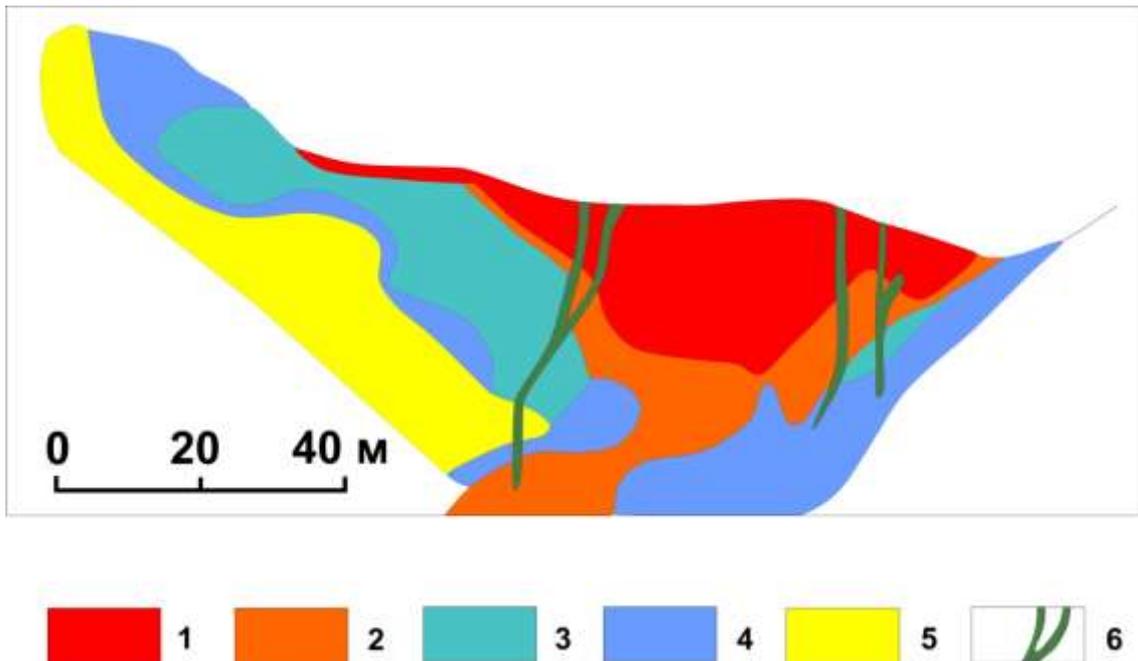


Рисунок 2.6- Геологический разрез по корундовому месторождению Семиз-Бугу ( по К.А. Асташенко)

1 – корундовые породы; 2 – пирит- серицит- андалузит- корундовые породы; 3 – кварц- андалузитовые породы; 4 – андалузит- кварцевые породы; кварц- серицитовые породы; 6 – дайки диабазов

Характерной особенностью рубинов и сапфиров такого генезиса является наличие в них газово- жидких включений, однозначно указывающих на присутствие в минералообразующей среде воды. Температура гомогенизации ( минимально возможная температура кристаллизации) газово- жидких включений в рубине из месторождения Макар- Рузь составила 420 °С.



Рисунок 2.7 – Фото пластинки с флюидными включениями

Размер первичных включений составляет от 5 до 20 мкм. Исследования флюидных включений проводились в секторе минераграфии ИГЕМ РАН.

По фазовому составу при комнатной температуре все включения одинаковые, они содержат две фазы жидкость и газ. Объем газового пузырька не превышает 25 % от объема всего включения. Как было выяснено при криометрии, все включения содержат жидкую и газовую  $\text{CO}_2$ . Количество примесей метана во включениях оценено в 13 %. Давление при кристаллизации корунда ( для предположительного интервала температур от 200 до 700 °С) было оценено в 700-2200 бар.

Преобладающим компонентом минералообразующей системы при кристаллизации корунда была высокоплотная углекислота с небольшим количеством других газов.

## 2.6 Метаморфогенный ( метаморфогенно- метасоматический) класс

Образование корунда обусловлено прогрессивным метаморфизмом высокоглиноземистых осадочных пород. Особенно перспективными в этом отношении представляются кристаллические щиты докембрийских платформ ( Карело- Кольский регион), а также древние метаморфические толщи и офиолитовые пояса складчатых областей ( Алтай, Саяны, Казахстан, Урал, Дальний Восток).

В метаморфогенных комплексах мусковит- силлиманит- корундовые и кианит- корундовые породы в гнейсах и кристаллических сланцах известны в Карелии ( докембрийские высокоглиноземистые плагиогнейсы и амфиболиты Хитостров, Варацкое, Дядина Гора и другие в северной Карелии), Украине, Якутии ( месторождение Чайныт), Индии и других регионах.

К этому классу относятся месторождения и проявления наждака в мраморизованных известняках и мраморах ( Прииртяшские группы) и основных породах ( Сигангойское), а также проявления рубина в докембрийских высокоглиноземистых плагиогнейсах и амфиболитах Фенноскандинавского щита.

На примере метасоматических пород Лапландско- Беломорского пояса глубинных условий объясняется формирование корундсодержащих образований за счет обогащения глиноземом. Е.Н. Терехов предполагает, что это знаменует собой начало эксгумации нижнекоровых образований [ Терехов, 2007].

В метаморфизованных мраморах образуются корунды в результате контактового метасоматоза при прорыве карбонатных толщ магматическими породами основного состава. ( Примером месторождений такого класса служит Кучинское месторождение на Южном Урале.)

Метасоматическое замещение и собирательная перекристаллизация первичных минералов проявляется в рыхлых слюдисто- глинистых породах, например, рубин отмечается в биотит- флогопитовом слюдите, антигорите и гидротальките. Метасоматический процесс нередко развивается на фоне десилификации алюмосиликатных пород, чаще всего гранитоидов, контактирующих с ультрамафитами или магнезиальными мраморами.

### Экзогенная серия

До настоящего времени приоритет остается за месторождениями остаточных древних кор химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород и за известными промышленными месторождениями рубина и сапфира аллювиальных и делювиально-аллювиальных россыпей.



Рисунок 2.8- Месторождение рубина Soamiakarta ( Мадагаскар). (А) Рубины в выветрелых щелочных базальтах ( $\beta$ ) в ассоциации с породами

неопротерозойской метаморфической формации ( nmf) на Мадагаскаре; (B) рубинсодержащая зона выветрелых базальтов мощностью около 20 м, представленная песками. *Фото: Gaston Gialiani and Saholy Rakotosamizanavy*



Рисунок 2.9- Россыпи с рубинами в Мозамбике. А, В – рубинсодержащие россыпи Montepuez, Мозамбик С – Mugloto Pit, действующий рудник Gemfields Group Ltd; D добытые рубины. Фото Vincent Pardieu © GIA

### 2.7. Коры выветривания

Остаточные древние коры химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород имеют промышленное значение. К ним принадлежат каолинизированные в результате древнего химического выветривания сапфиросные тремолититы в магнезиальных мраморах и кальцифирах в штатах Джамму и Кашмир ( Индия), гигантская сапфиросная дайка лампрофиров в штате Монтана ( США).

К остаточным элювиальным месторождениям сапфира и рубина относятся также каолинизированные плагиоклазиты и слюдиты ( флогопитовые грейзены) в серпентинитовых массивах Восточной Танзании. Коренные месторождения благородного корунда, не затронутые процессом

химического выветривания, обычно не разрабатываются, так как из скальных вмещающих пород невозможно без повреждения извлечь качественные кристаллы.

## 2.8 Россыпи

Подавляющее большинство известных промышленных месторождений рубина и сапфира представлено аллювиальными, делювиально-аллювиальными россыпями либо остаточными древними корами химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород, о которых было упомянуто выше, образующих группу элювиальных и элювиально-делювиальных россыпей. К наиболее важным коренным источникам, при разрушении которых создаются крупные россыпные месторождения драгоценного корунда, относятся рубиноносные мраморы и скарны, а также сапфиросные базальты.



Рисунок 2.10 Аллювиальные россыпи сапфиров на юге Мадагаскара

В общем балансе добычи ювелирного корунда основное значение имеют аллювиальные, делювиально-аллювиальные россыпи и элювиальные (рис. 2.10), элювиально-делювиальные остаточные месторождения древнего выветривания. Коренные рубино- и сапфиросные тела, за счет которых

образуются вторичные месторождения, плохо изучены и слабо освещены в геологической литературе. Промышленная значимость выделенных классов определена по длительности эксплуатации месторождений, а также по имеющимся сведениям о качестве и количестве добытого сырья.

Рубиноносные мраморы и связанные с ними россыпи рубина распространены на обширной площади Могокского горнорудного района в Северной Мьянме (рис. 2.11) и в нескольких районах Таиланда. Крупнейшие россыпи сапфира развиты на востоке Австралии, в Таиланде и Камбодже, где их коренные источники сапфироносные базальты занимают значительную территорию.

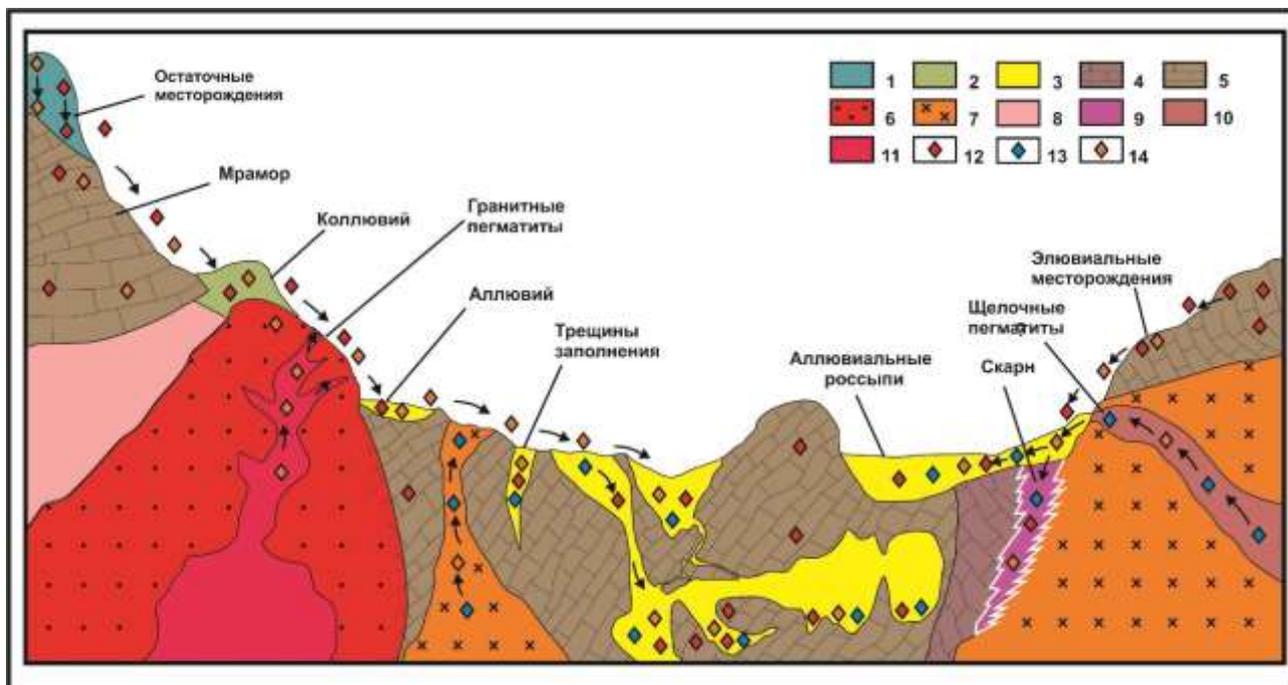


Рисунок 2.11 Основные типы рубинсодержащих россыпей Могокского района, Мьянма. Первичные месторождения рубинов образованы в мраморах, вторичные – остаточные

Важное практическое значение имеют россыпные месторождения, в которых драгоценные камни естественным путем освобождены из крепких вмещающих пород и сконцентрированы в определенных местах в отличие от коренных источников. Некоторые коренные месторождения с рассеянной минерализацией (например, базальты с акцессорным сапфиром) следует вообще рассматривать только как первичные источники россыпей. Лучшие россыпи драгоценных камней связаны с формированием и последующим

размывом древних кор выветривания горных пород. Наиболее распространены остаточные элювиальные, элювиально- делювиальные и делювиально- аллювиальные ( ложковые) россыпи. Мелкие зерна таких устойчивых минералов, как рубин, сапфир, шпинель, гранат, способны к дальнейшему переносу и могут скапливаться в аллювиальных отложениях ( рис. 2.11).

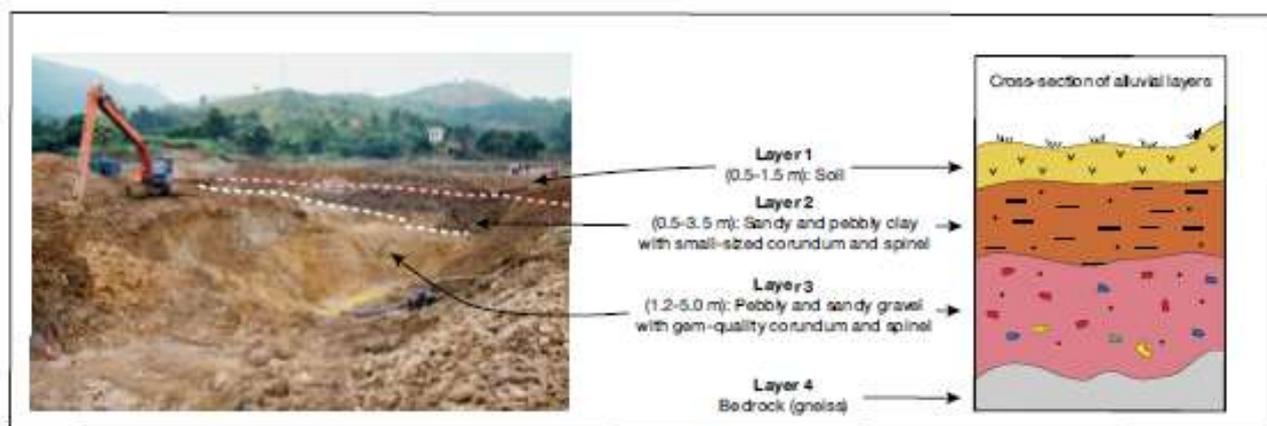


Рисунок 2.12 Аллювиальные осадки Tan Huong– Truc Lau из почвы, песка, гравия, содержащие корунд [ Khoi et al, 2011]

Примечание: слой 1 (мощность 0.5–1.5 м): почва, слой 2 (0.5–3.5 м): песчаные и галечные глины с небольшими зернами корунда и шпинели; слой 3 (1.2–5.0 м) – галечный и гравийный с качественными самоцветами, содержащими корунд и шпинель; слой 4 (коренные породы (гнейс)).

Слой аллювиальных россыпей сапфира со скарнами, развитыми на контакте тел сиенитов с кальцит- доломитовыми мраморами, установлен в Шри- Ланке.

За счет метаморфогенных источников, например, образовалась флювиогляциальная россыпь рубина и сапфира в Финляндии ( Лапландия).

Выводы по главе 2.

*Важным условием корундообразования является протокристаллизация из расплавов в глубинных магматических очагах при условии последующего быстрого застывания основной массы расплава. В этом отношении большую роль играют ультраосновные породы, представленные формацией ультраосновных- щелочных пород и карбонатитов и связанных с ними*

*пневматолито- гидротермальных образований. Наиболее характерным признаком магматического происхождения корундов является оплавленность их кристаллов. Значение имеют ювелирные рубин и сапфир месторождений Могок ( Мьянма) и Чантхабур ( Таиланд), образованные в зонах скарнированных доломитовых мраморов и кальцифирах.*

*До настоящего времени приоритет остается за месторождениями остаточных древних кор химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород и за известными промышленными месторождениями рубина и сапфира аллювиальных и делювиально-аллювиальных россыпей. Вместе с тем становятся перспективными и актуальными многоплановые исследования коренных источников благородного рубина, что подчеркивается в данной работе.*

*Показана четкая генетическая детерминированность химизма, физических свойств и парагенетических минеральных ассоциаций благородных корундов различного генезиса.*

## ГЛАВА 3. Минерагения благородных корундов

### 3.1 Провинции, пояса, рудные районы

Рубиновая и сапфировая минерализации обнаружены на всех континентах, кроме Антарктиды, вероятно, по причине ее слабой геологической изученности из-за мощной толщи покровных ледников. Рубины и сапфиры зафиксированы в 50 странах, но большинство находок имеет лишь историческое или минералогическое значение. Поэтому, когда речь идет о промышленных скоплениях благородных корундов, то перечень стран и регионов сокращается обычно в 4–5 раз.

Существенный вклад в развитие металлогенических понятий и терминов внесли Е.Т. Шаталов, академики В.И. Смирнов, Д.В. Рундквист и ряд других исследователей. В качестве наиболее крупных металлогенических объектов были выделены пояса и провинции [Российский металлогенический словарь, 2003]. Минерагеническая провинция – это рудоносная площадь размером в сотни тысяч–миллионы квадратных километров (рис. 3.1), охватывающая крупный блок земной коры и близкая по форме к изометричной, а металлогенический пояс представляет собой рудоносную площадь обычно линейного развития (до 10 000 км в длину при ширине в сотни км) (рис. 3.2), отличающаяся отчетливой линейной ориентировкой. В геологическом отношении условия образования месторождений соответствуют надпорядковым геологическим структурам – платформам и складчатым поясам или занимают значительную их часть, по площади составляющую сотни тысяч–первые миллионы квадратных километров.

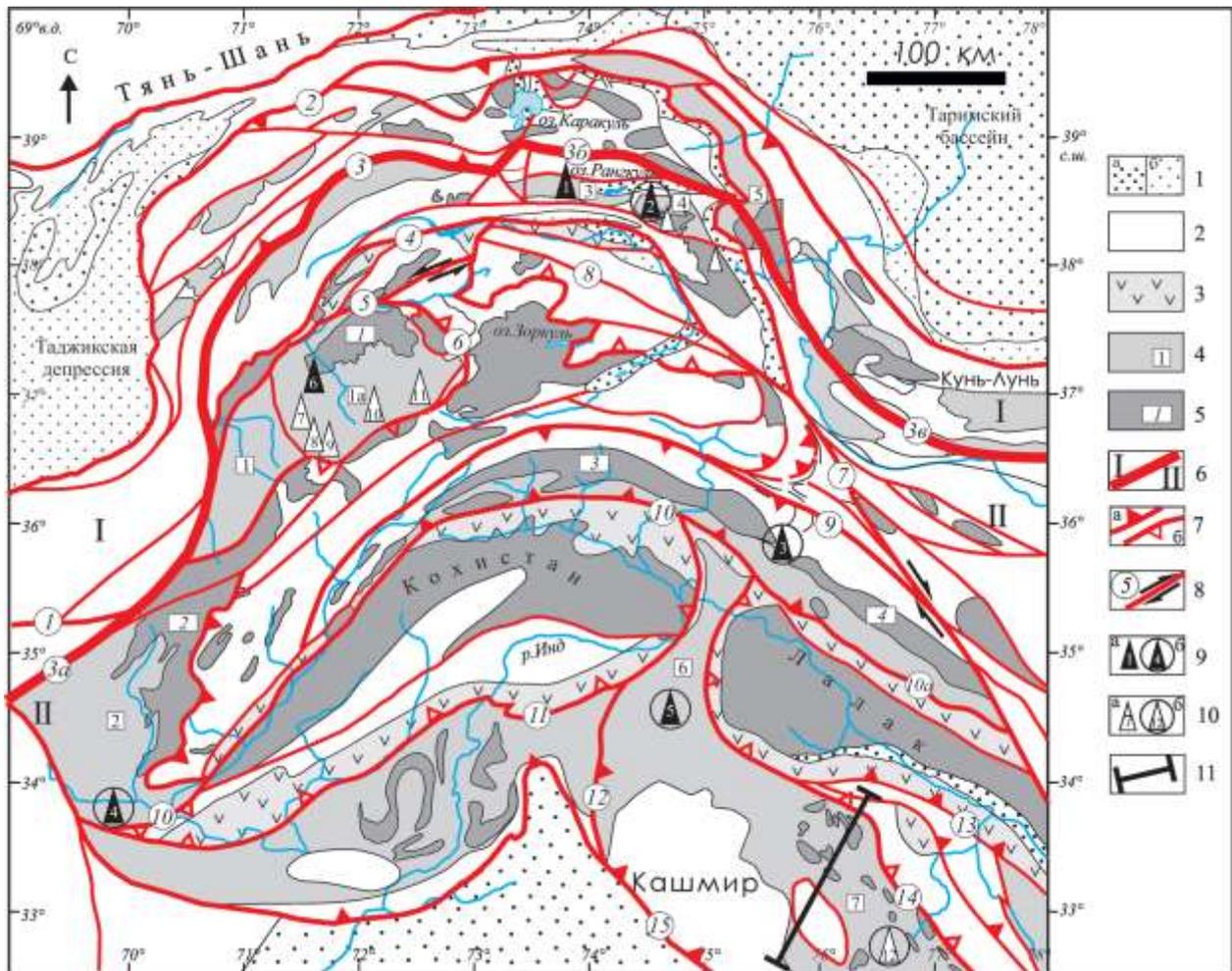


Рисунок 3.1 Положение корундов минерализации в структуре Высокой Азии [ Терехов, более Акимов, 2013].

Условные обозначения: 1 – неоген-четвертичные (а) и неогеновые (б) отложения предгорных и межгорных прогибов; 2 – палеозой-мезозойские отложения; 3 – офиолиты; 4 – кристаллические породы и названия выступов глубинных пород: 1 – Бадахшанский, 1а – Юго-Западный Памир, 2 – Нуристанский, 3 – Джаланский, 4 – Шатпутский, 5 – Кунгур-Мустаата, 6 – Нанга-Парбат, 7 – Высокие Гималаи (хр. Занскар); 5 – гранитоиды (мел-неоген), массивы: 1 – Хорогский, 2 – Лагман, 3 – Каракорумский, 4 – Балторо; 6 – граница геоструктурных зон герцинского (I) и киммерийско-альпийского (II) поясов; 7а – разломы: 7а надвиги, 7б сбросы, 8 – сдвиги и названия разломов (цифры в кружках): 1 – Андарабский, 2 – Дарвазский, 3 – Ванчский, 3а – Гератский, 3б – Акбайталский, 4 – Рушанско-Пшартский, 5 – Гунтский, 6 – Мац-Кокбайский, 7 – Каракорумский сдвиг, 8 – Карасу, 9 – Чиртал (Верх. Хунза), 10 – Каракорум-Кохистанская сутура (Главный Каракорумский разлом), 10а – Драсс, 11 – Индская сутура, 12 – Рупал, 13 – Верхнеиндская сутура, 14 – Занскар (Южно-Тибетский detachment), 15 – Главный пограничный разлом; 9 – проявления (а) и месторождения (б) рубина и их названия: 1 – Сасыкский и 2 – Кукуртский камнесамоцветные узлы (Восточный Памир), 3 – Хунза (Каракорум), 4 – Джигдаллек (Нуристан), 5 – Нангимали (Нанга-Парбат), 6 – Зирпарчов и Дальнее (ЮЗ Памир); 10 – проявления (а) и месторождения сапфира (б) и их названия: 7 – Стаж и Авдж, 8 – Яхшволь и Сумджин, 9 – Ишкашим, 10 – Ямчун, 11 – Лянгар (все ЮЗ Памир), 12 – Сумджам (Кашмир); 11 – линия разреза.

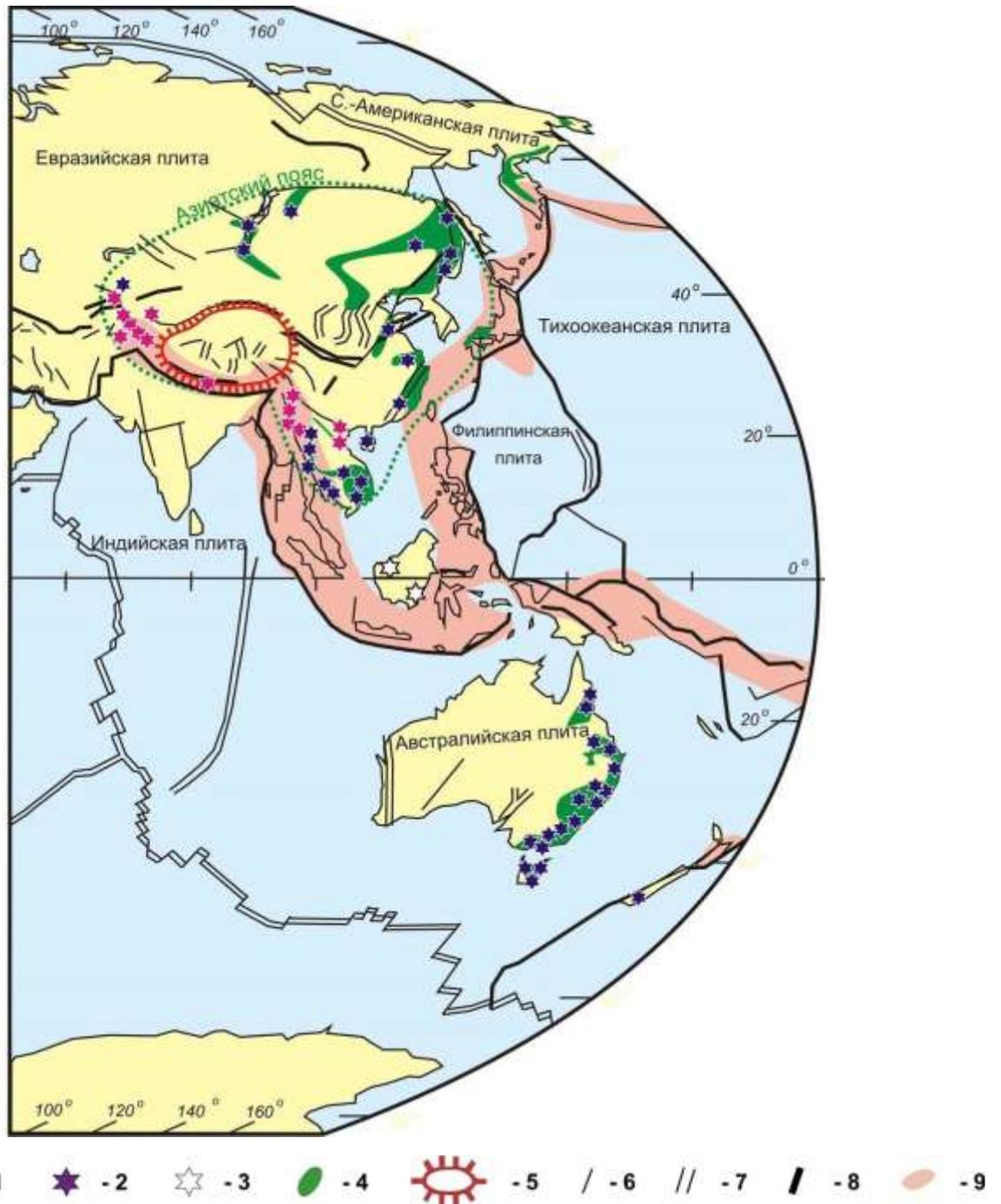


Рисунок 3.2 Схема размещения месторождений и проявлений рубина и сапфира в Тихоокеанском поясе и на Австралийской плите [Высоцкий и др., 2003]

Условные обозначения: 1 – метаморфогенные рубины и сапфиры; 2 – магматогенные сапфиры и рубины; 3 – рубины и сапфиры неясного генезиса; 4 – кайнозойские внутриплитные вулканисты; 5 – область современного орогенеза мощностью коры более 50 км; 6 – сдвиги; 7 – рифты; 8 – надвиги; 9 – глобальная геотермальная провинция

Следующими нижестоящими в таксономической иерархии выступают обычно металлогенические (минерагенические) районы (изометричные

объекты) и зоны (линейно вытянутые объекты), как правило, имеющие площадь от первых тысяч до десятков тысяч квадратных километров. Их геологические эквиваленты – структуры первого порядка. Промежуточные между провинциями и районами по площади и по значению – субпровинции и области – являются дискуссионными, не всегда выделяются, охватывают территорию ряда структур первого порядка или площадь развития одновозрастного и однотипного магматизма или метаморфизма, исчисляемую десятками тысяч– первыми сотнями тысяч квадратных километров.

На основе изложенных принципов выделены следующие благороднокорундовые минерагенические единицы (с востока на запад):

*Провинции с сапфир-рубиновой минерализацией:*

- Индокитайская (Китай, Вьетнам, Лаос, Камбоджа, Таиланд);
- Южно-Азиатская (Мьянма, Индия, Шри-Ланка, Непал, Пакистан, Афганистан, Таджикистан);
- Карело-Кольская (Россия);

*Пояса локализации благородных корундов:*

- Восточно-Австралийский (Австралия);
- Дальневосточный (Россия);
- Восточно-Китайский (Китай);
- Уральский (Россия);
- Восточно-Африканский (Танзания, Кения, Малави, Зимбабве, Конго, Руанда, Замбия, ЮАР, Мозамбик, Мадагаскар);
- Восточно-Бразильский (Бразилия);
- Гренландский юго-западный рубиноносный пояс.

*Районы распространения благородных корундов:*

- Нигейрийский (Нигерия);
- Колумбийский (Колумбия);
- Западно-Американский (США);
- Северо-Американский (США, штат Северная Каролина и Монтана);

### 3.1.1 Индокитайская рубин-сапфиросная провинция

Индокитайская рубин-сапфиросная провинция (Китай, Вьетнам, Лаос, Камбоджа, Таиланд) занимает восточную часть Индокитайского полуострова, располагаясь в областях верхнепалеозойской и мезозойской складчатости, подвергшейся тектономагматической активизации мезокайнозойского возраста. Представлена месторождениями магматического сапфира Бо Флой в районе Канчанабури и Бо Рай, Бо Ван в районе Чантхабури Трат Таиланда, Пайлин, Бо Кео в соседней Камбодже, Бан Хай Сай и Хуэсай в Лаосе, Пенглай на о. Хайнань и Юань Джанг в провинции Юннань в Китае и месторождениями метаморфогенного рубина Лук Ен во Вьетнаме и в провинции Кинг Хай Китая, локализующимися в скарнированных мраморах. Корундоносные районы расположены в краевой части Индосинийского докембрийского срединного массива и примыкающей к нему Бирмано-Малайской складчатой области [Киевленко, 2001; Giuliani et al, 2020]. Коренные источники сапфиров провинции – кайнозойские щелочные базальты, а рубинов – скарнированные известняки нижнего кембрия. Добыча благородных корундов ведется из четвертичных аллювиальных и элювиальных россыпей. Сапфиры в основном темно-синие, реже голубые, зеленые и желтые, а рубины – красные со слабой «игрой» камня, иногда встречаются индивиды высокого качества пурпурно-красного цвета. Примерно 70% современной мировой добычи рубинов производится на месторождениях Бо-Рай и Бо-Ваен в Таиланде.

### 3.1.2 Южно-Азиатская сапфир-рубиноносная провинция

Южно-Азиатская сапфир-рубиноносная провинция (Мьянма, Индия, Шри-Ланка, Непал, Пакистан, Афганистан, Таджикистан) является самой известной в мире благодаря обилию самоцветов, в том числе и благородных корундов на территории Индии, Шри-Ланки и Мьянмы, откуда они поступали на мировой рынок в течение последних 2–3 тысячелетий, а также из-за высочайшего, эталонного качества сапфиров индийского Кашмира и

рубинов Мьянмы. Она охватывает обширную площадь (450 тыс. км<sup>2</sup>) на юге евразийского материка и располагается в области альпийской позднемезозойско-кайнозойской складчатости и активизированных в нижнем палеозое и в более позднее время частях древних платформ – Индостанской и Памирского срединного массива. Для рассматриваемой провинции характерны следующие особенности: широкое проявление рубин-сапфировой минерализации на значительной площади, включающей 7 южно-азиатских стран; древний протерозойский (установленный или предположительный) возраст субстрата коренной минерализации благородных корундов, представленный мраморами, гнейсами, кондалитами, чарнокитами, кристаллическими сланцами со ставролитом, кианитом, родонитом, цоизитом, свидетельствующими не только о высоких (750–1000 °С) температурах, но и повышенных (7–12 кбар) давлениях минералообразования. Для рубинов и сапфиров Шри-Ланки допускается архейский возраст в формировании прозрачных, ярко окрашенных кристаллов корундов, не только широко проявленные процессы высокотемпературного метаморфизма гранулитовой и амфиболитовой фаций, но и сопровождающие метаморфизм, генетически тесно связанные с ним, явления регионального метасоматоза скарнового, грейзенового и иного типа, также распространенные на значительных площадях в зонах и ореолах локализации тектонических напряжений. В связи с этим целесообразно понимать и именовать подобные рубин-сапфиросные провинции полигенетическими метасоматически-метаморфогенными, в отличие от типичных магматических и локальных метасоматических месторождений, объединяющихся в моногенетические провинции. В отличие от других благородно-корундовых провинций месторождения Южно-Азиатской провинции часто не сопровождаются связанными с ними россыпями [Giuliani et al, 2020]. И рубины, и сапфиры добываются непосредственно из коренных пород (мраморов кристаллических сланцев, гнейсов и слюдит-плагиоклазитов) – Таджикистан, Афганистан, Пакистан, Непал. В Индии

эксплуатируются коренные и россыпные объекты, а в Мьянме и Шри-Ланке – главным образом россыпи. Особенности окраски рубинов и сапфиров данной провинции показали Е.П. Мельников, А.В. Васильев, М.А. Викторов [Мельников и др., 2002]. Здесь только подчеркнем отмечаемое многими исследователями сходство в окраске и других свойствах сапфиров Мьянмы (район Могок) и Шри-Ланки, а также наличие пурпурно-красных рубинов (типа «голубиная кровь») и рубинов с фиолетово-синим оттенком или участками и зонами такой окраски на месторождениях Таджикистана, Афганистана, Непала и Мьянмы.

### 3.1.3 Карело-Кольская сапфир-рубиноносная провинция

Карело-Кольская сапфир-рубиноносная провинция (Россия) находится в области докембрийской складчатости Феноскандинавского щита. В пределах провинции развиты два генетических типа благородных корундов: сапфировый в нефелиновых (миаскитовых) и безнефелиновых сиенит-пегматитах Кольского полуострова (ущелья Ферсмана и Рисчорра, Цирконовая перемычка, Лопарский перевал и др.) и рубиновый – в глубоко метаморфизованных гнейсах и амфиболитах беломорской серии неоархея Карелии (месторождение Хитостров, проявления Дядина гора, Варацкое и др.). В миаскитовых пегматитах большинство корундов непрозрачны, редко встречаются синие и голубые кристаллы, просвечивающие и прозрачные; в сиенитовых пегматитах обнаруживаются неоднородно окрашенные сапфиры от густо-синего до фиолетового и розово-серого цветов (по материалам Ю.О. Липовского и Л.Ф. Булавко, 1981–1982). Перспективы получения благородно-корундовой минерализации из пегматитовых объектов Хибин весьма ограничены.

Среди коренных объектов метаморфогенного происхождения, возникших в результате интенсивного проявления процессов мигматизации и базификации [Терехов, Левицкий, 1991], наиболее известным и перспективным является месторождение Хитостров в 10 км северо-

восточнее пос. Чупа. Кристаллы корунда сосредоточены здесь в ставролит-биотит-гранат-амфиболовой породе на тектоническом контакте между кианит-гранат-биотитовыми гнейсами и гранатовыми амфиболитами. Цвет их серовато-розовый, бледно-розовый, малиновый, основная масса кристаллов длиной 1–5 см и в поперечнике до 3 см непрозрачна, некоторые из них просвечивающие. Корунды рассматриваются как коллекционное сырье.

### 3.1.4 Восточно-Австралийский преимущественно сапфиноносный пояс

Восточно-Австралийский преимущественно сапфиноносный пояс (Австралия) связан с крупной вулканической структурой мезозойско-кайнозойского возраста, протягивающейся с севера на юг на 4 тыс. км. По данным Г. Брауна [Браун, 2002] к наиболее важным действующим объектам добычи относятся месторождение Субера в районе Анаки штата Квинсленд, где добывается синий, зональный с сочетанием желтого цвета с зеленым или синим и в меньших количествах желтый и оранжевый сапфир, а также месторождение Кингс-Плейнс в штате Новый Южный Уэльс, где добываются в основном темно-синие и зеленые сапфиры. На Сиднейском побережье к северу от Нью-Касла разрабатываются аллювиальные россыпи, содержащие метаморфический рубин красного и пурпурного цветов и вулканический сапфир синего и зеленого цветов. Таким образом, основная масса благородных корундов Восточно-Австралийского пояса представлена сапфирами магматического происхождения и меньшая часть – рубинами метаморфического генезиса. Возраст коренных источников благородных корундов – щелочных базальтов и кварцито-песчаников – палеоген-неогеновой. Песчано-гравийные аллювиальные отложения и элювиальные коры выветривания базальтов и песчаников, откуда и ведется добыча сапфиров и рубинов неоген-четвертичного возраста. Австралия занимает первое место в мире по добыче сапфира, поставляя на мировой рынок более 70% данной разновидности благородного корунда.

### 3.1.5 Дальневосточный сапфиноносный пояс

Дальневосточный сапфиноносный пояс (Россия) расположен на востоке Российской Федерации и включает три сапфиноносные зоны: Приморскую, Камчатскую и Охотско-Чукотскую. Приморская и Охотско-Чукотская зоны приурочены к области мезозойской складчатости, а Камчатская – к кайнозойской. По данным К.К. Атабаева, А.Я. Зюзина и Р.В. Коваленко, в данном поясе известно более 30 проявлений благородно-корундовой минерализации, из которых 20 находятся в Приморской, 7 – в Охотско-Чукотской и 3 – в Камчатской зонах. В пределах Дальневосточного пояса выявлены все основные генетические типы сапфиров – магматический (Вострицовское, Мареевское, Олонское и другие проявления в Приморской зоне, Эрчинское – в Охотско-Чукотской зоне), метасоматический (Канхойское, Петровское, Первомайское проявления в Приморской зоне, Гыленвеемское в Камчатской, Корундовое и другие – в Охотско-Чукотской зоне) и метаморфический (проявления Кольское и Вершинка на Камчатке). Что касается наиболее изученного и перспективного проявления сапфиров Незаметное в Красноармейском районе Приморского края, то его генезис является дискуссионным. Одни исследователи [Ананьева и др., 1998] связывают формирование сапфиров с щелочными базальтами, а в последние годы высказывается точка зрения о их пегматитовом и метасоматическом происхождении на основании изучения состава минеральных включений в сапфирах [Одариченко и др., 2004]. Часто окраска носит зональный или пятнистый характер. Весьма характерны для сапфиров эффект астеризма и «шелковистость», вызванные наличием игольчатых включений рутила. Геологический возраст коренной сапфировой минерализации неогеновый (плиоценовый), а россыпной аллювиальной и техногенной – плейстоценовый и современный. На объектах Дальневосточного пояса ведется лишь эпизодическая добыча сапфира попутно с промывкой золота мелкими старательными артелями.

### 3.1.6 Восточно-Китайский сапфиросный пояс

Восточно- Китайский сапфиросный пояс ( Китай) охватывает восточную часть Китайско- Корейской платформы и протягивается в пределах нижнепалеозойской складчатости, активизированной в мезо- кайнозойе. Коренными источниками сапфиров служат кайнозойские щелочные базальты [ Киевленко, 2001], за счет которых сформировались современные аллювиальные россыпи ( Мингкси в провинции Фуцзянь, Чангли в провинции Шаньдун и др.). Сапфиры желтого, зеленого и синего цветов встречаются совместно с оливином, пироксенами, цирконом, пиропом и черной шпинелью и очень похожи на австралийские. Роль рассматриваемого пояса в добыче сапфиров различной окраски невелика.

### 3.1.7 Уральский сапфир-рубиноносный пояс

Уральский сапфир- рубиноносный пояс ( Россия) занимает крайнее западное положение в обширной области верхнепалеозойской складчатости, разделяющей Русскую ( Восточно- Европейскую) и Сибирскую платформы, и размещается в пределах Уральской складчатой структуры, граничащей с восточным краем Русской. Сапфировая и рубиновая минерализации зафиксированы в гипербазитовом массиве Рай- Из на Полярном Урале, Мурзинско- Адуйском и Сысертском гнейсо- мигматитовых комплексах Среднего Урала, Ильменогорском, Кочкарском и Джабык- Карагайском комплексах Южного Урала. Общая протяженность благородно- корундовой минерализации на Урале составляет порядка 1500 км с севера на юг. Аллохтонный дунит- гарцбургитовый массив расположен севернее Полярного круга, имеет серповидные очертания, со всех сторон ограничен разломами, имеет площадь около 380 км<sup>2</sup> [ Дергунов и др., 1975] и фиксирует структурную зону Главного Уральского глубинного разлома. По данным В.А. Душина, В.И. Кузнецова и других исследователей, проявления и мелкие месторождения рубина и сапфира сосредоточены в южной и юго- западной частях массива Рай- Из и связаны с широко распространенными

здесь жилами актинолит- флогопит- плагиоклазитовых метасоматитов. Наиболее известные из них – месторождение Рубиновое, проявления – Енгаю-I, II, III, Сапфировое, Западное, Кузь- Ты и др., территориально ассоциирующиеся с участками развития хромитовой минерализации в ультраосновном массиве. На наиболее изученном месторождении окраска коллекционного корунда интенсивная темно- вишневая разных оттенков, малиново- розовая, розовая. Бездефектные участки кристаллов не превышают 5 мм в поперечнике, обладают блочной отдельностью по пинакоиду, в связи с чем их использование для огранки ограничено, но в то же время они представляют великолепный коллекционный и музейный материал, находящийся во многих известных хранилищах мира. Ярко окрашенные кристаллы корунда локализуются обычно во флогопитовой и флогопит- плагиоклазитовой зонах метасоматической колонки и содержат многочисленные минеральные включения хромшпинелидов, плагиоклазов и слюды. Корунды с середины 1960-х годов и до настоящего времени практически бесконтрольно добываются из коренной жилы метасоматитов, элювиально- делювиальных развалов вблизи нее и из пролювиального конуса выноса руч. Рубиновый в р. Макара- Рузь. В 1995 г. начата промышленная отработка хромитового месторождения Центральное, в контур освоения которого попадает и месторождение красного корунда Рубиновое. Упомянутые авторы сообщают также, что по неофициальным данным, за период 1975–1995 гг. любителями камня добыто на месторождении свыше 500 кг красного корунда. Имеются устные сведения о находках в отложениях конуса выноса ювелирных корундов, кристаллы имеют бочонковидный и таблитчатый облик, размеры по длинной оси до 10, а в поперечнике до 3 см. и высокого качества, массой 120 карат (1989) и порядка 80 карат (1992). Наиболее вероятный возраст коренной минерализации – верхнепалеозойский. Добыча сырья производится из коренных образований и сопровождающих их делювиально- пролювиальных отложений. На Среднем Урале рубины и сапфиры эпизодически добывались

старателями начиная с XVIII в. по протокам рек Нейва и Реж в западной части Мурзинско- Адуйского гнейсо- мигматитового комплекса в логах Вербанный, Положиха, Черемшанка, Кузнечный и Корнилов. Коренными источниками россыпей служила акцессорная корундовая минерализация в верхнепалеозойских мраморах и слюдит- плагиоклазитах. Практическое же значение имели концентрации рубинов и сапфиров в верхнеплейстоценовых террасовых и голоценовых пойменных отложениях речных долин и временных водотоков (логов).

В россыпях содержится корунд в виде изометричных зерен рубина и уплощенных кристаллов удлиненной формы синего, фиолетового, голубого и бесцветного сапфира размером от 2 до 10 мм [ Киевленко, 2001]. Встречаются зональные разности. К настоящему времени все эти россыпи отработаны.

В южной части Среднего Урала ( Вишневые горы Сысертского комплекса) и на севере Южного Урала ( Ильменские горы) в первой половине XIX в. были обнаружены сапфиры в щелочных ( сиенитовых и миаскитовых) пегматитах. В основном корунд непрозрачный, серого или голубовато- серого цветов. Прозрачные индивиды, пригодные для огранки и кабошонирования, встречаются редко. Такие кристаллы имеют голубую, синюю, иногда желтую, зеленую и розовую окраски. Обычные размеры кристаллов 1–3 см. Самые крупные достигали в длину 20 см. Уральские корунды пегматитового происхождения не имеют промышленного значения.

На Южном Урале рубиновая минерализация наиболее детально изучена А.Ю. Кисиным [ Кисин, 1991; Kisin, 1994] в палеозойском Кочкарском метаморфическом комплексе на Кучинском и Чуксинском участках и связана со скарнированными перекристаллизованными мраморами метаморфического ( кальцитовые и магнезиально- кальцитовые) и метасоматического ( доломит- кальцитовые) происхождения. Практический интерес представляют россыпи корундов, образовавшиеся за счет разрушения мраморов и концентрации рубинов в песчано- глинистых

отложениях верхнего олигоцена и нижнего миоцена. Главная Кучинская россыпь пролювиально-аллювиального типа приурочена к неогеновому логу и протягивается на 2,5 км при ширине 200 м. Цвет корундов красный, розовый, изредка отмечаются голубые сапфиры [Киевленко, 2001]. Охарактеризованные объекты требуют дальнейшего изучения.

### 3.1.8 Восточно-Африканский сапфир-рубиноносный пояс

Восточно-Африканский рубин-сапфиноносный пояс (Танзания, Кения, Малави, Зимбабве, Конго-Киншаса, Руанда, Замбия, ЮАР, Мозамбик, Мадагаскар), [Saul, 2015; Guilianì et al, 2020] расположен в крайней восточной интенсивно активизированной части Аравийско-Африканской платформы в зоне глубинных разломов и рифтов, структурно приурочен к докембрийской области складчатости Мозамбикского пояса от Кении на севере до ЮАР и о. Мадагаскар на юге. Общая протяженность пояса порядка 25 тыс. км<sup>2</sup>. Он имеет гетерогенное строение, включающее стабильные изометричные глубоко метаморфизованные блоки (гнейсо-мигматитовые купола) и узкие подвижные слабометаморфизованные зоны. С первыми связаны, например, рубины в мраморах на северо-востоке ЮАР и сапфиры на юге о. Мадагаскар, тогда как большинство других месторождений локализованы в основных и ультраосновных телах метасоматитов на границе химически разнородных пород, или их генезис не установлен. Возможно, что в пределах пояса имеются и магматические (базальтовые) месторождения рубинов и сапфиров. Возраст коренной минерализации благородных корундов докембрийский (в основном протерозойский). Добыча рубинов и сапфиров ведется из коренных метасоматических жил (плюмазитов в Танзании, Кении – месторождения Умба, Матомбо, Тундуру, Багамойо, Мангари и др.; эпидот-амфиболовых метасоматитов в Малави – месторождение Чим-бадзулу; из россыпей – месторождения Циангугу в Руанде; Сумболе в Замбии, Эджеда, Гогогого, Бекили на Мадагаскаре и др.) (рис. 3.3.).

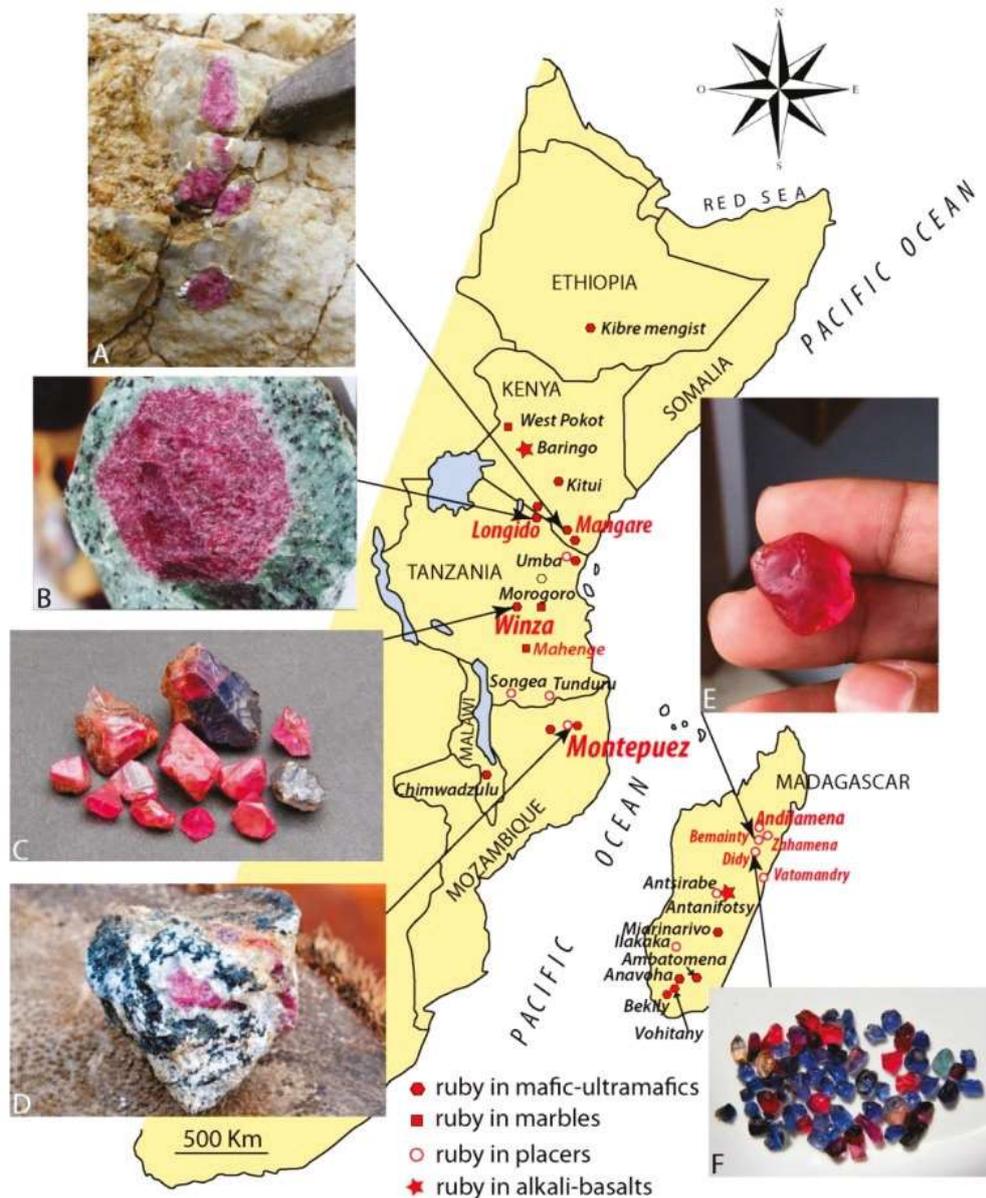


Рисунок 3.3 Главные месторождения Восточно- Африканского рубин-сапфиросного пояса [ Gaston et al, 2020]

А – десилицированный пегматит в ультрамафических породах Rockland (ex-John Saul) на руднике Мангаре. Фото: Gaston Giuliani; В – рубин гексагональной призмы из Longido, Танзания. Фото: Gaston Giuliani; С – рубины и два цветных сапфира, месторождение Winza (Танзания), залегают в метаморфизованном лейкогаббро и амфиболите. Фото: Vincent Pardieu; D – рубин (5 см длиной) в метасоматизированном амфиболите M'sawize. Фото: Vincent Pardieu © GIA; Е – розовый корунд (1 см в поперечнике) из россыпи Bemainty (Мадагаскар). Фото: Vincent Pardieu © GIA; (F) рубин и сапфиры из россыпи Didy (Мадагаскар). Фото: Vincent Pardieu.

Примечание: красный круг рубин в мафитах- ультрамафитах; красный квадрат – рубин в мраморе; светлый круг – рубин в россыпях; красная звездочка – рубин в щелочных базальтах (рис.3.3.)

Для метасоматических месторождений Танзании, Кении, Малави, Зимбабве и других объектов Восточно- Африканского пояса чрезвычайно

типична зональность и пестрота окраски рубинов и сапфиров, получивших даже специальный торговый термин – «пестроцветный сапфир–Танзания». Метаморфогенные сапфиры Мадагаскара усеченно-пирамидальной формы напоминают по морфологическим особенностям кристаллы сапфира из месторождений индийского Кашмира, а аналогичного происхождения рубины из мраморов месторождения Машишимала в ЮАР близки к рубинам из метаморфических пород Афганистана, Таджикистана, Мьянмы и других стран Южно-Азиатской корундовой провинции.

### 3.1.9 Восточно-Бразильский рубин-сапфиросный пояс

Восточно-Бразильский рубин-сапфиросный пояс (Бразилия) протягивается почти на 3 тыс. км вдоль атлантического побережья Бразилии (штаты Баия, Минас-Жерайс, Гояс, Мату-Гросу-де-Сул) [Principais depositos..., 1991]. Геологически пояс приурочен в основном к архейскому Восточно-Бразильскому щиту, отделенному от Западно-Бразильского щита, где находятся только месторождения штата Мату-Гросу, серией региональных прогибов. Восточно-Бразильский щит интенсивно преобразован в процессе вендской (600–500 млн лет) тектономагмато-метаморфической активизации на рубеже протерозоя и фанерозоя. В результате породы глубоко метаморфизованы, рекристаллизованы, насыщены интрузивно-реоморфическими гранитами, щелочными и гранитными пегматитами, кварцевыми, полевошпатовыми и карбонатными жильными образованиями.

В Бразилии месторождения и проявления рубинов известны на реке Парагуачу (аллювиальные россыпи Витория де Конкуиста), а коренная минерализация – в метаморфических породах района Камним Гроссо штата Баия, в щелочных пегматитах Пеиксе штата Гояс и в метаморфических толщах Гуанхейес и Багуари штата Минас-Жерайс. Сапфиры встречаются на россыпных месторождениях Джауру Каксино, Фого, Индиана, Грик и других в штате Минас-Жерайс, на месторождениях Малакахета и

Диамантина в штате Мату Гросу, в щелочных пегматитах Пеиксе в штате Гояс и Ладжес в штате Санта Катарина. Окраска рубинов красная, розовая, сапфиров – светло-голубая, реже синяя, серовато-синяя. Таким образом, в Бразилии фиксируются два генетических источника благородных корундов – щелочно-пегматитовый и метаморфогенный.

### 3.1.10 Гренландский юго-западный рубиноносный пояс

Гренландский юго-западный рубиноносный пояс. Гренландия – крупнейший остров между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами, более 80% территории которого покрыто льдами. В центральной части острова толщина ледяного покрова достигает 4300 м. Породы, слагающие гренландскую часть Канадского щита, представлены мраморами, кристаллическими сланцами, гнейсами, гранитогнейсами, кварцитами и гранитами архейского и раннепротерозойского возрастов, с несогласием перекрытыми вулканогенно-осадочными толщами среднепротерозойского возраста. С конца палеозоя территория испытывает платформенное развитие.

С древними архейско-протерозойскими породами связаны находки, проявления и месторождения гранатов, лунного камня, благородных корундов и драгоценных металлов (золота и серебра) [Garde & Marker, 1988]. На западе кристаллический массив выходит из-под льдов на дневную поверхность, образуя в среднем 200-километровый пояс плоскогорий и горных хребтов на побережье моря Баффина, омываемом теплым Западно-Гренландским течением.

В начале нового тысячелетия на юго-западе Гренландии было открыто перспективное проявление рубинов и розовых сапфиров. После десятилетнего процесса оценки экологических, технологических, экономических последствий горно-геологических условий эксплуатации будущего месторождения, в результате совместной работы Правительства Гренландии и международных экспертов, канадской компании «Настоящие

северные самоцветы ( True North Gems- TNG)» выдано разрешение на начало проходки шахты по добыче благородных корундов [ Барнов и др., 2016].

Комплекс Фискенессет с возрастом 2,97 млн лет является одним из наиболее хорошо сохранившихся расслоенных архейских интрузий в мире. Он состоит из анортозита, лейкогаббро, габбро и метаморфизованных ультрабазитов [ Polat et al, 2010]. Несмотря на метаморфизм амфиболитовой и гранулитовой фаций ( пик которого приходится на 2,80 млрд лет) и многофазную деформацию, первичные кумулятивные текстуры и магматические реликты хорошо сохранились.

Рубины из комплекса Фискенессет отличаются высоким содержанием Cr, промежуточным содержанием Fe, низким содержанием V, Ga и Ti, низким содержанием изотопов кислорода (1,6–4,2 %), редкими минеральными включениями ( например, антофиллит + биотит).

Рудник Аапалуттоке находится на юго- западном побережье Гренландии в 160 км к югу от столицы Нуук и в 15 км юго- восточнее поселения Фискенессет [ Fagan, 2018]. Месторождение ( рудник) имеет симптоматичное название ( в переводе с гренландского означает « Красная гора»), свидетельствующее о давней известности находок « Красного ( красивого)» минерала корунда местными жителями в данном районе.

Горные породы в районе месторождения Аапалуттоке архейского возраста интенсивно смяты в изоклиналильные складки с близширотной ориентировкой их осей и осложненных многочисленными тектоническими нарушениями северо- восточного и северо- западного направлений ( рис. 3.4).

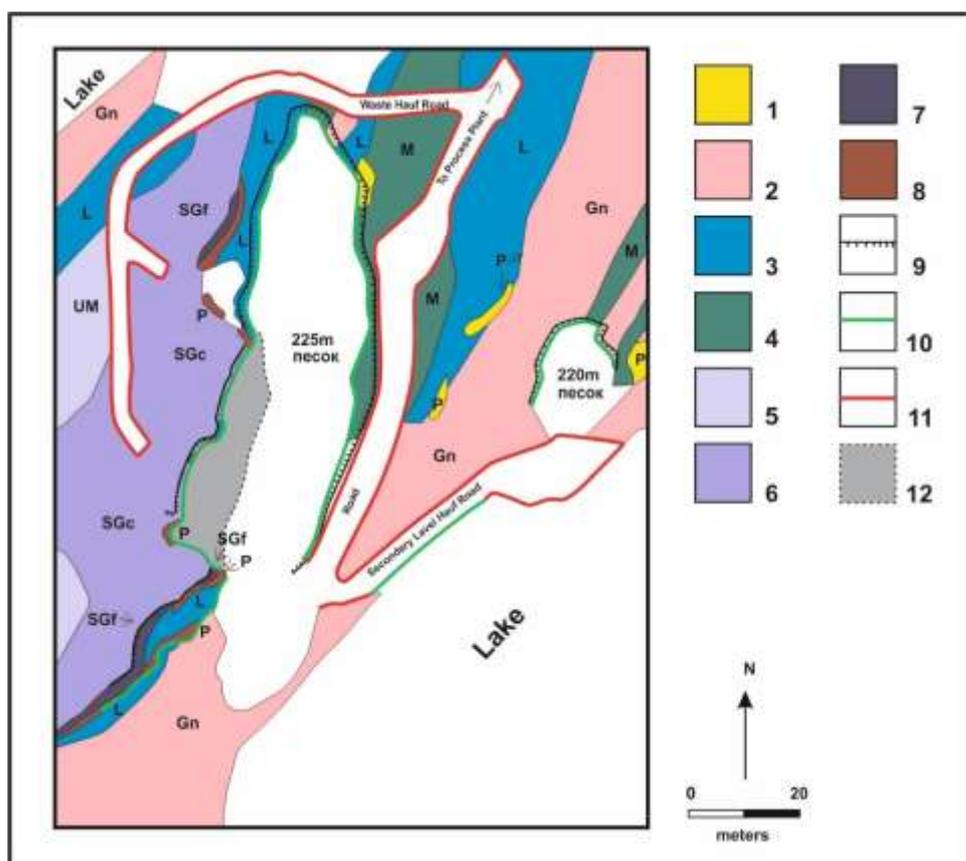


Рисунок 3.4 Геологическая схема разрабатываемого месторождения Aappaluttoq [ Fagan, 2018].

1 – пегматит (P); 2 – ортогнейс ( Gn); 3 – лейкогаббро (L); 4 – меланогаббро (M); 5 – ультраосновная порода ( UM); 6 сапфирина-жедрит (SGc); 7 – сапфирина-жедрит ( SGf) с мелким флогопит- паргаситом; 8 – флогопит- паргасит; 9 – стенка карьера; 10 – разрабатываемый горизонт с корундами; 11 – контуры дороги; 12 – рабочая площадь горной выработки

К настоящему времени вблизи Фискенессета обнаружено более 30 находок кристаллов рубинов и розовых сапфиров и более крупных их проявлений в коренных горных породах и россыпях [ Keulen et al, 2920]. Прогнозные запасы благородных корундов месторождения, по оценкам независимых экспертов, составляют 340–400 млн карат, что выводит его в разряд уникальных объектов мирового значения. Срок эксплуатации месторождения составит 30–40 лет. Находки отдельных кристаллов, проявлений, месторождений различного масштаба рубиновой и сапфировой минерализации концентрируются вдоль крупного регионального разлома в породах анортозит- метагаббрового состава. Магматические породы

Гренландского пояса испытали полиэтапные и полифациальные метаморфические преобразования, аналогичные метаморфизму Канадского и Фенноскандинавского щитов, приведшие к формированию тектонометаморфических зон с проявлениями и месторождениями благородно- корундовой минерализации [ Fagan, 2018 ].

### 3.1.11 Нигерийский сапфиноносный район

Нигерийский сапфиноносный район ( Нигерия). Слабо изученный нигерийский район по геологической позиции весьма близок к охарактеризованным объектам Восточно- Африканского пояса: тот же древний архейско- протерозойский возраст субстрата коренной сапфировой минерализации, её положение в зоне крупнейшего регионального глубинного разлома и интенсивные процессы тектонометаморфической и магматической активизации, развитые здесь. Коренной источник сапфиров не установлен, предположительно он магматический [ Барнов и др., 2016]. Состав твердых минеральных включений в сапфирах, особенно урансодержащего облучевита, позволяет считать такое предположение весьма вероятным.

Месторождения Нисама и Джемма расположены в штате Кадуна в центральной части страны. Сапфир добывается из четвертичных аллювиальных россыпей. Имеет темно- синий цвет, редко встречаются желтые разновидности. Обрабатываются обычно в виде кабашонов из- за темного цвета, вызванного обилием минеральных и иных включений и дефектов.

### 3.1.12 Колумбийский сапфиноносный район

Колумбийский сапфиноносный район ( Колумбия) выявлен сравнительно недавно [ Киевленко, 2001]. Находится в юго- западной части Колумбии и представлен пока только одним аллювиальным месторождением Меркадерос. Район расположен в области альпийской

складчатости. Материнскими породами сапфиров в россыпях считаются щелочные базальты мелового возраста. Добыча сырья ведется из современных русловых и террасовых песчано-гравийных отложений. Размер кристаллов 1–30 мм. Самый крупный после огранки весил 16 карат. Наряду с наиболее распространенными голубыми и синими камнями встречаются желтые, розовые и фиолетовые. Многие камни обладают александритовым эффектом.

### 3.1.13 Восточно-Американский рубиноносный район

Восточно-Американский рубиноносный район находится в Северной Каролине и содержит только аллювиальные современные рубиноносные песчано-гравийные россыпи мелких рек и ручьев бассейна р. Малая Теннесси [Steven, 1985; Brownlaw, et al., 1988]. По данным П. Стивена и С. Йорковича [Барнов и др., 2016], цвет рубина красный разной интенсивности с сильным плеохроизмом. В ограненном виде камни редко превышают 1–2 карата. Коренными источниками рубинов Северной Каролины рассматриваются корундсодержащие докембрийские гнейсы, кристаллические сланцы, другие метаморфические породы и, возможно, генетически взаимосвязанные с ними плагиоклазиты. Месторождение незначительной промышленной ценности.

### 3.1.14 Западно-Американские рубин-сапфиноносные районы

Западно-Американские рубин-сапфиноносные районы (США). На территории США известны два района распространения благородных корундов: западный – находится в центральной части штата Монтана [Slabaugh, 1952], восточный – в округе Мэкон штата Северная Каролина. Первый приурочен к пограничной зоне докембрийской и мезозойской складчатости, представлен коренными объектами (крупная лампрофировая дайка Його-Галч с голубыми и васильково-синими сапфирами с фиолетовым оттенком) и аллювиальными россыпями рек бассейна Миссури

с мелкими (2–6 мм) сапфирами голубовато-зеленой, светло-синей зональной окраски, реже розового, желтого цветов с александритовым эффектом. Коренным источником сапфиров в россыпях Монтаны также считаются магматические породы типа лампрофиров Його-Галч [Brownlaw et al, 1988; Palke et al, 2018], а возраст коренной сапфировой минерализации – мезозойско-кайнозойский. Добыча сапфира осуществляется и из коренных пород на глубину до 100 и более метров, и из россыпей плейстоцен-голоценового возраста.

### 3.1.15 Канадские рубин-сапфиросные районы

Канадские рубин-сапфиросные районы. Находки и мелкие месторождения благородных корундов сосредоточены в провинциях Онтарио и Квебек, территория которых сложена архейскими и нерасчлененными докембрийскими породами.

Месторождения сапфиров (реже рубинов) связаны с корундовыми сиенитами и сиенит-пегматитами, образующими жилы и дайки в толщах гранитогнейсов и гнейсов вблизи контактов их с массивами щелочных и нефелиновых сиенитов. Наиболее известными из них являются месторождения *Beluga sappire properti*, *Baffin island*, *Cabonga Reservoir*, *Quebec* и другие [Dzikowski et al, 2014].

### Выводы по главе 3

*В заключение отметим, что проведенная систематизация и обобщение имеющихся материалов и собственных данных по месторождениям благородных корундов мира позволяют констатировать следующее:*

*1. Генетическая типизация месторождений рубина и сапфира отличается от ранее известных разделением метасоматических месторождений на две самостоятельные группы: 1) собственно метасоматические, обязанные своим происхождением действию постмагматических гидротермальных растворов, и 2) метаморфогенно-*

*метасоматические, генезис которых является логическим завершением в локальных зонах, как правило, многоэтапных процессов регионального метаморфизма. Ранее было показано отличие свойств благородных корундов, систематизированных в соответствии с новой генетической схемой. Установлены отличия выделенных генетических групп месторождений рубина и сапфира в их геологической позиции, определяющей все особенности структуры, состава и свойств минералов.*

*2. В связи с изложенным вводятся понятия моногенетических и полигенетических месторождений (провинции, пояса, регионы). К первым относятся месторождения магматического, пегматитового и собственно метасоматического (постмагматического) происхождения, ко вторым – полихронные и полифациальные собственно метаморфические и метаморфогенно-метасоматические месторождения.*

*Первая группа представлена магматическими месторождениями Восточной Австралии, российского Дальнего Востока, Восточного Китая, Индокитайского полуострова, Нигерии, Колумбии, США (штат Монтана), пегматитовыми месторождениями Бразилии, метасоматическими месторождениями Кении, Танзании, Малави и др. Вторая группа объединяет однотипные по генезису (метаморфогенно-метасоматические) месторождения Южной Азии (Мьянма, Таджикистан, Афганистан, Шри Ланка и другие страны), Восточной Африки (Мадагаскар, ЮАР), Среднего и Южного Урала, Карело-Кольского региона (Россия), Восточной Бразилии (штат Минас-Жерайс и др.), Северной Каролины (США).*

*3. Магматические месторождения благородных корундов – самые молодые на Земле. Все они возникли в относительно короткий промежуток геологического времени – меловой и палеоген-неогеновый период.*

*Пегматитовые месторождения Бразилии образовались в период вендской активизации Земли. Возраст собственно метасоматических месторождений менее определенный и его можно указать как*

*постпротерозойский в Восточной Африке и постпалеозойский на Полярном Урале.*

*Месторождения метаморфогенного типа в целом значительно древнее указанных. Их возраст определяется как архейский в Карелии (Россия), архей- протерозойский в Южной Азии (Индия, Шри- Ланка, Таджикистан и др.) и Восточной Африке (ЮАР, Мадагаскар), архей- вендский в Бразилии, протерозойский в Северной Каролине (США) и верхнепалеозойский, а иногда, возможно, и древнее на Южном и Среднем Урале (Россия).*

*4. Объективный учет геологической позиции и генезиса месторождений благородных корундов позволит квалифицированно определять, интерпретировать свойства рубинов и сапфиров и использовать их в традиционной и специальной, в том числе и фундаментальной диагностике.*

## ГЛАВА 4. Геология месторождений благородных корундов

Месторождения корунда различных типов, в том числе россыпные, как было указано выше, известны практически на всех континентах мира. Часть из них были объектом интенсивной разработки с давних времен и к настоящему времени целиком выработаны. Корунд устойчив в процессах денудации и накапливается в россыпях.

На рис. 4.1 помещена 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 в настоящее время. В основу выбора объектов положены принципы полноты изучения, равной достоверности, последовательных приближений, минимальных затрат с учетом разнообразия горно-геологических условий.

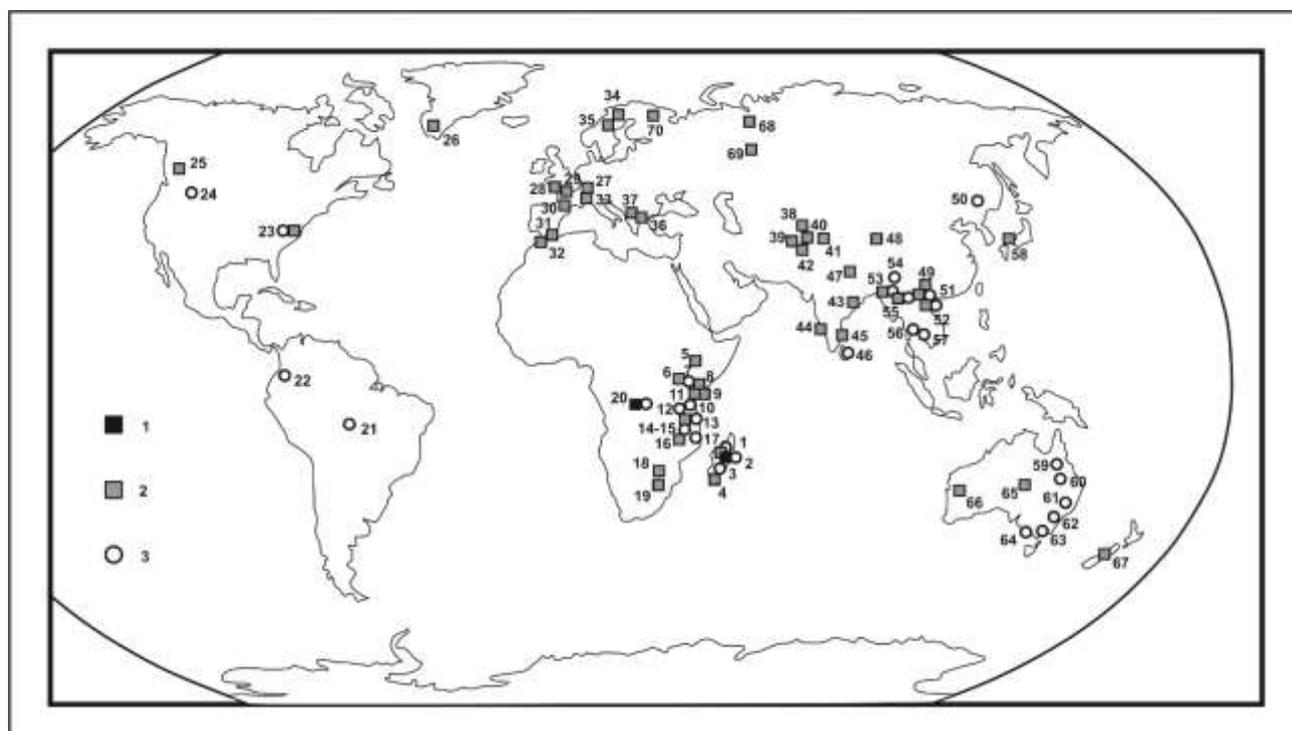


Рисунок 4.1 Основные месторождения и проявления благородных корундов мира

Условные обозначения: 1- магматогенные; 2- метаморфогенные; 3- осадочные (вторичные)

**Мадагаскар:** (1) Andilamena, Ambodivoangy- Zahamena, Didy, Vatomandry; (2) Andriba; Ankaratra ( Antisarbe- Antanifotsy район, Soamiakatra- Ambohimandroso; Ambohibary; (3) Zazafotsy; Иакака- Sakaraha; (4) Bekily- Vohibory территория ( Ambatomena; Ianapera; Fotadrevo; Anavoaha; Maniry; Gogogogo; Vohitany; Ejeda). **Эфиопия:** (5) Kibre mengist, Dilla. **Кения:** (6) West Pokot; (7) Baringo; (8) Kitui; (9) Mangare ( Rockland – бывший John Saul рудник; Penny Lane; Aqua, Hard Road. **Танзания:** (10) Uмба valley; (11) Longido, Lössogono; (12) Winza; Loolera ( Kibuko); (13) Morogoro ( Mwalazi; Visakazi; Nuama, Kibuko, etc); Mahenge ( Lukande; Mayote; Kitwaro; Ipanko); (14) Songea; (15) Tunduru. **Малави:** (16) Chimwadzulu. **Мозамбик:** (17) Montepuez ( Namahumbire/ Namahaca); M'sawize, Ruambeze. **Зимбабве:** (18) O'Brien ( вердиты). **ЮАР:** (19) Barberton ( вердиты). **Демократическая республика Конго:** (20) Mbuii- Mavi. **Бразилия:** (21) Sao Luis- Iuina River. **Колумбия:** (22) Mercaderes- Rio Mayo. **США:** (23) North Carolina ( Corundum Hill; Cowee Valley, Buck Creek); (24) Montana ( Rock Creek). **Канада:** (25) Revelstoke. **Гренландия:** (26) South of Nuuk район ( Fiskensset район – Aappalutogg); North of Nuuk ( Storø; Kangerdluarssuk). **Швейцария:** (27) Campo Lungo. **Франция:** (28) Brittany ( Champtoceaux); (29) French Massif Central ( Haut- Allier- Chantel; Peygerolles; Losère- Aveyron- Marvejols; Vialat- du- Tarn); (30) Pyrenées ( Arignac). **Испания:** (31) Alboran sea; Marracos; (32) Beni Bousera. **Италия:** (33) Piedmont. **Норвегия:** (34) Froland. **Финляндия:** (35) Kittilä. **Македония:** (36) Plilep. **Греция:** (37) Gorgona- Xanthi; Paradesti- Drama. **Таджикистан:** (38) Snezhnoe, Turakuloma, Badakhsham. **Афганистан:** (39) Jegdalek, Kash. **Пакистан:** (40) Hunza valley; (41) Batakundi, Nangimali; (42) Dir. **Индия:** (43) Orissa, Kalahandi; (44) Karnakata ( Mysore); Andhra Pradesh ( Salem район). **Шри Ланка:** (46) Ratnapura, Polonnaruwa; Elahera. **Непал:** (47) Chumar, Ruyil. **Китай:** (48) Oinghay; (49) Yuan Jiang; (50) Muling, **Вьетнам:** (51) Luc Yen- Yen Bai; (52) Quy Chau. **Мьянма:** (53) Mogok; (54); Namyu; (55) Mong Hsu. **Таиланд:** (56) Chanthaburi- Trat ( Bo Waen, Bo Na Wong, What Tok Prom, Bo Rai, Nong Bon). **Камбоджа:** (57) Paulin, Samjant. **Япония:** (58) Ida. **Австралия:** (59) Lava Plains; (60) Anakie fields- Rubyvale; (61) New England fields ( Inverell); (62) Macquarie- Cudgegong, Barrington Tops- Yarrowitch); (63) Tumberumba; (64) Western Melbourne fields; (65) Hurts range; (66) Poona. **Новая Зеландия:** (67) Westland ( Hokitika). **Россия:** (68) Полярный Урал ( Рай- Из); (69) Южный Урал ( Ильменские Горы, Борзовская россыпь, Вишневые Горы); (70) Карелия ( Хитостров)

Тектоническая эволюция региона « Высокая Азия» выражена подъемом к поверхности в неоген- четвертичное время глубинных пород. Отдельные исследователи объясняют все это ролью тектонической эрозии огромной мощности, что привело к выделению флюидов и предопределило формирование разнообразных метасоматитов, в т.ч. и корундсодержащих [ Терехов, Акимов, 2013]. Таким образом, по мнению Е.Н. Терехова, главным фактором формирования корундовой минерализации является глубинный флюид, обогащенный Al, Ti, P3Э, Zr, Ba, Sr, Cr, V, F.

Горно- геологические условия месторождения ( участка) определяют способ вскрытия и технологию его разработки ( рельеф местности, мощность и литологическая характеристика покровных отложений, сложность строения корундсодержащего тела, его мощность и выдержанность).

До настоящего времени в мировой практике добычи корунда используется исключительно ручной метод, который требует серьезных физических усилий со стороны добытчиков – прямое наследие кустарной разработки корундоносных россыпей.

Общая схема добычи драгоценного камня включает несколько этапов:

1. определение места ( наиболее часто для подобных целей используется россыпь);
2. строительство шахт с установкой специальных насосов для откачки воды и подачи воздуха мотопомпой;
3. очень часто выветрелая горная порода представлена глиной, в которой обнаруживаются корунды.

Подобный вариант добычи рубинов неудобен и опасен. Определить качество минерала бывает затруднительно, поэтому с найденными образцами работают специалисты. Это современное состояние и определяет разработку новых подходов к добыче корундов из коренных пород в открытых или подземных выработках в зависимости от рельефа местности и многих других обстоятельств.

Актуальным становится вопрос о перспективе отработки коренных месторождений корунда. Предлагаются различные способы разработки для условий освоения коренных месторождений корунда. Подобные месторождения расположены в сложных горно- геологических, геомеханических 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 капитальных вложений [ Еременко и др., 2013; Барнов, Еременко и др., 2015; и др.].

По сложности горно- геологического строения корундовые месторождения ( участки) относятся к 3-й и 4-й группам. Месторождения ( участки) очень сложного геологического строения со средними и мелкими по размерам телами корундсодержащих руд с интенсивно или чрезвычайно нарушенным залеганием характеризуются резко изменчивой мощностью и сложным внутренним строением либо крайне неравномерным и значительно невыдержанным качеством полезного ископаемого.

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 характеризуются разнообразием физико- механических свойств руды и вмещающих пород. Коэффициент крепости их колеблется от 3 до 20 по шкале проф. М.М. Протодяконова ( Теория крепости., 1974), а средний доминирующий коэффициент крепости равен 8-12. Крепость вмещающих пород с удалением от зон оруденения возрастает. Руда и вмещающие породы характеризуются непостоянной устойчивостью.

#### 4.1 Особенности химического состава корундсодержащих полей

На рис. 4.2 показаны различные химические поля, которые слагают рубины из разных месторождений мира. Данные результаты охватывают представительный ряд корундов, взятых из приводимых в списке литературы источников и показанных на обобщенной диаграмме.

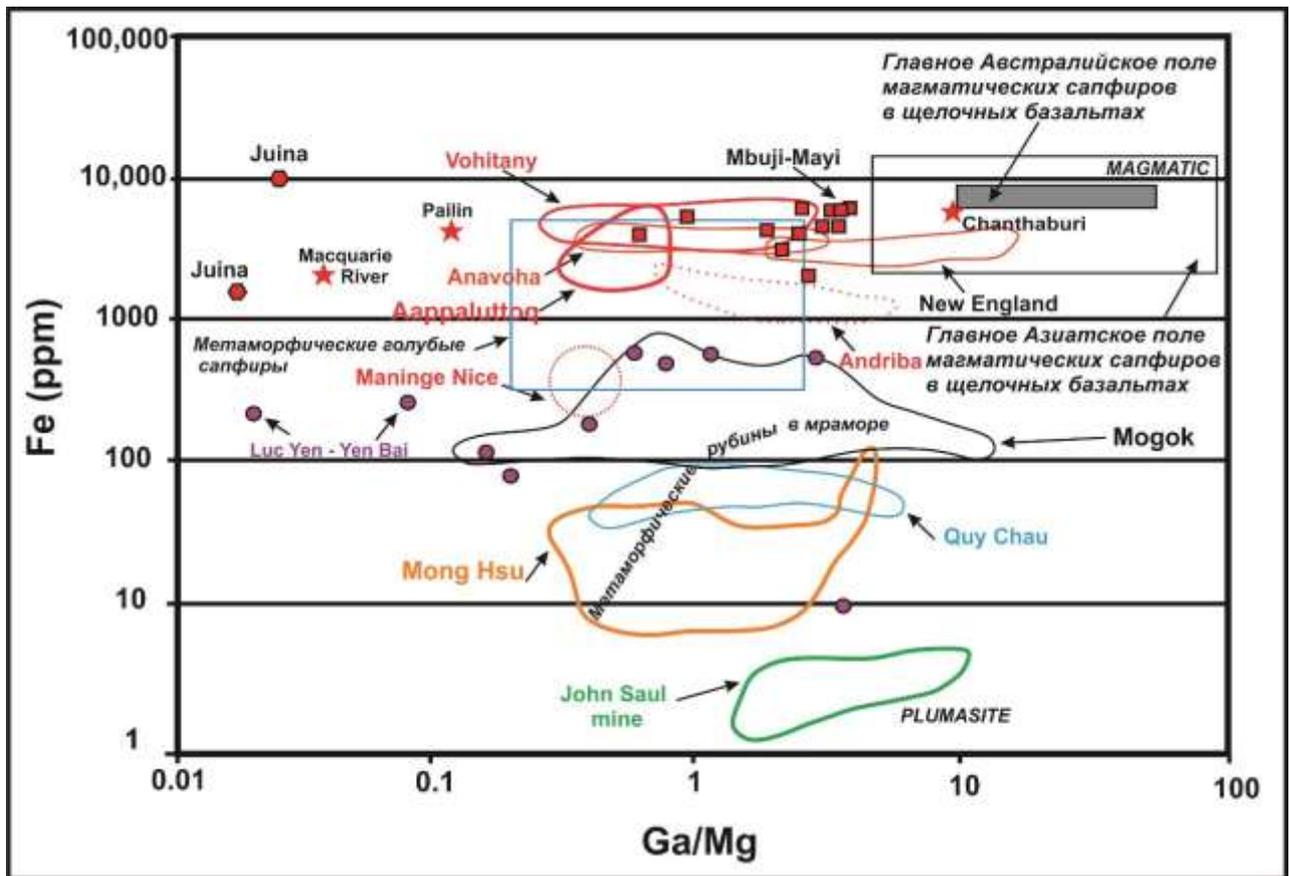


Рисунок 4.2 Диаграмма соотношений содержаний Fe (ppm) по отношению Ga/Mg для рубинов из разных месторождений мира (по данным [ Sutherland et al, 2015])

Различные типы рубинов показаны в полях, связанных со щелочными ультрамафит-мафитами на Мадагаскаре (Vohitany, Anavoaha и Andriba) [Giuliani et al, 2014] и Гренландии (месторождение Aappaluttoq) [Keulen et al, 2020], во включениях в алмазах в Бразилии [Hutchinson et al, 43] и ксенокristы рубина в кимберлитах из Mbuji-Mayi в Демократической Республика Конго (красный цвет на рисунке) [Giuliani et al, 2015]; ксенокristы рубина в аллювиальных щелочных базальтах (Pailin, Chanthaburi- Trat, Macquarie River в Камбодже и New England в Австралии) (красная звездочка на рисунке) [Sutherland et al, 2009; Sutherland, Khin et al, 2009; Sutherland et al, 2016]. Рубины в мраморой толще Luc Yen- Yen Bai представлены единичными измерениями (фиолетовый круг на рисунке) и Quy Chau (синий цвет на рисунке) во Вьетнаме [Pignatelli et al, 2019;

Garnier et al, 2003], Mogok (черный цвет на рисунке) [Khin et al, ] и Mong Hsu (оранжевый цвет на рисунке) [Sutherland, Khin et al, 2019] в Мьянме, рубины из бывшего рудника John Saul (ныне Rockland) в Кении (зеленый цвет на рисунке) в десилифицированных пегматитах (Saul, 2015; Giuliani et al., неопубликованные данные). В темно-сером прямоугольнике в правой верхней части рис. 4.2 показан контур главного Австралийского поля магматических сапфиров в щелочных базальтах [Sutherland et al, 2015].

Рубины демонстрируют высокие вариации Fe, что позволяет различать их геологический тип. Он характеризуется уменьшением Fe от рубинов в базит-ультрабазитах до мрамора в метасоматических породах (плюмазитах и сдвиговых зонах). Соотношение Ga/ Mg рубинов из щелочных базит-ультрабазитов отличается от магматических сапфиров, но находится в пределах значений для метаморфических сапфиров, определенных в работе [Sutherland et al, 2015]. Участки представляют собой распределение нескольких точечных анализов. Остальные анализы характеризуют собой средние значения пунктуальных измерений. Поля благородных корундов иллюстрируются на рис. 4.3 в прямоугольной системе координат по оси по оси X (ось абсцисс)  $\text{FeO} + \text{TiO}_2 + \text{Ga}_2\text{O}_3$  и оси Y (ось ординат)  $\text{FeO} + \text{Cr}_2\text{O}_3 + \text{MgO} + \text{V}_2\text{O}_3$  и четко отражают геохимическую специфику.

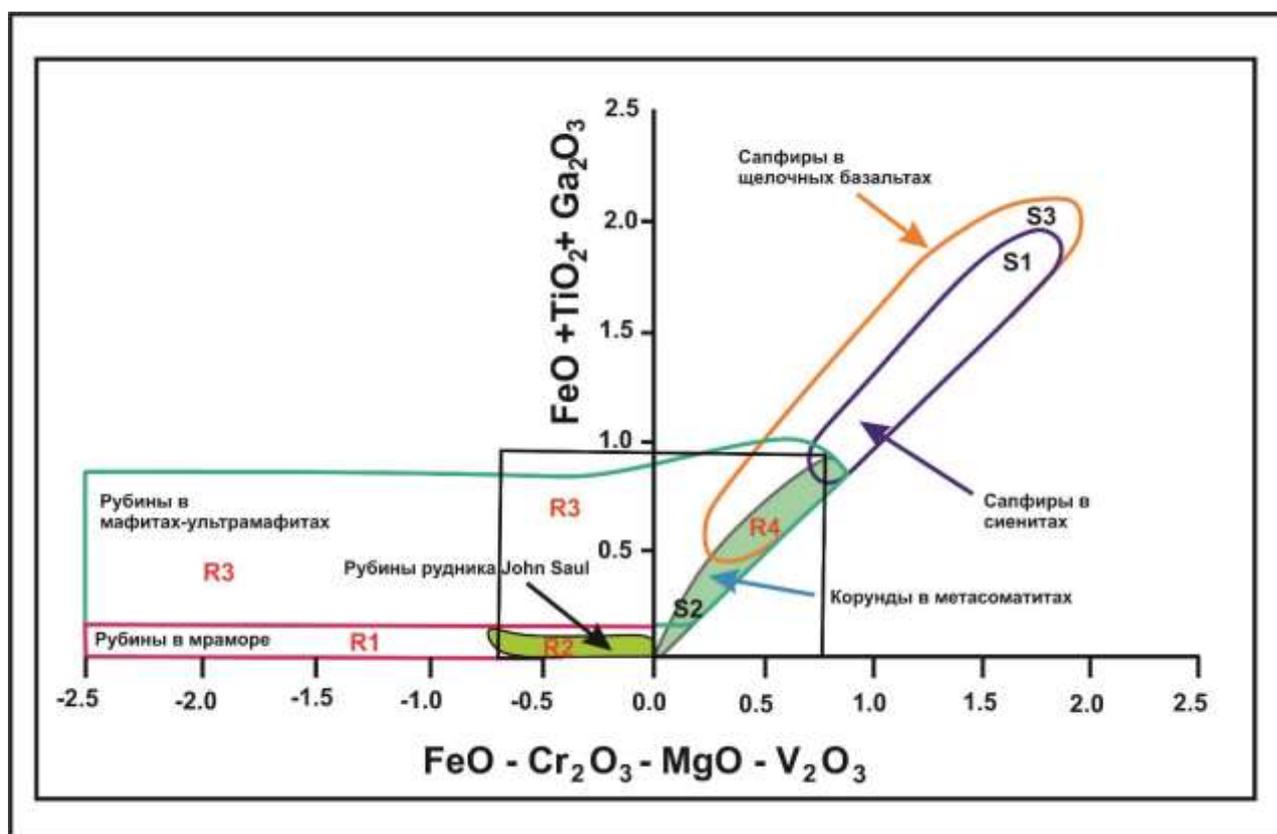
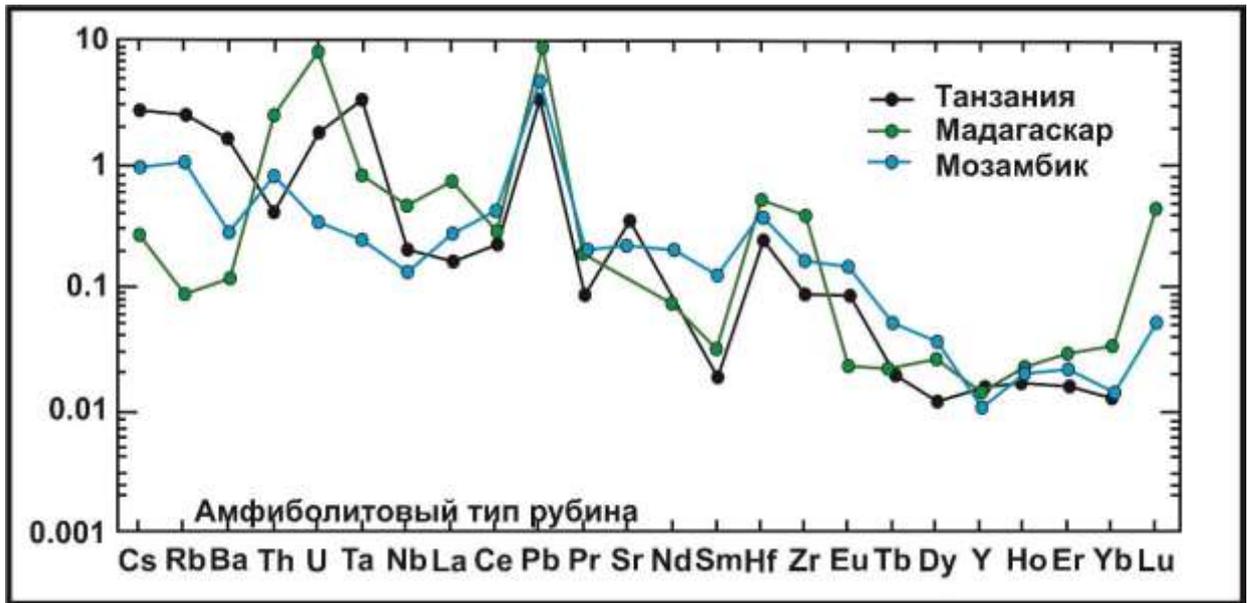


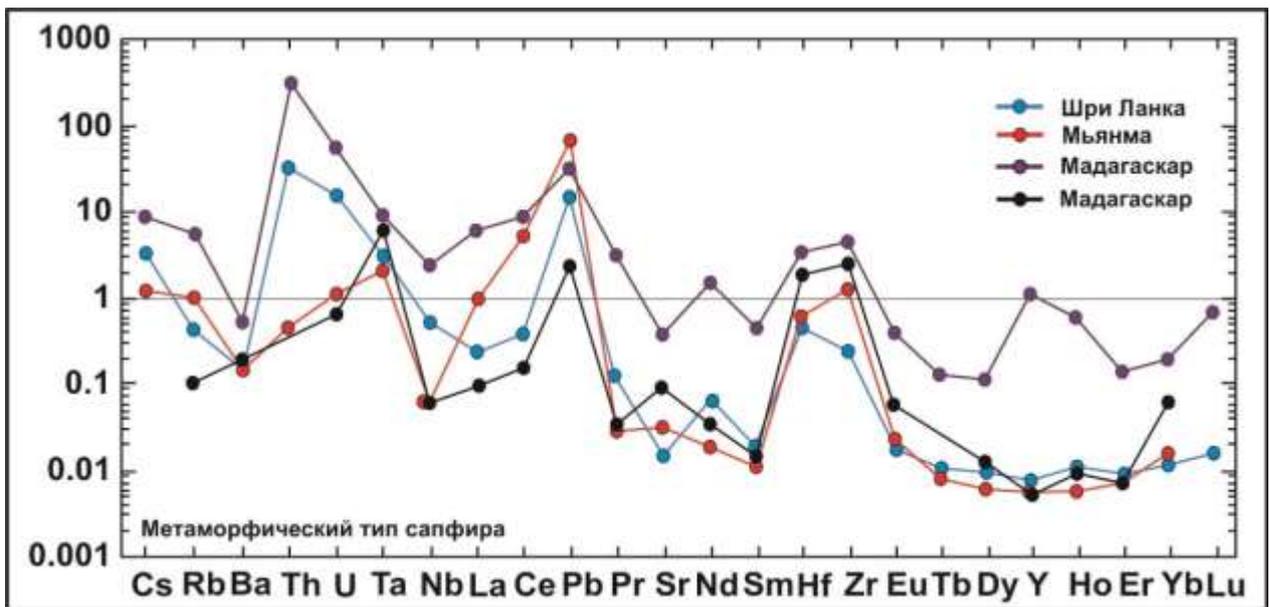
Рисунок 4.3 Диаграмма химических полей различных типов месторождений корунда мира [Giuliani, G.; Caumon et al, 2014; Rakotondrazafy et al, 2014] (горизонтальная ось  $\text{FeO} - \text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{MgO} - \text{V}_2\text{O}_3$ , вертикальная ось  $\text{FeO} + \text{TiO}_2 + \text{Ga}_2\text{O}_3$ )

На рис. 4.4,А, рис. 4.4,Б, рис. 4.4,В, рис. 4.4,Г приводятся мультиэлементные спайд- диаграммы главных месторождений благородных корундов мира, показывающих содержание элементов- примесей РЗЭ в корундах. Данные спайд- диаграммы взяты из сводной работы «An Evaluation of the Potential for Determination of the Geographic Origin of Ruby and Sapphire Using an Expanded Trace Element Suite Plus Sr–Pb Isotope Compositions» ( авторы: Krebs M. Y., Hardman M.F., Pearson D. G., Yan Luo Fagan, A.J. and Sarkar C.) [Crebs et al, 2020]. Профили построены по средним значениям для соответствующих типов. Общий вид отражает сходство приводимых данных. На всех диаграммах проявлены сходные пики и небольшое преобладание легких над тяжелыми.

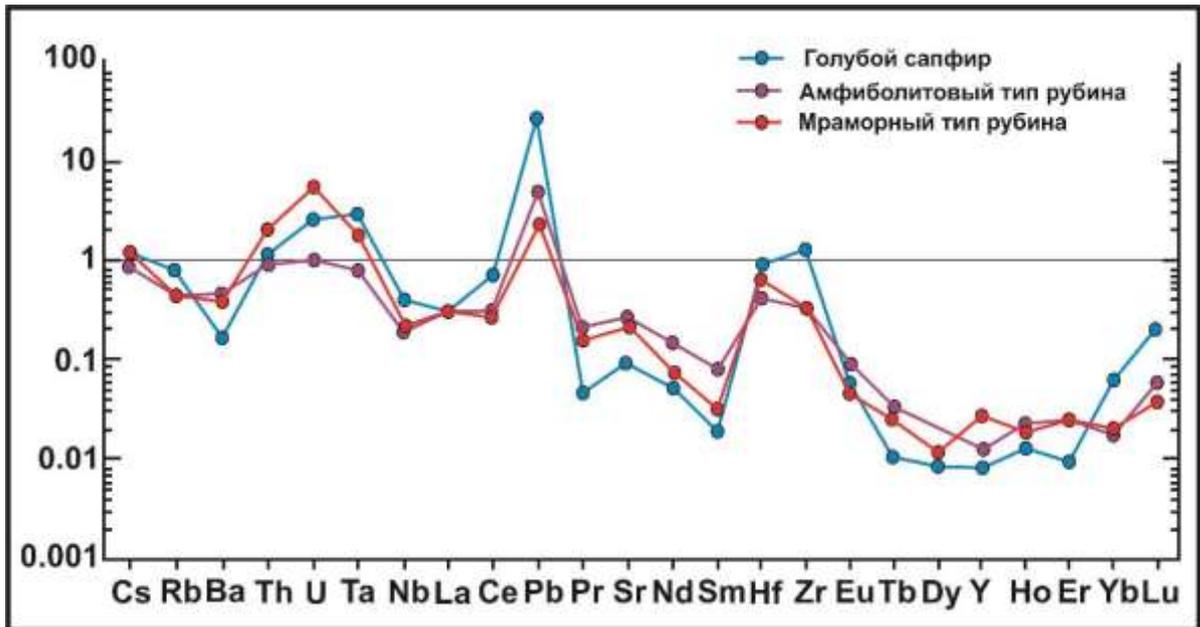
А



Б



В



Г

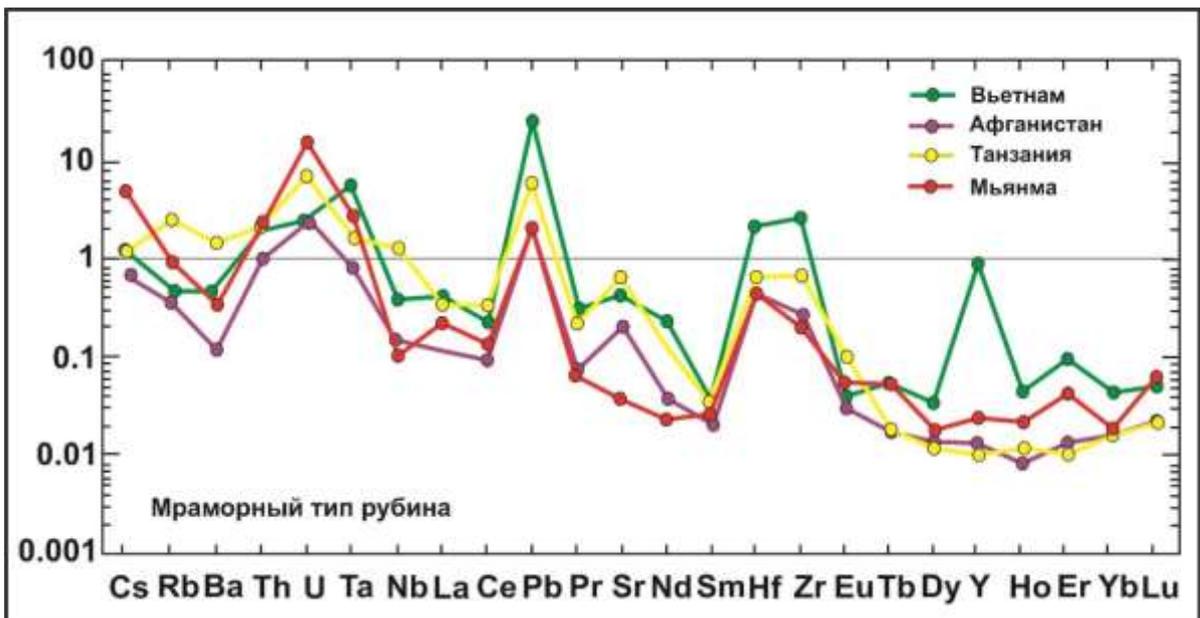


Рисунок 4.4, АГ Диаграммы, нормализованные по составу к примитивной мантии, с медианными концентрациями редких и РЗЭ в корундах [ Krebs et al, 2020]

#### 4.2 Петрографическая характеристика корундов

Петрографические характеристики корундов имеют важное значение при проводимых исследованиях.

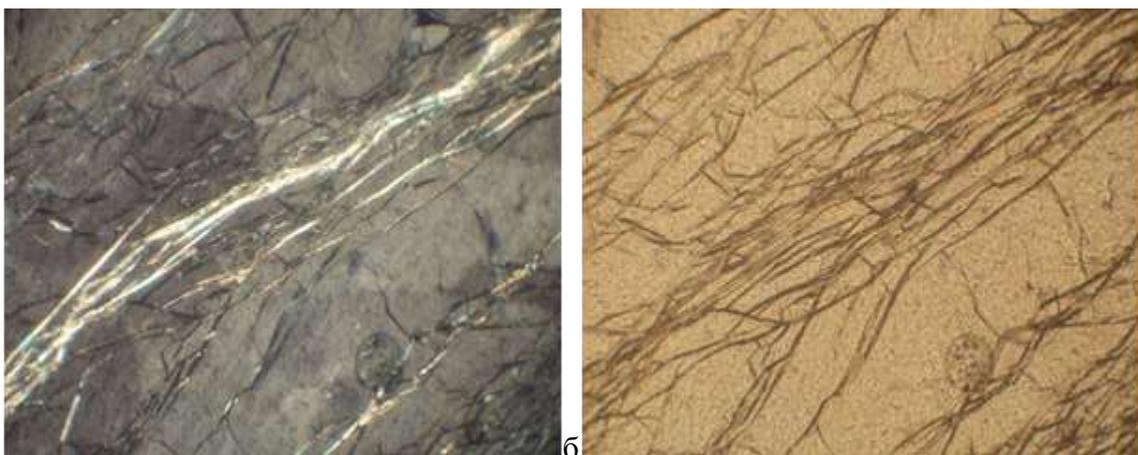


Рисунок 4.5 Прожилки диаспора в корунде: а – с анализатором; б – без анализатора. Ув 20х

На рис. 4.5 показан корунд метаморфогенного класса, образец которого взят в местечке Мансур ( Индия), где диаспор в виде включений в корунде распознается по тончайшей поперечно- волокнистой структуре прожилков ( шл. 11-1).

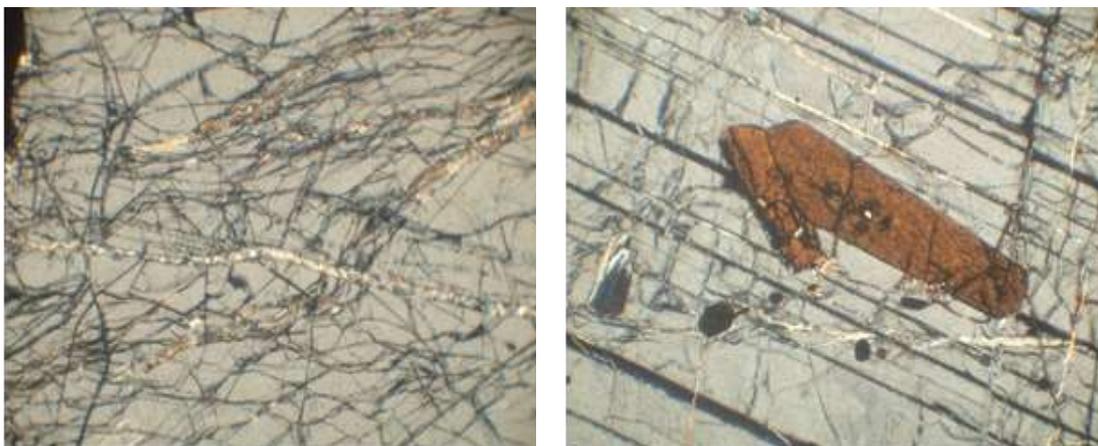


Рисунок 4.6 Сеть тонких прожилков мусковита в кристалле корунда. Место взятия Запскор, Кашмир, Индия. С анализатором. Ув. 30х

Рисунок 4.7 Столбчатые кристаллы рутила в сапфире. Место взятия Петерсит, Индия. С анализатором. Ув. 30х.

На рис. 4.6 иллюстрируется сеть тонких нитевидных прожилков мусковита размером не более 0,1 мм, пронизывающих кристалл корунда ( шл. 29-1). Рутил, который присутствует рядом с биотитом, имеет характерную красную тёмную окраску. На рис. 4.7 показаны идиоморфные кристаллы рутила в корунде, в шл. 33-I рутил желтовато- коричневым.

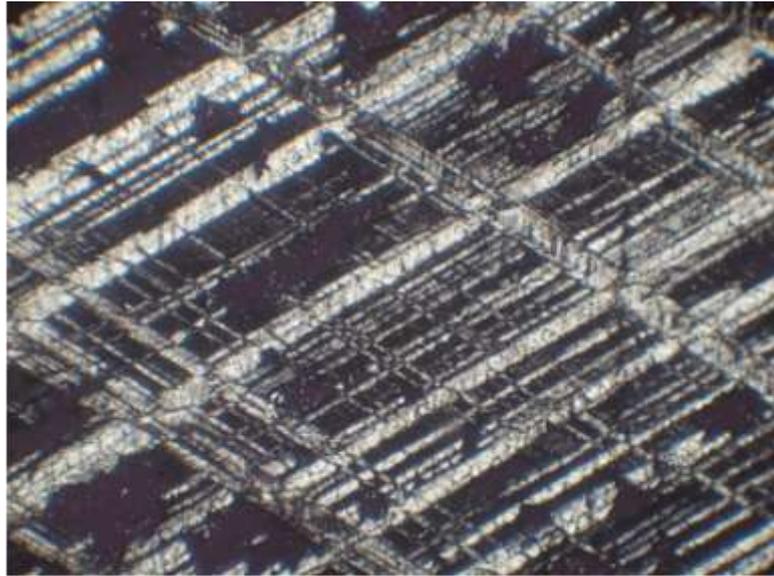


Рисунок 4.8 Корунд с диагональным двойникованием. С анализатором. Ув. 30<sup>x</sup>

На рис. 4.8 представлен классический корунд без включений месторождения Winza (Танзания), шл. 29-1.

Монокристаллический корунд с диагональным двойникованием. Корунд практически чистый. В нём есть небольшое включение альбита с полисинтетическим двойникованием (рис. 4.9) Ильменские горы, южный Урал, шл.21.



Рисунок 4.9 Корунд с  
полисинтетическими двойниками  
и включением «чистого» альбита.  
С анализатором. Ув. 30<sup>x</sup>.



Рисунок 4.10 Ветвящиеся  
прожилки мелкочешуйчатого  
серицита Ув. 30<sup>x</sup>.

В корунде синего цвета с острова Ольхон, оз. Байкал, развита сеть прожилков серицита. Его чешуйки ориентированы произвольно внутри прожилка (рис. 4.10), шл. 23-1. Серицит в большинстве случаев обладает нормальными для него высокими цветами интерференции. Мелкая чешуйчатость, отсутствие ориентировки говорят о быстром вскрытии и поступлении растворов, а также об отсутствии стадии термостатирования.

#### 4.3 Роль метаморфизма при образовании благородного корунда

Специфика условий метаморизма отражена на рис. 4.12, на котором поля P–T: (1) месторождения в мраморах Mong Hsu [Peretti et al, 1996], Урал [Kisin, 1994], Luc Yen и Jegdalek [Garnier, Giuliani et al, 2008], Hunza [Okrusch et al, 1976], Revelstoke [Dzikowski et al, 2014], Mahenge [Balmer et al, 2017], Snezhnoe [Барнов, 2015] представлены фиолетовыми прямоугольниками и (2) месторождения ультрабазит-базитового комплекса, метаморфические *sensu stricto* или связанные с метасоматическим метаморфизмом представлены красными прямоугольниками: Гренландия Kangerdluarssuk [Garde & Marker, 1988], Aappaluttoq [Fagan, 2018; Keulen, 2020]; Южная Кения [Key & Ochieng, 1991; Simonet, 2000]; Montepuez [Fanka & Sutthirat, 2018]; Mangare [Mercier, Debat & Saul, 1999]; Winza [Schwarz et al, 2008], North Carolina [Tenthorey et al, 1996] и Vohibory [[Rakotondrazafy et al, 2008](#)].

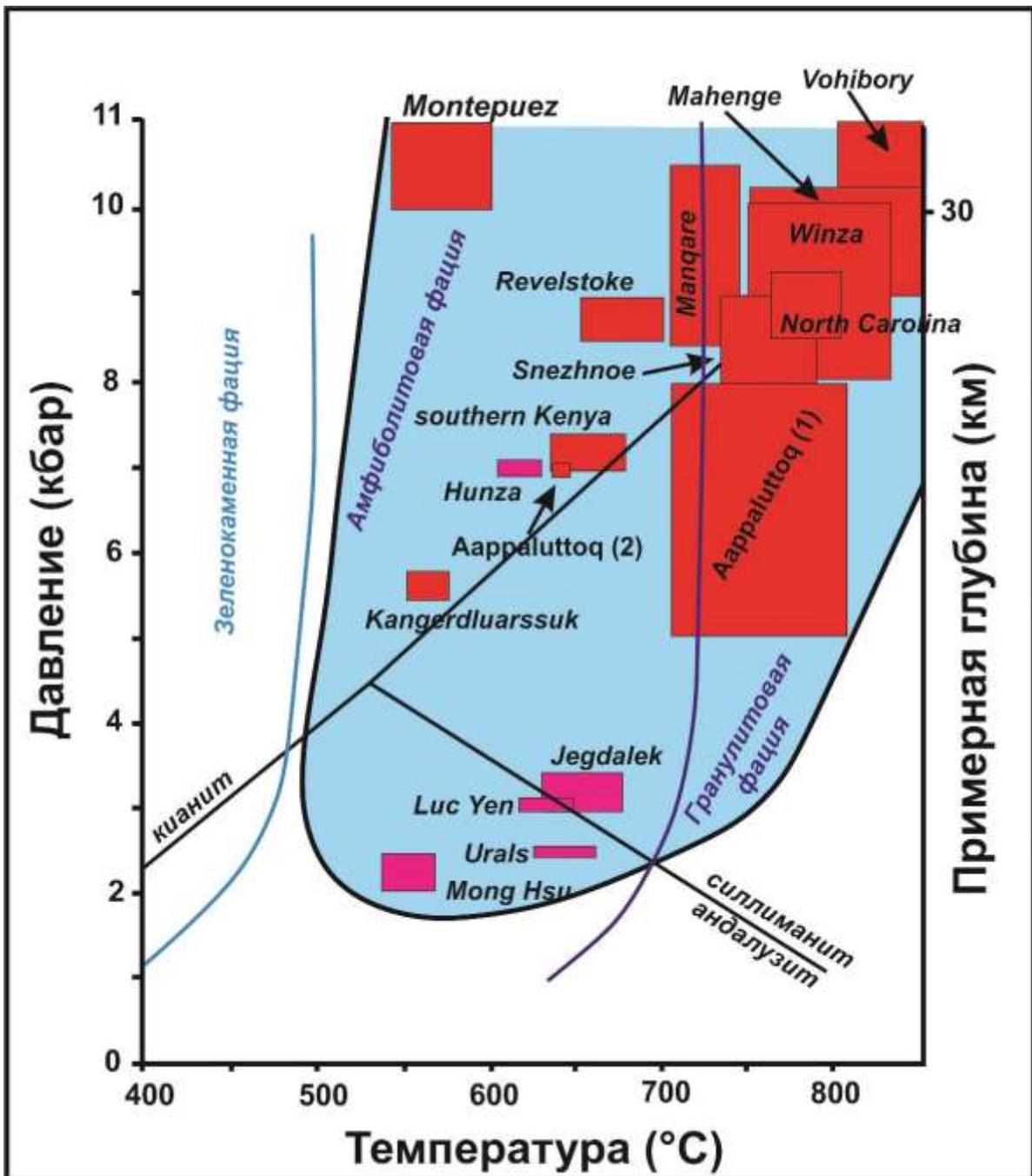


Рисунок 4.11 Давление–температура (P–T) условий метаморфизма при формировании месторождений корунда [Giuliani et al, 2014; Simonet, Fritsch, Lasnier, 2008]

Примечание: P–T-поля рубинового и розового корундов в клинопироксенитах и ксенолитах в метагаббро, метагаббро-ксенолитах, связанных со щелочными базальтами, не показаны. Приведены схематические поля зеленокаменной, амфиболитовой и гранулитовой фаций.

#### 4.4 Четыре основных периода корундообразования в мире

Разными методами датирования (в основном U- Pb методом) были определены четыре основных периода образования корунда во всем мире (рис. 4.12).

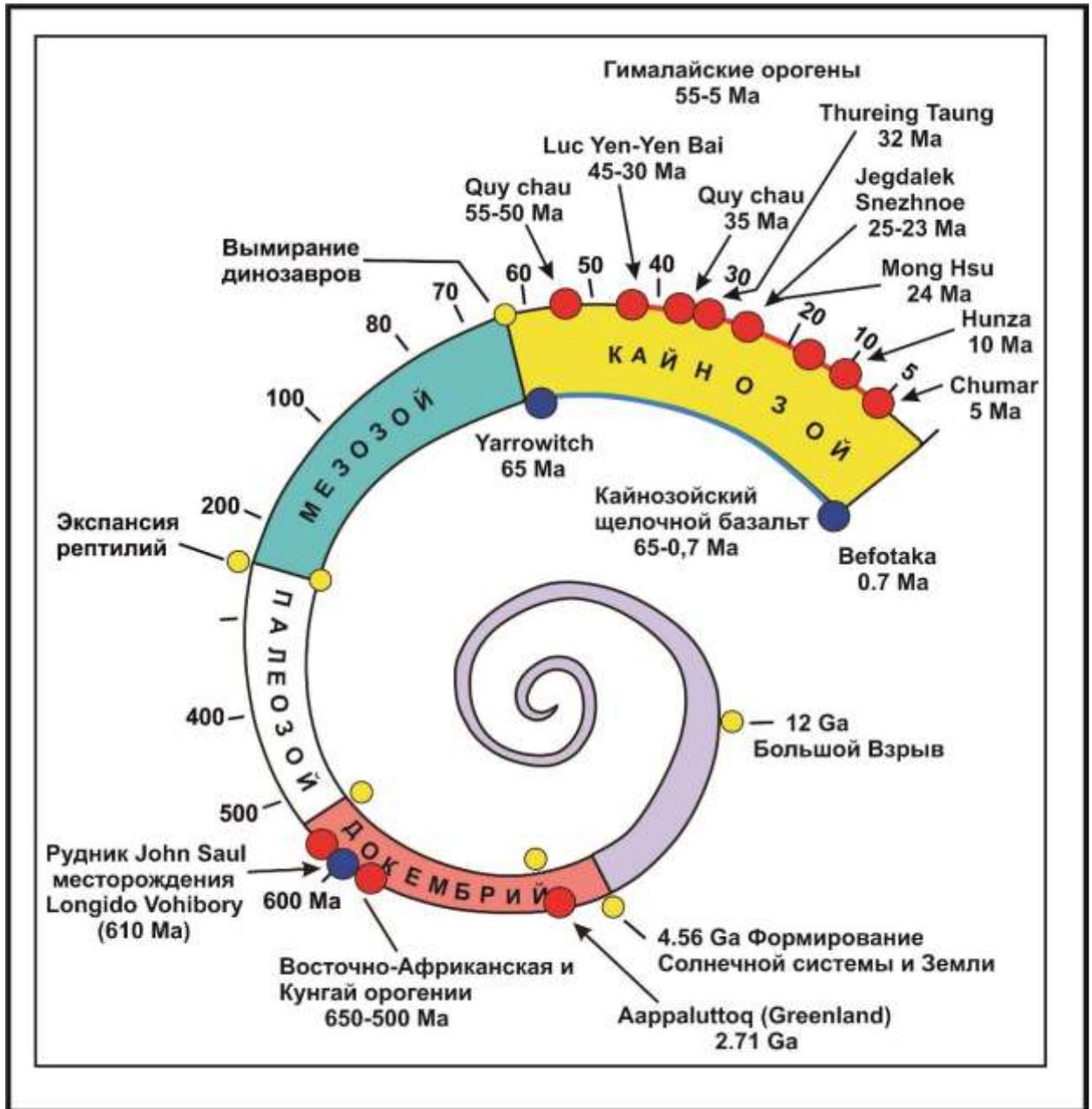


Рисунок 4.12 Спиральная временная диаграмма образования корундов

Месторождение Аппалаттоқ в Гренландии сформировалось в архее, где рубин датируется как архейский. Если изохрону Pb- Pb, определенную по цирконам Аппалаттоқ, интерпретировать как возраст перекристаллизации корунда в благородный корунд, то возраст

согласуется с событиями региональной геологической обстановки. В настоящее время этот объект имеет самый древний возраст.

Основным периодом формирования благородных корундов был панафриканский орогенез (750–450 млн лет назад) (рис. 4.13). Сюда входят месторождения рубинов и сапфиров в поясе драгоценных камней Восточной Африки, Индии, Шри-Ланки, на Мадагаскаре [Giuliani et al, 2014], связанные с коллизионными процессами между Восточной и Западной Гондваной во время панафриканских тектонико-метаморфических событий [Kroner, 1984]. Данные результатов U/ Pb датирования циркона из рудника John Saul в Кении ( $612 \pm 6$  млн лет; [Saul, 2015], Longido в Танзании ( $610 \pm 6$  млн лет [Le Goff et al, 2010]) и месторождения Vohibory на Мадагаскаре ( $612 \pm 5$  млн лет; [Jons & Schenk, 2008] подтверждают периоды формирования, связанные с восточно-африканским орогенезом.

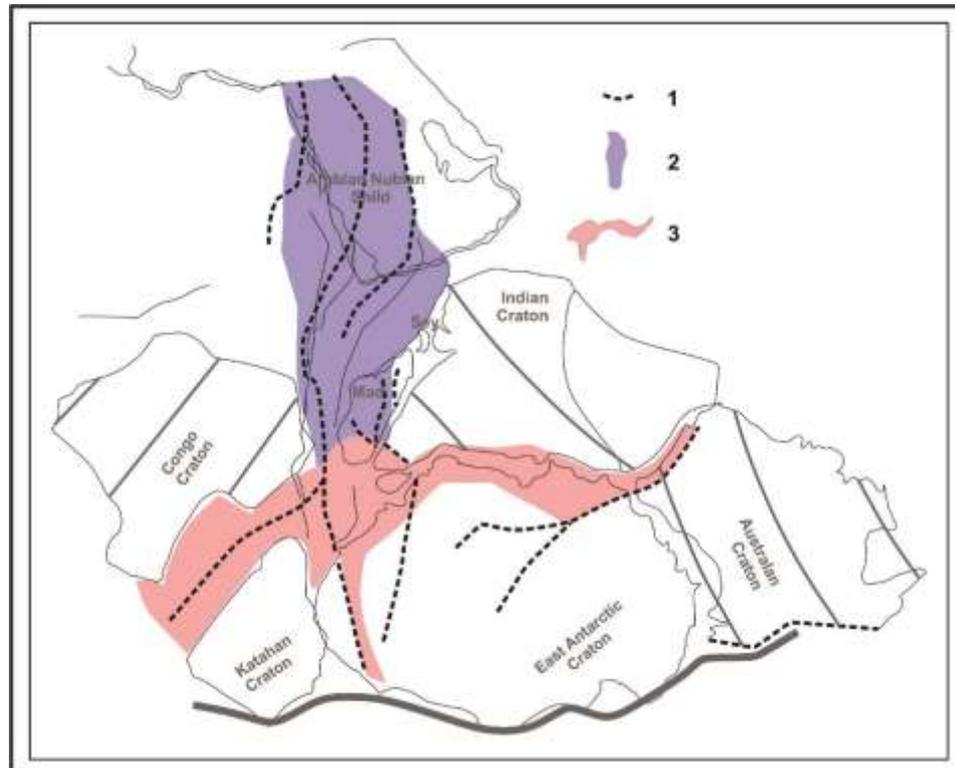


Рисунок 4.13 Два Пан-Гондванских события столкновений (Восточная Гондвана и восточная часть Западной Гондваны) по [Meert, 2003]

Условные обозначения: 1 – предполагаемая сутура или шир-зона; 2 постколлизонное расширение 630-550 Ма: Восточно-Африканский ороген; 3 коллизионный метаморфизм Kuunga <580 Ма

Положение южных континентов около 500 млн лет назад. В то время, задолго до зарождения корундов в Гималаях, на Урале или в Калифорнии, практически все мировые залежи кристаллических цветных драгоценных камней располагались в областях, отмеченных розовым цветом (рис. 4.14).

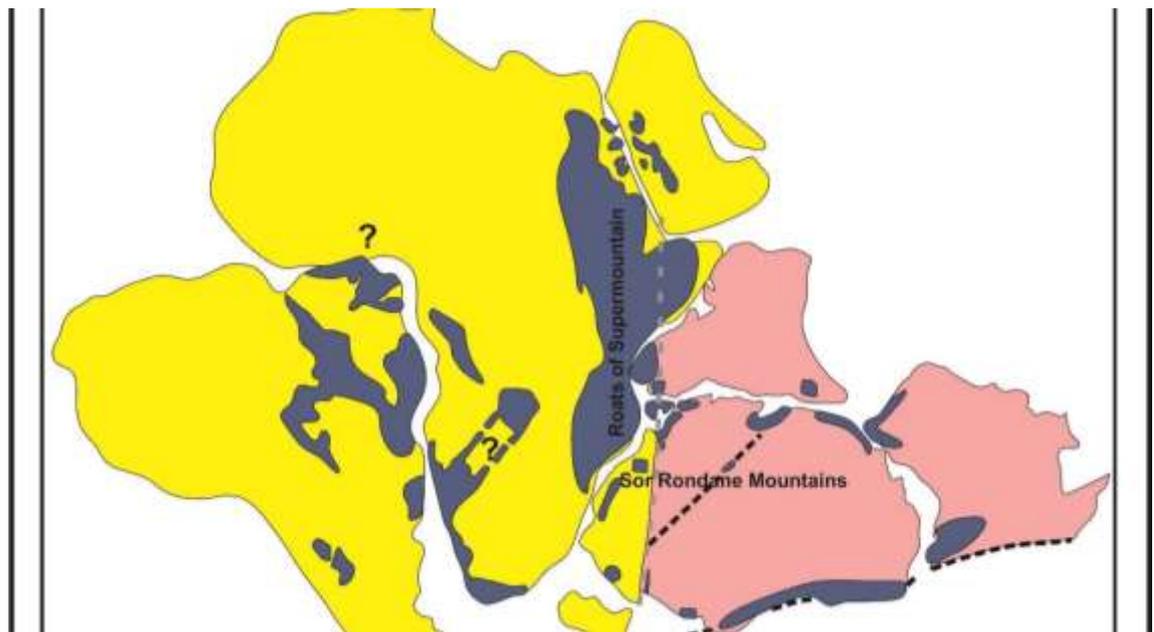


Рисунок 4.14 Положение южных континентов около 500 млн лет назад

Возраст образования месторождения рубина в Мозамбике неизвестен, но панафриканский геологический эпизод вполне соответствует возрасту месторождения [Bingen et al, 2009]. Более того, U/ Pb возраст циркона, одновозрастного с сапфиром месторождения скарнового типа Andronandambo на юге Мадагаскара колеблется от 523 до 510 млн лет [Raquette et al, 1994], а  $40\text{Ar}/39\text{Ar}$  возраст биотита и флогопита, сингенетичного с сапфиром и рубином из упомянутого месторождения определен в диапазоне от 494 до 487 млн лет [Giuliani, Fallick et al, 2007]. LA- ICP- MS датирование рутила как включения в рубине из рудника John Saul в районе дало возраст 533 и 526 млн лет [

Sorokina et al, 2017]. Эти периоды охлаждения меньше тех, которые получены U/Pb методом, считаются минимальным возрастом.

Третий период соответствует кайнозойскому альпийскому орогенезу, с которым связаны тектонические события в Альпах, Родопах и Гималаях, т.е. от 55 млн лет до четвертичного периода. Примеры включают месторождения мрамора с рубином в Campo Lungo (Швейцария) и Xanthi (Греция), а также в Центральном и Юго-Восточном регионах Азии. В Гималаях месторождения рубина в толще, сложенной мрамором, отмечены в метаморфических блоках, которые были затронуты крупными тектоническими событиями при столкновении Индийской и Азиатской плит [Garnier et al, 2002; Garnier et al, 2004; Garnier et al, 2006; Litvinenko et al, 2020]. Рубин косвенно датирован экспериментами по ступенчатому нагреву  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  одиночных зерен одновозрастного флогопита, а также с помощью ионно-зондового U-Pb анализа циркона, входящего в состав корунда [Graham et al, 2008; Sutherland et al, 2019]. Датировка отложений Снежного на Центральном Памире была проведена по валовой пробе (рубин во флогопит-плагиоклазовой породе) Rb-Sr методом [Litvinenko et al, 2020]. Возраст составил  $23 \pm 1.6$  млн лет. Данный результат следует рассматривать как минимальный возраст для образования рубина.

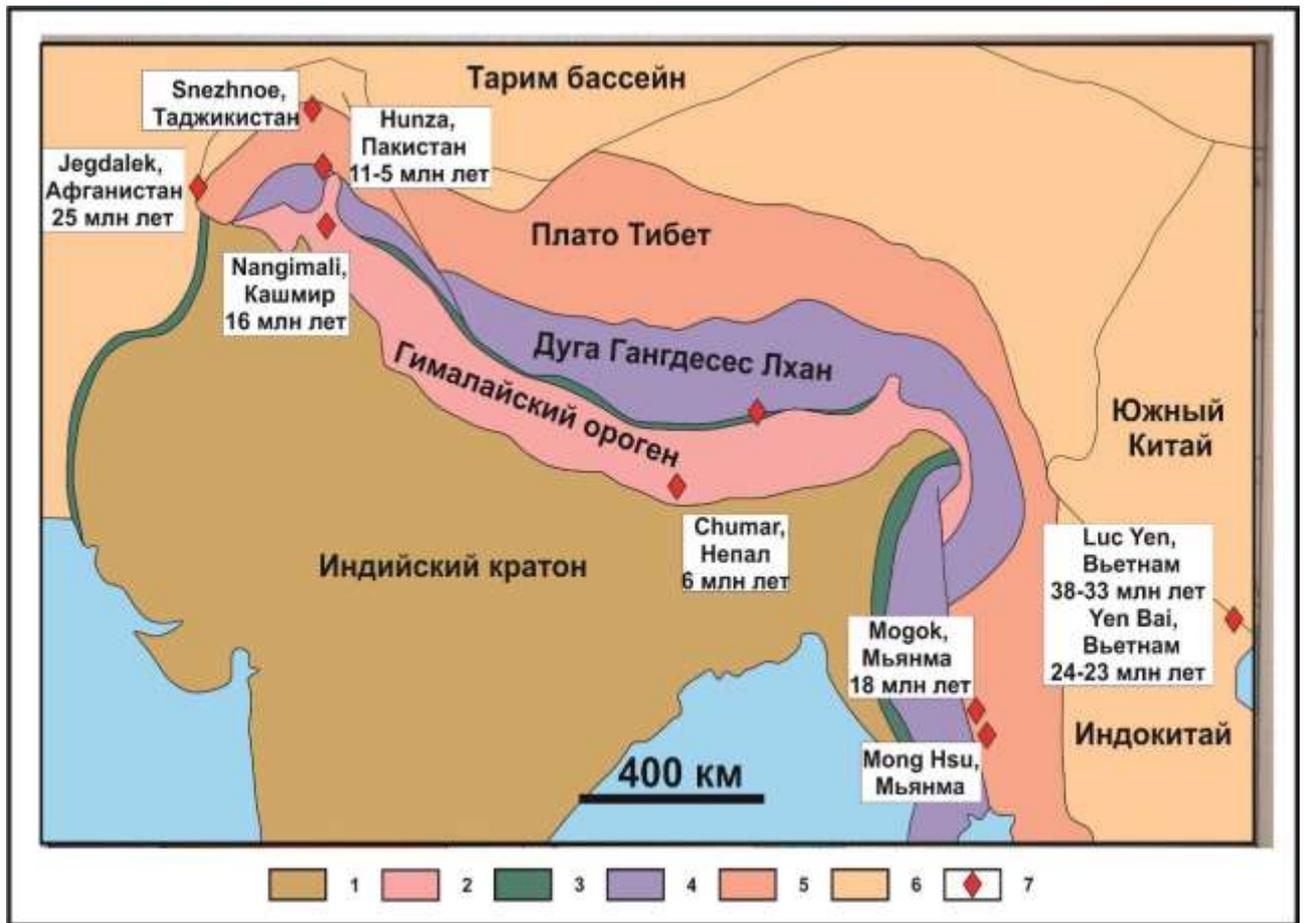


Рисунок 4.15 Модифицированная схема Гималайского орогена с указанием основных месторождений корунда и их возраста [ по Garnier et al., 2008]

Условные обозначения: 1 – Индийский кратон; 2 Гималайский ороген; 3 Индо-Ярунгская сутурная зона; 4 – Гангдесская дуга; 5 Тибетское плато; 6 – Таримский бассейн; 7 – месторождения корунда.

Четвертый важный период развития в мировой области ювелирной промышленности корундов генетически связан с экструзиями щелочных базальтов в кайнозо (от 65 млн лет до четвертичного периода). Драгоценный корунд встречается во всем мире в виде ксенокристов или мегакристов, в ксенолитах или анклавах, включенных в базальтовые магмы во время их подъема. Подобные месторождения рубинов и сапфиров установлены в Тасмании через Восточную Австралию, Юго-Восточную Азию и Восточный Китай и Дальний Восток России [ Sutherland, Schwarz et al, 1998; Высоцкий и др., 2003; Sutherland, Khin et al, 2009; Sutherland, Khin et al, 2019].

#### 4.5 Корундоносные комплексы за рубежом

Благодаря высокой твердости корунд накапливался в россыпях и добывался в Юго-Восточной Азии еще в глубокой древности. Долгое время этот регион был единственным источником благородного корунда в античном мире. Позже основными районами его добычи стали Индия, Австралия, Танзания, Бразилия и др.

4.5.1. Всемирно известный Могокский рубиноносный район в Мьянме с древнейших времен является источником драгоценных камней (рис. 4.16, А, Б).

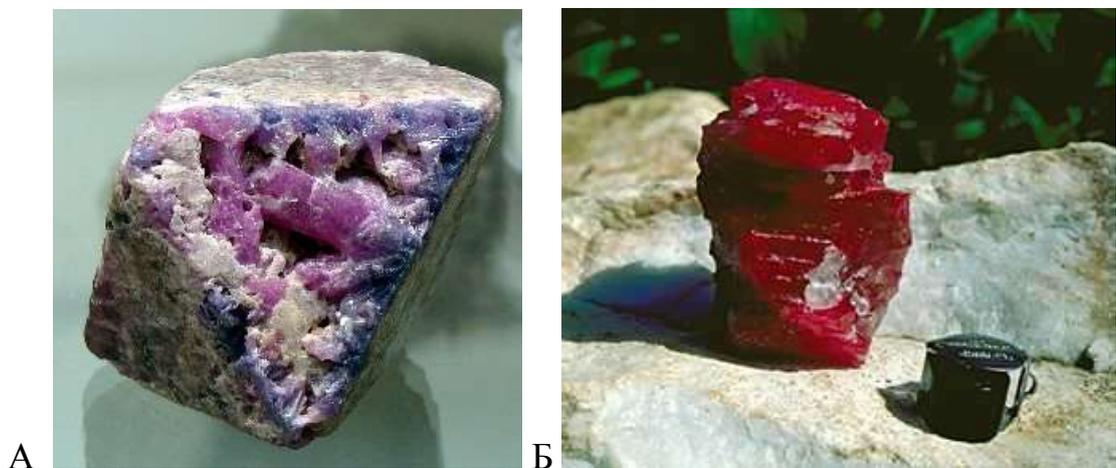


Рисунок 4.16, А, Б Кристаллы корунда (Могокский рубиноносный район). (Минералогический музей им.А.Е.Ферсмана РАН).

Фото © А.А. Евсеев

Цейлонские сапфиры известны с глубокой древности своим прекрасным качеством и широким диапазоном цветов. В Шри-Ланке найдены сапфиры всех известных цветов. Именно здесь произвели самые большие сапфиры в мире. Шри-Ланка является практически единственным поставщиком на мировой рынок наиболее ценных голубых звездчатых сапфиров, обладающих оптическим эффектом. Их добыча производится из многочисленных аллювиальных россыпей месторождений на юго-западе страны в районе города Ратнапура [Wells, 1956; Silva & Siriwardena, 1988].

В Таиланде разработки месторождений благородного корунда ведутся с 1850 г., со времен королевства Сиам. В окрестностях г.

Мантабури из россыпей добываются преимущественно сапфиры, в т.ч. синие и черные сапфиры с астеризмом. Этот эффект у черных сапфиров вызван обильными включениями тонкопластинчатого гематита. К востоку от г. Чантхабури, на месторождениях Бо Рай и Бо Ваен встречаются рубины красивой красной окраски, но с ослабленным блеском рубин латайский, коричнево-красные и зеленые сапфиры. Бесцветные и желтые корунды с этих мест подвергаются отжигу и превращаются в золотисто-желтые сапфиры. Добываемые здесь рубины составляют около 70 % всех рубинов мирового рынка [Choowong, 2002].

Главные месторождения находятся на юго-востоке страны у побережья Сиамского залива, у г. Пайтнава-на, вблизи г. Чантхабури и на границе с Камбоджей. Другой район месторождений сапфира в Таиланде располагается в провинции Канчанабури, в 120 км западнее г. Бангкока. Здесь с 1920 г. в коре выветривания базальтов разрабатывается месторождение Бо-Плуа (Бо-Плой). Сапфиры имеют густо-синий бархатистый цвет, но с зеленоватым оттенком. Васильковые или сиамские сапфиры из Таиланда высоко ценятся в Англии [Gubelin, 1965; Barr & Dostal, 1986; Tzen-Fu Yui et al., 2006].

В Индии древнейшее месторождение рубина известно в штате Орисса, у Калаханди. Другие месторождения благородного корунда находятся в штате Раджастан, вблизи Джан-али; в штате Мадхья-Прадеш, около Пипра; и в штате Тамиланд [Brown, 1956; Буканов, 2014]. В штате Карнатака в р-не Алипура, вблизи г. Майсура, встречены биотит-силлиманитовые гнейсы с непрозрачными рубинами камень алипурский. Их крупные просвечивающие кристаллы с эффектом астеризма размером до 5x12 см пригодны только для изготовления коллекционных шаров и кабошонов массой до 100 карат. На севере страны в штате Джамму и Кашмир, вблизи г. Сумджана, на р. Бхутна, с 1880 г. разрабатываются россыпи, где добывается рубин цвета голубиной крови. В том же районе, в горах Занскара, были обнаружены бархатистые васильково-синие

кашмирские сапфиры и начата их разработка. Здесь в каолинизированных пегматитах находили кристаллы до 7,5x12,5 см длиной, в т.ч. сапфир массой 998 карат [Буканов, 2014].

В Непале, на севере от г. Катманду, в окрестностях Тапледжунг, в 1982 г. в мраморах было открыто месторождение розовых и фиолетовых сапфиров.

Новый перспективный р-н на Индокитайском полуострове выявлен во Вьетнаме, где открыт целый ряд месторождений с рубином, розовым и пурпурным сапфиром [Garnier et al., 2005; Smirnov et al., 2006] (рис. 4.17). В Китае месторождения сапфиров и рубинов открыты в провинциях Фуцзянь, Хейлунцзян, Хэбэй, Цзян-су, Шаньдун, Юньнань и на о-ве Хайнань. Сапфиры Китая похожи на австралийские [Буканов, 2014].

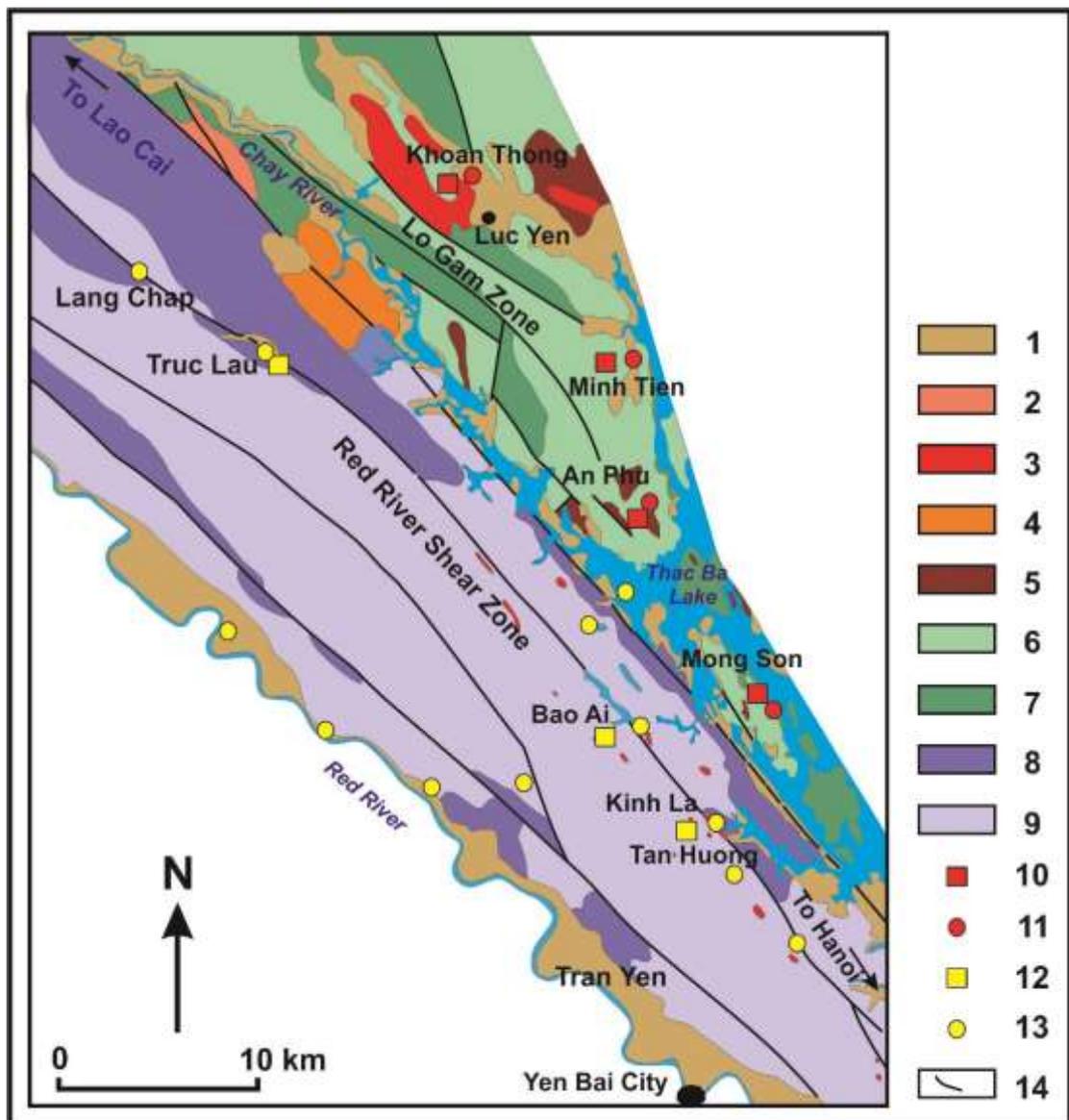


Рисунок 4.17 осадки четвертичного периода; 2 – осадки (неоген); 3 – палеоцен; триас: 4 **Nui Chua Complex**: пироксеновое габбро, габбродиорит, роговообманковый диорит; 5 - комплекс **Phia Bioc**: биотитовый гранит, пегматит и аплит; неопротерозой-кембрий: 6 формация **Phu**: графитосодержащий мрамор, двуслюдяной сланец; 7- **Thac Ba Formation**: кварц-сланцевый сланец, эпидот-биотит-роговообманковый сланец, мрамор; 8 – формация **Ngoi Chi**: кварц-биотит-силлиманит-гранатовый сланец, амфиболит, мрамор; 9 – формация **Nui Voi**: биотит-силлиманитовый гнейс, амфиболовый гнейс, диопсидовый мрамор. Месторождения корунда площадь **Khoan Thong–An Phu**: 10 - коренное; 11 – россыпное; площадь **Tan Huong–Truc Lau**: 12 - коренное; 13 – россыпное; 14 - разломы

В Пакистане, у его северо-западной границы с Афганистаном, в окрестностях Тимагара, в 1960 г. открыто более 10 месторождений рубина в толще мраморов по долине р. Хунза [Gübelin, 1982]. При высоком содержании рубина в породе размер кристаллов не превышает 15 мм.

Мраморы с рубинами характерны и для Афганистана, где в 50 км к востоку от Кабула известно древнее месторождение рубина Джегдалек, вблизи г. Сороби [Геология и полезные..., 1980 а,б; Grew et al., 1988; Bowersox 1995] (рис. 4.18).

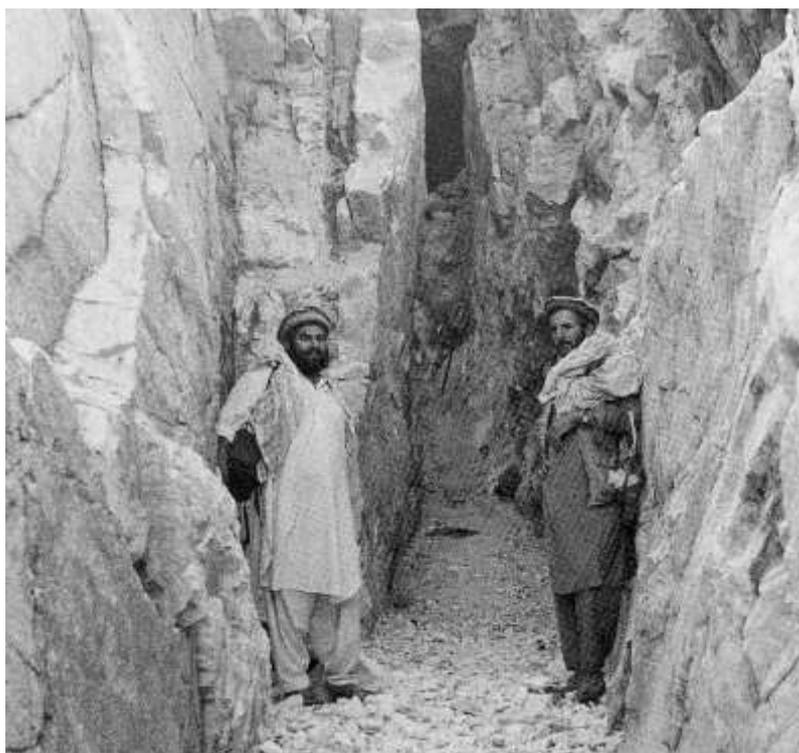


Рисунок 4.18 Разработка рубиновой залежи месторождения Дежгдаллек в Афганистане (батискаф фото saholu автора)

К вторичным кварцитам месторождения Семиз- Бугу, которые являются гидротермально- метасоматическими породами, приурочены мусковит- корундовые и андалузит- корундовые линзовидные и жилообразные тела и гнезда. В самих кварцитах вкрапленность корунда тоже присутствует [ Озеров, 1933; Судовикова, 1963]. Крупные месторождения абразивного корунда приурочены к вторичным кварцитам.

Первые крупные месторождения сапфира в щелочных базальтоидах были открыты в 1854 г. в штате Новый Южный Уэльс ( район Новой Англии, у гг. Инверелл и Глен- Иннес), а в 1870 г. подобные месторождения найдены в штате Квинсленд у г. Анаки, на площади около 900 км<sup>2</sup> [ Sutherland & Coenraads, 1996; Sutherland & Schwarz, 2001].

*Австралия*

Первые крупные месторождения сапфира в щелочных базальтоидах были открыты в 1854 г. в штате Новый Южный Уэльс ( район Новой Англии, у гг. Инверелл и Глен- Иннес), а в 1870 г. подобные месторождения найдены в штате Квинсленд у г. Анаки, на площади около 900 км<sup>2</sup> [ Sutherland & Coenraads, 1996; Sutherland et al., 2004; Graham et al., 2004].

В настоящее время там добываются черные звездчатые сапфиры. Сопутствующими минералами являются пироп, кварц, турмалин и циркон. Типично австралийский, анакский или квинслендский сапфир характеризуется разнообразной окраской, иногда очень густой, часто зональной с сочетанием желтого цвета с зеленым и синим. При искусственном освещении глубокий синий цвет этих камней становится чернильным, зеленоватым или почти черным. Поэтому большинство такого сырья подвергается термообработке. Встречаются камни с шелковистым блеском, астеризмом. Позже были открыты месторождения рубина на Северной Территории, у г. Харст- Рейнджс, с кристаллами

размером 5x12 см, массой до 5 кг; а также россыпи благородного корунда в штате Виктория. В Западной Австралии, на месторождении Пуна рубин и сапфир встречаются вместе с александритом, изумрудом и топазом. В россыпях Юго- Восточной Австралии, в штатах Новый Южный Уэльс и Виктория, известны находки полупрозрачного рубина барклиита, пригодного лишь для огранки кабошоном. В настоящее время Австралия является основным поставщиком сапфиров на мировой рынок [ Буканов, 2014].

#### *Тасмания*

Россыпи благородного корунда найдены на северо- восточной и северо- западной оконечностях о. Тасмания, где масса отдельных кристаллов сапфира достигает 245 карат.

#### *Новая Зеландия*

В южной части о- ва Новая Зеландия обнаружены валуны зеленой турмалин- фукситовой породы метасоматического происхождения с включениями рубина и сапфира. Порода является новым поделочным камнем с торговым названием гудлетит [ Буканов, 2014].

#### *Африка*

Перспективна Восточная Африка. Рубины из Кении и Танзании удивляют, еще со времен их открытия в 60-х годах, своим красивым насыщенным цветом, варьирующим от светло- до темно- красного [ Pardieu & Senoble, 2005; Буканов, 2014]. Рубины хорошего цвета, качества и размера очень редки. Преобладают камни обычного среднего класса. Из стран Африки по числу месторождений с благородным корундом лидирует Танзания 14. Наиболее интересное находится у оз. Маньяра, вблизи пос. Маджи- Мото, где вместе с рубином добываются александрит, изумруд и другие самоцветы. В том же районе добывались прекрасные оранжевые сапфиры. Месторождения залегают в гипербазитах, которые образуют сравнительно небольшие тела среди гнейсо- амфиболитовых полей протерозойской системы Узагоды. В районах месторождений

распространены пегматиты. В 1980 г. еще одно месторождение прозрачного рубина открыто в провинции Морогоро, у пос. Махенге, в 100 км к югу от г. Матомбо (рис. 4.19).

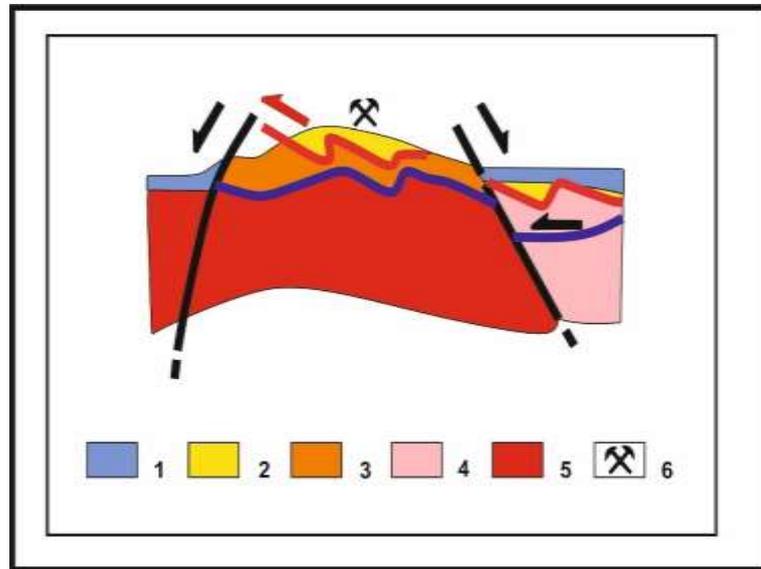


Рисунок 4.19 Геологический разрез области шпинели и рубина Mahenge, Танзания ( по Le Goff et al., 2008)

Условные обозначения: 1 – осадочные породы; 2 – мрамор, метаморфизованный песчаник; амфиболиты; 3 – гранулиты; 4 – фундамент мезопротерозойский; 5 – фундамент палеопротерозойский; 6 – рудник Mahenge

Они находятся в пределах Мозамбикской протерозойской складчатой области, в которой развиты горные породы системы Узагода: гранито-гнейсы, гранулиты, мраморы, гнейсы и кристаллические сланцы с кианитом, гранатом, роговой обманкой, слюдой и графитом. Интрузивные породы представлены крупными массивами анортозитов и мелкими телами норитов и пироксенитов. К более поздним, со-складчатым образованиям относятся граниты и связанные с ними мигматиты [Altherr et al., 1982].

Месторождения Лонгидо и Умбы принадлежат к группе типичных корундовых плагиоклазитов ряда плюмазита кыштымита и отличаются от них от грубо- до гигантозернистой структурой и наличием крупных кристаллов благородного корунда [Hintze, 2010]. Лейк-Маньяра — месторождение изумруда с акцессорным рубином. По данным [Solesbury,

1967], жилы плюмазитов с благородным корундом приурочены к осевой и эндоконтактовой частям массива серпентинитов, залегающего в ядре брахиантиклинальной складки меридионального простирания.

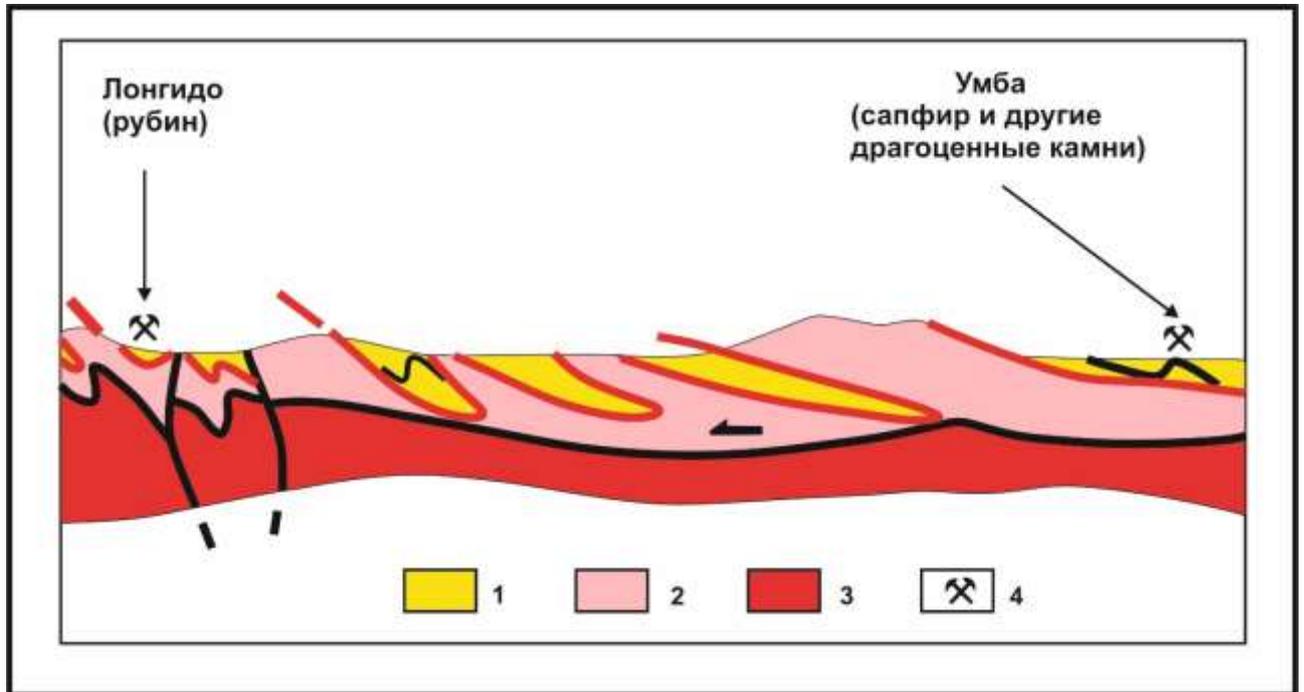


Рисунок 4.20 Геологический разрез области добычи корундов на севере Танзании ( по Le Goff et al., 2008)

1 – осадочные породы; 2 – мрамор, метаморфизованный песчаник, амфиболиты; 3 – докембрийский фундамент; 4 – рудники ( Longido, Umba)

К числу наиболее изученных принадлежит месторождение рубина и сапфира в районе р. Умбы, расположенное в 67 км к северо-востоку от морского порта Танга.

Помимо Танзании, самые значимые месторождения в Кении расположены в долине Умба. В 1974 г. открыто месторождение рубина между г. Танта-Хилз и Национальным парком Тсаво. В северной части страны, у г. Лодвара в базальтах на восточном берегу оз. Туркана найдено месторождение синего сапфира с проявлением астеризма ( Simonet, 2000; Simonet et al., 2004).

К югу от Танзании в Малави выявлено месторождение рубина и разноцветного сапфира-танзания. Оно находится в 70 км южнее оз. Ньяса, у г. Чимвадзули-Хилл, вблизи границы с Мозамбиком.

На юго-западе Руанды, вблизи г. Циангугу, в щелочных базальтах открыто месторождение темно-синего сапфира с кристаллами крупного размера массой до 12 карат [Krzemnicki et al., 1996].

В Зимбабве добываются разной окраски сапфиры, в т.ч. с зональные - кремово-белые в центре и синие по краям с размером кристаллов до 7 см. Из этой страны на рынок поступают также черные звездчатые сапфиры.

В провинции Трансвааль, у г. Судимани-Спрейт, обнаружено месторождение рубина, где встречаются непрозрачные кристаллы массой до 152 кг, размером 60x30 см в пегматитах [Hall, 1920; Cairncross & Dixon, 1995].

В южной части острова Мадагаскар открыты месторождения рубина Гогого и Эджеда. Еще одно месторождение рубина и сапфира находится в центральной части острова у г. Антанифотси. На юге острова в последние годы открыты новые месторождения сапфира в районе г. Бекили, Андрано-Ндамбо, Абоасари и Сакахара. В 1996 г. на северной оконечности острова, вблизи от пос. Амбилубе, в районе г. Амбоудрохефеа, открыто месторождение синего, сине-фиолетового и коричнево-красного сапфира с кристаллами длиной до 2 см [Буканов, 2014].

Мадагаскарские сапфиры из южных месторождений наиболее похожи на цейлонские, обладают богатой цветовой гаммой, но они значительно отстают от цейлонских по полноте кристаллизации. В них много минеральных и газовых включений, трещиноваты. Для искусственного лечения трещин и полостей был разработан метод с использованием свинцового стекла. По наличию природных бесцветных и розовых сапфиров Мадагаскар относится к мировым лидерам.

### *США*

В США нет крупных месторождений благородного корунда.

В 1894 г. были открыты месторождения сапфира в штате Монтана, приуроченные к дайке лампрофиров (Його- Крик и Його- Галч) [ Slabaugh, 1952; Hughes, 1997]. Камни добывались как из самой дайки, так и из щебенки, образующейся при ее выветривании. Цвета сапфиров Монтаны весьма разнообразны, нередко они бледно- голубые или сине- стальные. На этих месторождениях добываются монтана- сапфиры и його- сапфиры, обладающие ярко- васильковой окраской, и не меняют цвета при искусственном освещении. Таблитчатые и ромбоэдрические формы кристаллов сапфира, особенно характерны для месторождений штата Монтана. В ограненном виде они обычно не более 1 карата, самый крупный имел массу 10,2 карат. Разработка месторождения была прекращена в конце 20-х годов XX в., но затем опять возобновлена [ Hughes, 1997].

В штате Северная Каролина известно небольшое месторождение рубина Кови- Крик. Там в песчаной золотоносной породе месторождения попадаются мелкие таблитчатого облика рубины ювелирного качества. Золотоносная россыпь с рубинами протянулась на 5 км. Хотя в кристаллах имеются включения и трещины, из некоторых экземпляров удается огранить камни массой один- два карата, а в исключительных случаях три- четыре карата [ Steven & Youkovich, 1985; Буканов, 2014].

### *Южная Америка*

На южно- американском континенте первенство по месторождениям рубина и сапфира принадлежит Бразилии [ Principais depositos..., 1991; Буканов, 2014], где они связаны преимущественно с пегматитами. Наиболее крупные месторождения находятся в штате Баия у г. Ситиу да Джибоя, вблизи г. Барра- Ингединьо, у г. Нее, близ г. Жакобин и Капим- Гроссо. В штате Минас- Жерайс у г. Триангола- Минеиро, вблизи г. Малакачеты.

В штате Гояс относительно крупные непрозрачные кристаллы бразильского сапфира добываются на месторождениях Санта- Терезинья и

Портейрас. Другие месторождения сапфира имеются в штате Мату-Гросу де Сул у г. Рио-Коксим, в штате Сан-Паулу у г. Итака, в штате Санта-Катарина у г. Барра-Велха.

В Колумбии месторождение рубина и разноцветных сапфиров находится в области Рио-Майо, вблизи г. Меркадерес, округ Каука.

### *Европа*

Из месторождений в Европе следует отметить небольшое месторождение благородного корунда Лох-Родж, на о. Льюис в Шотландии. Там добывали пригодные для огранки сапфиры длиной до 5 см. В Македонии в доломитовых мраморах у г. Прилепа находят полупрозрачные розовые корунды. Несмотря на их длину до 15 см и массу до 1,4 кг они пригодны только для производства шаров и кабошонов. Находки корундов обнаруживаются в различных странах.





Рисунок 4.21 - Корунды мира (124)

1. Кристаллы красного корунда на шестоватом агрегате пейнита. Wet Loo Mine, Могок, Мьянма ( быв. Бирма). (В. Левицкий). Образец: Тусон-шоу-2010. Источник: [http:// www.rusmineral.ru/info/news.php](http://www.rusmineral.ru/info/news.php)

2. Псевдоморфоза красного корунда по кристаллу шпинели. Rein Pyit, близ Могок, Мьянма ( быв. Бирма). (В. Левицкий). Образец: Тусон-шоу-2010. Источник: [http:// www.rusmineral.ru/info/news.php](http://www.rusmineral.ru/info/news.php)

3. Левицкий В.: « Кристалл красного корунда с месторождения Снежное на Памире». Образец: Денвер- шоу-2009. Фото: [http:// www.rusmineral. ru/](http://www.rusmineral.ru/)
4. Корунд. Ратнапура, Шри- Ланка. 3x1,5 см. Образец: ФМ (№ 86706; Larsen W., 1990). Фото 1-2: А.А. Евсеев
5. Корунд. Шри- Ланка. Образцы: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (ПДК-4757). Фото: © А.А. Евсеев
6. Корунд бесцветный ( лейкосапфир). Ратнапура, Шри- Ланка. Образец: ФМ (№30373, Черник Г.П., 1920)
7. Корунд. Индия ( кристаллы до 20 см), (В. Левицкий). Образец: Тусон- шоу-2010. Источник: [http:// www.rusmineral. ru/ info/ news. php](http://www.rusmineral.ru/info/news.php)
8. Корунд. Сев. Гималаи, Непал. Веретенообразный кристалл призматического габитуса (10x0, 8 см). Образец: ФМ (К-4624. Дар Языковой М.Ю. Запись 1992 г.). Фото: © А.А. Евсеев
9. Синий корунд на слюдистом сланце. Месторождение: Taplejung District, Mechi Zone, Nepal. Источник: [http:// www. pegmatite. ru/ Mu\\_ Collection/ exchange/9corundum. htm](http://www.pegmatite.ru/Mu_Collection/exchange/9corundum.htm)
10. Кристалл корунда в слюдите. Кокча долина, Афганистан \ Kokcha valley, Afghanistan. Образец: Тусон- шоу-2009. Фото: [http:// www.rusmineral. ru/ info/ news. php](http://www.rusmineral.ru/info/news.php)
11. Корунд ( рубин) в мраморе. [ Вьетнам]. Мюнхен- шоу-2007. Фото: © М. Моисеев
12. Корунд. Гвинея. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№92288, Сурков А.В.). Фото: © А.А. Евсеев
13. Корунд. Новый Южный Уэльс, Австралия. ~2-3 см. Образец: ФМ (№48413). Фото: © А.А. Евсеев
14. Корунд ( разн. рубин), биотит, альбит. Kleggasen Ruby Quarry, Froland, Agundel, Aust- Agder, Норвегия. (В. Левицкий). Образец: Тусон- шоу-2010. Источник: [http:// www.rusmineral. ru/ info/ news. php](http://www.rusmineral.ru/info/news.php)
15. Корунд. Розовые кристаллы в мраморе. Бела- Водица\ Vela Vodica, быв. Югославия. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№№74291, 74292. пост. 1972 г.). Фото: © А.А. Евсеев
16. Корунд. Мадагаскар. Высота ~10 см. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН. Фото: © А.А. Евсеев
17. Корунд. Пакака, Мадагаскар. Образец: ФМ (К-4863. Дар: Булгак Л.В., 2001). Фото: © А.А. Евсеев
18. Крупный многоголовый кристалл синего корунда с Мадагаскара. Его вес почти 20 кг. (В. Левицкий)
19. Корунд с Cr- цоизитом. Танзания. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№91123, Булгак Л.В, 2002). Фото: © А.А. Евсеев
20. Корунд в цоизите. Танзания. ~9 см. Образец: Геологический музей им. В.В. Ершова ( МГГУ). Фото: А. Евсеев
21. Корунд. Трансвааль, ЮАР. ~13 см. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН. Фото: А. Евсеев

22. Слегка окатанный кристалл синего корунда из Бразилии, его вес более 10 кг. (В. Левицкий). Образец: Тусон-шоу-2010

23. Эти веретёновидные кристаллы корунда были собраны из множества фрагментов. San Jacinto, California, USA. Образец: Тусон-шоу-2010. Источник: <http://www.rusmineral.ru/info/news.php>

24. Кристалл корунда. San Jacinto Peak, Riverside Co., California, USA. Образец: Тусон-шоу-2009. Фото: <http://www.rusmineral.ru/info/news.php>

Рубиноносные слюдиты, подобно изумрудоносным, могут быть подвергнуты обогащению с целью извлечения драгоценного камня. Такая опытная попытка предпринята при разработке коренных месторождений на севере Пакистана, связанных с рубиноносными мраморами. Здесь рубин образует крупные локальные скопления, пригодные для эксплуатации. Аналогичные месторождения разрабатываются старателями в Афганистане.

#### 4.6 Исследования корундоносных комплексов России

В России крупных месторождений ювелирного корунда пока не выявлено.

На территории РФ найдены непрозрачные кристаллы корундов. Они известны на Среднем Урале (деревня Мурзинка) и Южном Урале (Ильменские, Вишневые и Потанины горы) [Кузнецов, 1926; Русаков, 1927; Озеров, 1933; Кисин, 1991; Kisin et al., 2016].

В 1823 г. были обнаружены голубые сапфиры в Борзовских россыпях близ Кыштыма [Коптев-Дворников, Кузнецов, 1931]. В начале прошлого столетия в Ильменских и Вишневых горах отрабатывались корундовые сиенит и миаскит-пегматиты, из которых было добыто много кристаллов сапфиropодобного корунда и получено небольшое количество ювелирного материала, пригодного для огранки очень мелких камней типа «искра». У деревни Бызовой разрабатывалась рубиноносная жила плагиоклазита, из которой получено небольшое количество призматических кристаллов кроваво-красного рубина. В 1858 г.

прозрачные синие сапфиры встречены в Корниловом логу, откуда и был огранен камень, подаренный Александру II, а также рубины у дер. Колташи, под Екатеринбургом [Кашицин, 2006].

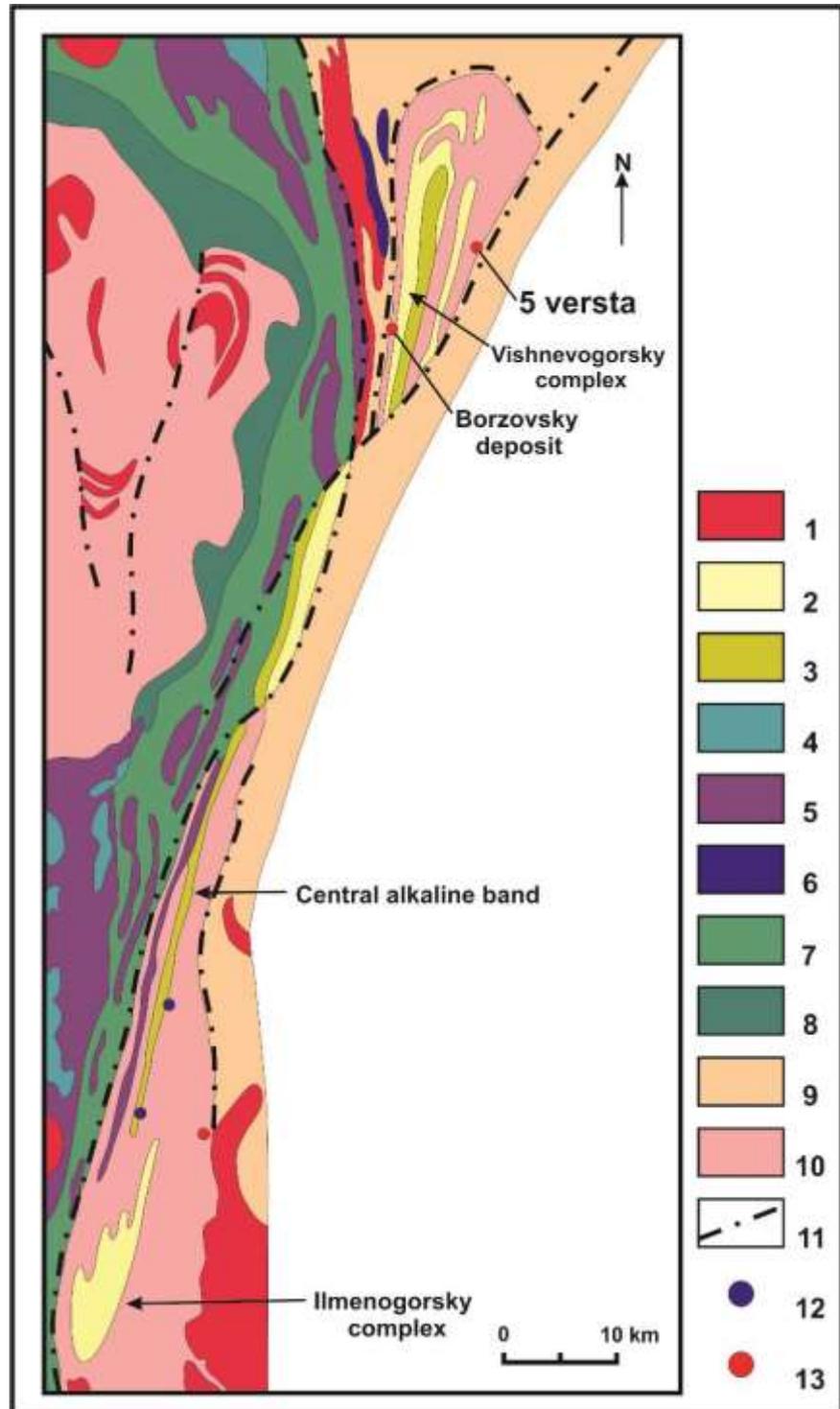


Рисунок 4.22. Геология Ильменогорско-Вишневогорского щелочно-карбонатитового комплекса [Kissin et al, 2020]

Условные обозначения: 1 – граниты; 2 – миаскиты Вишневогорского комплекса, граниты; 3 – метасоматиты центрального щелочного свода

(фениты, полевошпатовые и силикат-карбонатные метасоматиты, карбонаты и миаскиты); 4 – габбро-офиолитовая формация; 5 - метаультрамафитовые породы офиолитовой формации; 6 – метаультрамафиты былдумского, каганского и няшевского комплексов; 7 – вулканогенно-осадочные формации Тагил-Магнитогорского мегасинклиория; 8 – гранат-слюдистые сланцы и эклогиты восточной части Уфалейского массива; 9 – плагиоклазовые сланцы и кварциты Сысертско-Ильменского комплекса; 10 – плагиогнейсы, гранит-мигматиты, кристаллические сланцы, амфиболиты, кварциты Сысертско-Ильменского и Уфалейского комплексов; 11 - тектонические разломы; 12 – корунды сиенитовых пегматитов; 13 – корундсодержащие метаультрамафиты

На Полярном Урале в 1975-1978 гг. разрабатывалось месторождение рубина Макар-Рузь в дайке плагиоклазитов в дунитовом массиве Рай-Из. Здесь же описаны проявления рубина в слюдитовых жилах и в слюдитовых зонах плагиоклазитов в гипербазитах [Заварицкий, 1932; Кашинцев 1972; Щербакова, 1976].

В Северной Карелии известны проявления в амфиболитах Дядиной горы и в высокоглиноземистых гнейсах Хитострова [Лебедев, Калмыкова, Нагайцев, 1974; Громов, 1993; Терехов, Левицкий, 1991]. На Кольском полуострове в ксенолитах роговиков Хибинского щелочного массива на горе Эвелогчорр были найдены сильно трещиноватые сапфиры, а темно-синие прозрачные кристаллы сапфира недавно встречены в сиенитовых и миаскитовых пегматитах [Меньшиков, 1978; Михайлова и др., 2006].

В 1980-х годах в пегматитах Прибайкалья выявлен ряд находок сапфира. На о. Ольхон найден звездчатый сапфир до 15 см в поперечнике, а также в Туве на хр. Сангилен. В Приморье прозрачные сапфиры попутно извлекались в золотоносной россыпи по р. Б. Уссурка, а на Первомайском проявлении, на хр. Малый Хинган, они обнаружены в корях выветривания щелочных базальтов. Корунд отмечен в бокситах Салаирского кряжа ( Кемеровская обл.) [ Левицкий, Павлова, 1998; Татаринов и др., 1992; Высоцкий и др.; 2002; Высоцкий, Баркар, 2006].

К настоящему моменту комплексное циркон- сапфир- золотоносное (с вольфрамом) Незаметнинское месторождение считается наиболее

перспективным в России и обладает ресурсами корундов, по разным оценкам, от 976 до 1795 кг (в пересчете к условно приведенным запасам категории С<sub>2</sub>).

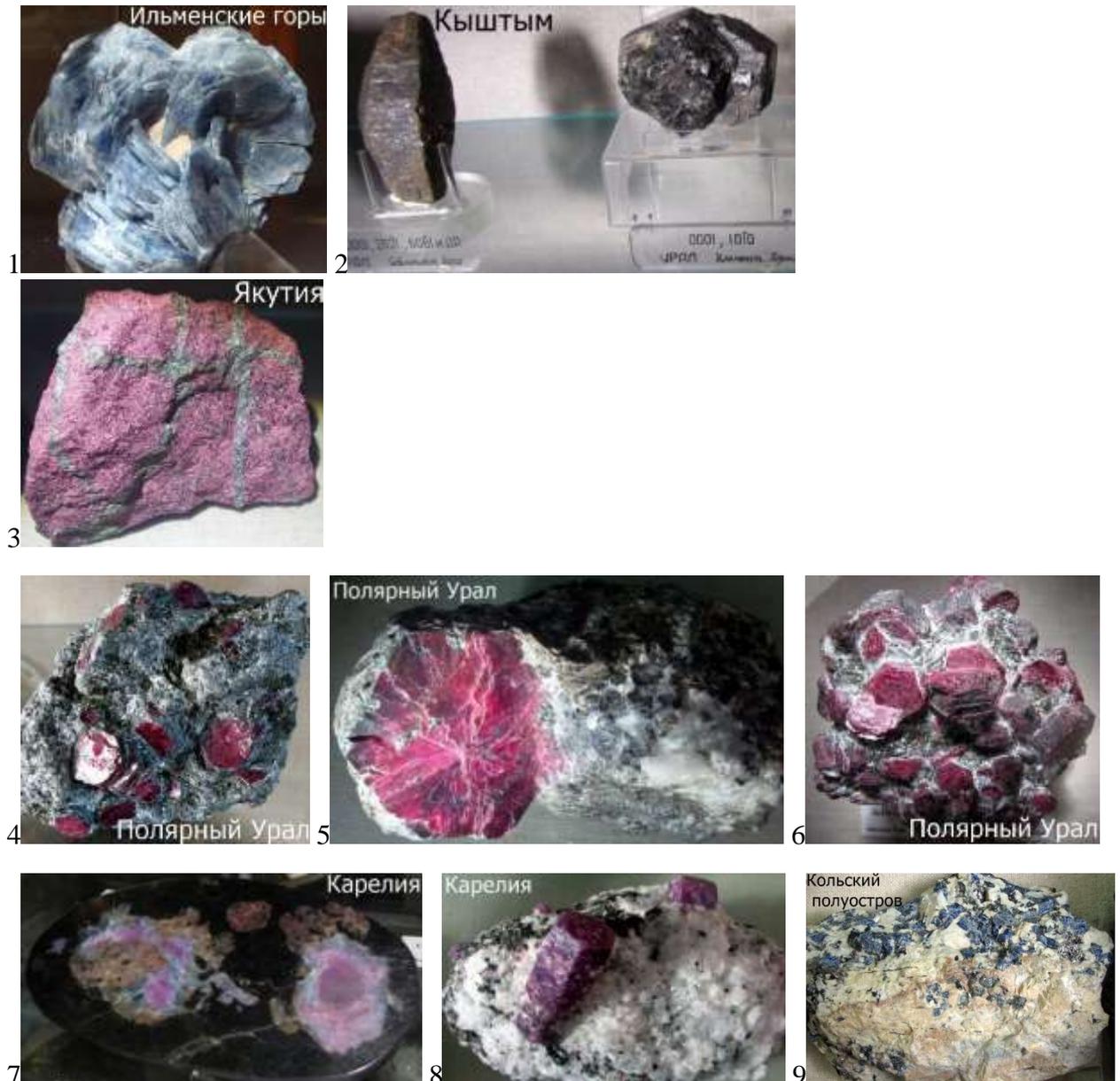


Рисунок 4.23, 1–9 Корунды России

1. Корунд [ Копь 298], Ильменские горы, Ю. Урал. Около 10 см. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН. Фото: © А.А. Евсеев. Источник: [www.fmm.ru](http://www.fmm.ru)

2. Корунды Южного Урала, Соймоновская дача и Ильменские горы, Россия. Образцы: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН. Фото: А. Евсеев

3. Корунд (сод. Cr). Зернистый агрегат с кианитом. Чайныт, юг Якутии, Россия. Образец: ФМ (№38532). Фото: © А.А. Евсеев

4. Корунд Рай-Из м-в, Полярный Урал, Россия. Кристаллы до ~2-3 см. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№89011. Обмен 1997 г.). Фото: © А.А. Евсеев

5. Корунд (рубин). Таблитчатый блочно- секториальный кристалл с флогопитом и хромпикотитом в плагиоклазите. Рай- Из м-в, Полярный Урал, Россия. Диаметр кр-ла ~3 см. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№88412). Фото: © А.А. Евсеев

6. Корунд. Рай-Из, Полярный Урал. Образец: Образец: ФМ. Фото: © А.А. Евсеев

7. Корунд, кианит, альмандин, рутил в амфиболите. Дядина гора, Сев. Карелия, Россия. Образец: ФМ (№92929. Дар: Белаковский Д.И., 2010). Фото: © А.А. Евсеев

8. Корунд. Хитостров, Сев. Карелия, Россия. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№90216. Приобретение, 2000 г.). Фото: © А.А. Евсеев

9. Корунд, ортоклаз, биотит. Вуоннемиок р., Хибины, Кольский п-ов, Россия. Образец: Мин. музей им. А.Е. Ферсмана РАН (№78606, салон «Цветные камни», 1977). Фото: © А.А. Евсеев

#### 4.6.1 Рубин проявления Рай-Из (Полярный Урал)

Рай- Из – горный массив, с которого начинается южная часть Полярного Урала.



Рисунок 4.24 Горный ландшафт, массив Рай- Из ( [https:// uraloved. ru/ mesta/ sever- urala/ massiv- raj- iz](https://uraloved.ru/mesta/sever-urala/massiv-raj-iz)

На Полярном Урале в 1975-1978 гг. разрабатывалось месторождение рубина Макара-Рузь в дайке плагиоклазитов в дунитовом массиве Рай- Из.

Здесь же описаны скопления рубина в слюдитовых жилах и слюдитовых зонах плагиоклазитов в гипербазитах [Кашинцев 1972; Щербакова, 1976]. В эндоконтакте массива отмечаются интрузивные породы более поздних габбро- плагиогранитной и диорит- гранодиоритовой магматических формаций, а в экзоконтакте распространены осадочно- вулканогенные образования, испытавшие региональный метаморфизм амфиболитовой фации. По данным С.В. Щербаковой [Щербакова, Сутурин, 1990], выделяются два типа пространственно разобщенных рубинсодержащих тел: плагиоклаз- рубиновых и слюдит- рубиновых. Плагиоклаз- рубиновые тела развиты в южном эндоконтакте массива в основании дунитового горизонта, где распространены линзы гигантозеристых дунитов и шлиры хромита. Плагиоклазитовые тела с рубином локализуются в узлах пересечения тектонических трещин меридионального и северо- восточного простирания. Длина тел 30 м, мощность 2022 м, падение под углом  $5085^\circ$ . Характерная особенность этих тел их симметрично- зональное строение. В центре выделяется плагиоклазитовое ядро (мощность 1,52,5 м), которое окружено слюдистой зоной с рубин- флогопитовой подзоной и реликтовыми участками плагиоклазита; затем следует амфиболовая зона с реликтами габброидной породы. Плагиоклазит- рубиновые тела от вмещающих дунитов отделяются хлорит- тальковой, карбонатно- тальк- серпентиновой и серпентиновой подзонами .

Для плагиоклазитового ядра плагиоклазит- рубинсодержащих тел характерно присутствие плагиоклазов разной основности. Кроме того, рассматриваемые тела характеризуются щелочным составом амфибола (приближается к хромсодержащему паргаситу), образующего амфиболовую зону.

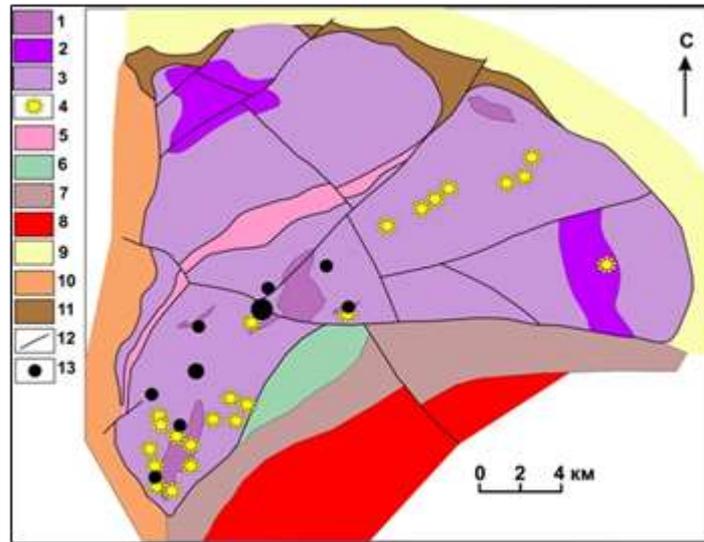


Рисунок 4.25. - Схематическая геологическая карта массива Рай-Из по [Щербакова, Сугурин, 1990] с использованием материалов геологической съемки А.П. Прямоносова, 2001 г. Адаптированный вариант с использованием цветовой гаммы представлен

Н.Г. Барновым, 2017

1–3 – райизско-войкарский дунит-гарцбургитовый комплекс: 1 – дуниты, 2 – гарцбургиты, 3 – нерасчленённый дунит-гарцбургитовый комплекс; 4 – внемасштабные тела плагиоклазитов; 5 – Центральная зона метаморфизма; 6 –полосчатость и направление её падения; 7–8 – кэршорский дунит-верлит-клинопироксенит-габбровый комплекс: 7 – нерасчленённые дуниты, верлиты, клинопироксениты, 8 – габбро; 9 – плагиограниты и тоналиты собского комплекса; 10 – филлитовидные сланцы нижнего палеозоя (орангская свита); 11 – кристаллические сланцы и гнейсы хараматалоуского комплекса; 12 – зоны серпентинитового меланжа; 13 – месторождения и рудопроявления хромитов

Слюдит- рубиновые жилы сконцентрированы в юго- западном контакте массива Рай- Из, в зоне интенсивной энстатитизации гипербазитов и развития хлоритовых и актинолит- тальковых жил. Они локализуются в местах пересечения субширотных и северо- восточных тектонических трещин.

Кристаллы темно- красного цвета, пластинчатые или бочонковидные, размер кристаллов 115 см в поперечнике. Рубин полупрозрачен, переполнен тонкими включениями хромшпинелидов, плагиоклаза и слюды и пригоден только для использования в качестве

коллекционного материала. Бездефектные, но мелкие кристаллы рубина наблюдаются в слюдит-рубиновых жилах.

Плагиоклазиты и слюдиты с благородным корундом в гипербазитах по С.В. Щербаковой [Щербакова, Сутурин, 1990] являются продуктом метасоматической деанортизации жил лейкократовых габброидов и анортозитом. Избыток глинозема в этом случае объясняется замещением основного плагиоклаза более кислым олигоклазом.

В данном подразделе приводится геолого-минералогическая характеристика двух разобщенных рубинсодержащих зон, рассмотренных выше. По мнению автора, имеющаяся информация позволяет использовать программный комплекс горно-геологической системы (ГГИС) Micromine для рассмотрения основных возможностей проектирования и расчета горных выработок на открытых и подземных работах [Григоровский, 2017]. Ключевыми параметрами ввода в этой программе являются экономические и горнотехнические условия, такие как прогнозируемые затраты на добычу и переработку корундовой руды, прогнозируемые затраты на рекультивацию, прогнозируемая прибыль от продажи корунда (рубина), прогнозирование затрат на добычу и складирование пустой породы и т.п.

#### 4.6.2 Рубины месторождения «Незаметнинское» (Хабаровский край)

Рубины месторождения Незаметнинское относятся к полигенным минералам. Они кристаллизовались как непосредственно из магматического расплава, так и в результате процессов метаморфизма и метасоматоза [Khanchuk et al, 2003; Пахомова и др., 2008]. Данный факт стал основной причиной включения этого отечественного месторождения в данную главу.

Целенаправленные работы на камнесамоцветы на площади этого месторождения и его окрестностей начали проводить с конца 1980-х годов, после сообщения геолога прииска «Приморский» И.Ф. Федчина о находках в золотоносных песках аллювия р. Кедровка сапфиров и

цирконов (гиацинтов). Незаметнинское коренное и россыпное месторождение золото-вольфрам-оловянного оруденения с благородными корундом и цирконом административно расположены в Красноармейском районе Приморского края, а с геологической позиции в пределах Самаркинской аккреционной призмы Сихотэ-Алиня [Пахомова и др., 2008]. На этой территории развиты главным образом гранитоиды маревского интрузивного комплекса. Все породы, исключая неогеновые базальтоиды и долериты, подвергнуты метасоматическим изменениям.

Корунды представлены в разной степени окатанными кристаллами и их обломками размером до 20 мм. Кристаллы имеют веретенообразный, боченковидный, пластинчатый и таблитчатый облик. Часто деформированы и корродированы. Излом неровный, иногда – ступенчатый. Цвет фиолетовато-синий, серовато-синий, синий, голубой, зеленовато-синий, сине-зеленый, зеленый, желтовато-зеленый, серовато-зеленый, пурпурный, коричневый, зеленовато-коричневый, жемчужно-серый. Окраска часто зональная, пятнистая. У некоторых корундов наблюдается сильный плеохроизм. Для коричневых, зеленовато-коричневых и жемчужно-серых корундов характерна «шелковистость», вызванная включениями игл рутила, встречаются кристаллы с эффектом астеризма [Одариченко и др., 2004].

В кристаллах корунда сохраняются сингенетичные включения (рис. 4.26). Они являются надежными реперами химизма среды и P-T-условий роста монокристаллов корунда в природе. Выделены среди них три группы: минеральные, расплавные и газовой-жидкие. Сингенетичность этих включений подтверждается присутствием индукционных поверхностей, угнетенностью форм минеральных индивидов, эпитаксиальным характером срастания с корундом-хозяином, а также особенностями расположения в кристаллах [Пахомова и др., 2008].

Из литературных данных известно, что граносиенитовые магмы на данном объекте определяются как источник корундов [Одариченко и др.,

2004; Пахомова и др., 2008]. Подавляющая масса гранитоидов представлена нормальными лейкогранитами калиево-натриевыми крайне и весьма высокоглиноземистыми, которые содержат акцессорные корунд и циркон. Присутствие среди незаметнинских гранитоидов высокоглиноземистых разновидностей, обнаружение в них и связанных с ними метасоматитах акцессорного корунда является ярким доказательством того, что эти породы относятся к коренным источникам корунда. Определяющими факторами для образования корунда становятся процессы ощелачивания магмы [Ханчук и др., 2002; Пахомова и др., 2008].

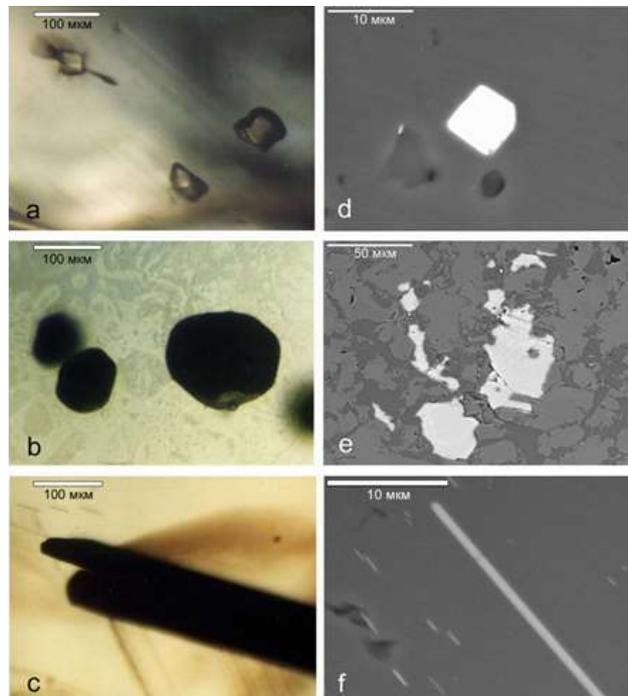


Рисунок 4.26.- Сингенетичные минеральные включения в корунде (а, b, с в проходящем свете; d, e, f в отраженных электронах): а — альбит, b — цинксодержащий герцинит, с - колумбит; d - циркон, e - флюорит, f - рутил (фото Э.Г. Одариченко [Одариченко, 2004])

Минеральный парагенезис сингенетичных включений в незаметнинских корундах (рутил, альбит, цинксодержащий герцинит, колумбит, циркон, флюорит и монацит) соответствует гранитоидному парагенезису стадии метасоматических преобразований, при этом среди минеральных включений в корундах минералы базальтового парагенезиса

не обнаружены. Кристаллизация корунда происходила в интервале температур 780–820 °С и давлений 1.7–3 кбар [ Одариченко, 2004]. Присутствие высокоглиноземистых разностей среди гранитоидов Незаметнинского штока, обнаружение в них и связанных с ними метасоматитах акцессорного корунда позволяет рассматривать эти породы в качестве основного коренного источника корунда [ Ханчук и др., 2002].

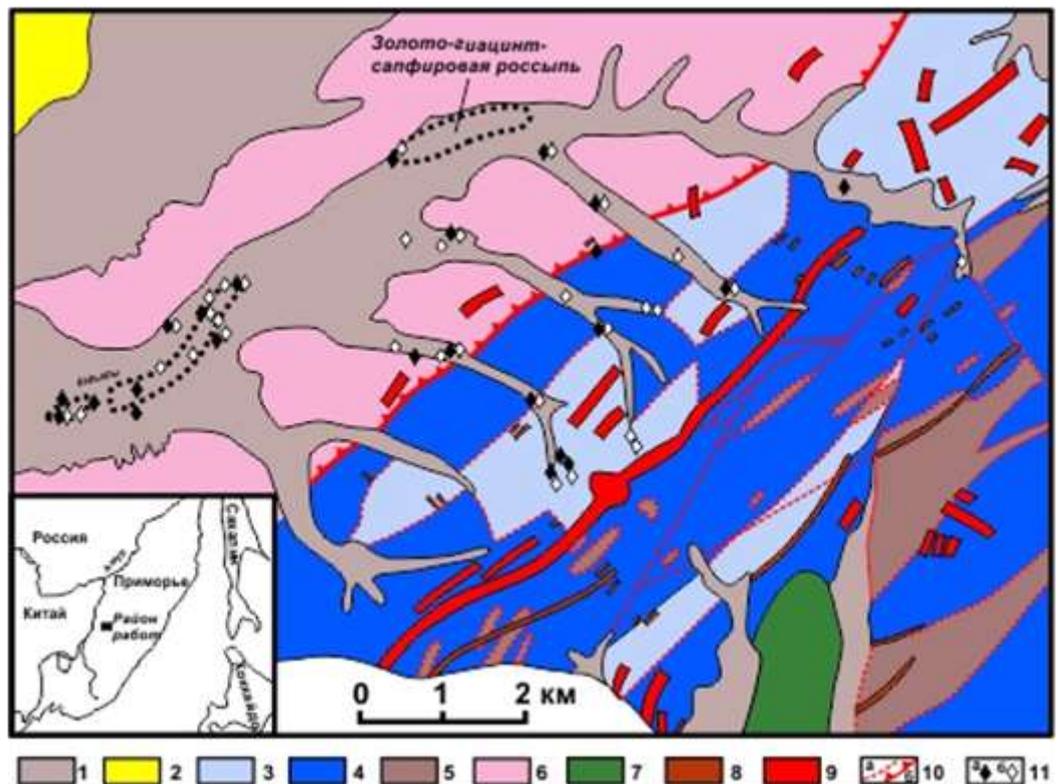


Рисунок 4.27 Схематическая геологическая карта бассейна р. Кедровка, Приморский край ( по А.А. Сясько, 1992 г. и А.Т. Кандаурову, 1994 г.).

1 – четвертичные и современные отложения; 2 – неогеновые конгломераты, песчаники, глины; 3 – средне-верхнеюрские турбидиты; 4 – верхнеюрские алевролиты и песчаники; 5 – триасовые плитчатые кремни, кремнисто-глинистые породы; 6 – верхнепермские песчаники, аргиллиты, алевролиты ( аллохтон); 7 – неогеновые базальты; 8 – позднеюрские диориты, габбродиориты, габбро, спессартиты, долериты, базальты); 9 – выходы тел раннемеловых гранитоидов; 10 разрывные нарушения: а – разломы; б – надвиги; 11 – находки в россыпи: а – корунда; б – циркона

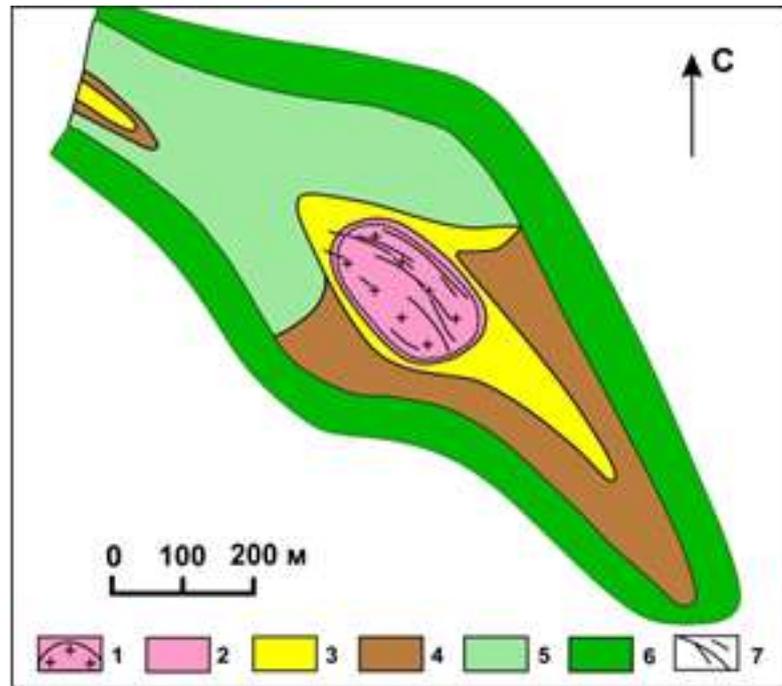


Рисунок 4.28 Схема метасоматической зональности Незаметнинского месторождения ( по материалам О.П. Макарова и др., 1991 г.).

1 – контур штока гранит- порфиров; 2 – грейзены ( кварц- серицит- мусковитовые и кварц- мусковитовые породы); 3, 4 осветленные породы (3 – кварц- серицитовые и кварц- серицит- альбитовые), 4 – кварц- альбитовые); пропилиты ( кварц- альбит- эпидот- актинолитовые породы); 6 – биоттовые роговики; 7 кварцево- рудные жилы

#### 4.6.3 Рубины Хитострова (северная Карелия)

Месторождение Хитостров наиболее продуктивное из проявлений корунда Карелии (Хитостров, Варацкое, Дядина Гора и др.), содержит до 57% коллекционных кристаллов корунда. Ресурсы коллекционного сырья на месторождении Хитостров подсчитаны на глубину 2 м, проведена его пробная отработка. Запасы корунда по категории С<sub>2</sub> оценены в 35,8 т [ Михайлов и др. 2006]. Основная масса с мелкими кристаллами корунда и граната в процессе геологического изучения не оценивалась.



Рисунок 4.29 Береговые невысокие скалистые откосы (месторождение Хитостров)

Ландшафт острова представляет собой благоприятное место для ведения открытых маломасштабных горных работ, связанных с добычей корундов (рис. 4.29).

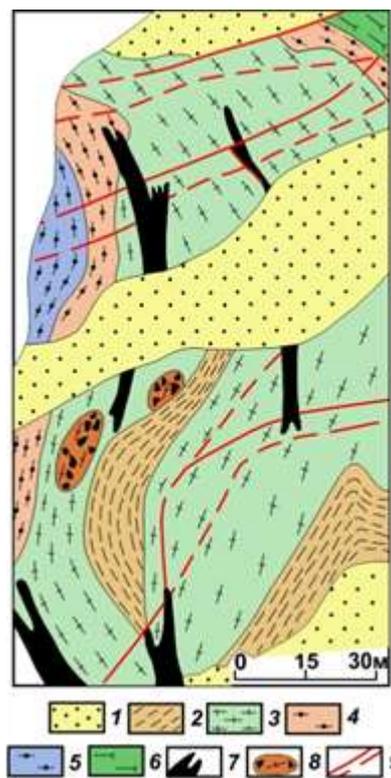


Рисунок 4.30 Схема геологического строения проявления корунда Хитостров ( по Ю.О. Липовскому [ Киевленко и др., 1987]. Цветовое изображение представлено автором.

Условные обозначения: 1 рыхлые четвертичные отложения; 2-5 – гнейсы: 2 биотитовые; 3 – инъекционные корунд- ставролит- гранат- биотит- амфиболовые; 4 – гранат- биотитовые; 5 – кианит- гранат- биотитовые; 6 – амфиболиты; 7 – кварц- полевошпатовые жилы и плагиоклазиты; 8 – корундоносные зоны; 9 – тектонические нарушения

На месторождении Хитостров корундовая минерализация приурочена к ставролит-гранат-биотит-роговообманковым гнейсам, которые подстилаются гранат-биотитовыми и кианит-гранат-биотитовыми гнейсами и перекрываются гранатовыми амфиболитами (рис. 4.30). Наибольшие концентрации корунда отмечаются возле прослоев, секущих прожилков и жил существенно плагиоклазового состава. Участки концентрации корунда или корундоносные зоны имеют длину по простиранию от 15 до 60 м, при мощности от 5 до 20 м. Такие зоны ограничены разломами и выделяются в рельефе приподнятыми блоками высотой до 5 м. Корунд локализуется преимущественно в гнейсах на контакте с плагиоклазитами и реже в самих плагиоклазитах.

Корунд распределен в породе неравномерно, крупные кристаллы представлены хорошо ограненными и идиоморфными с четко выраженными гранями пинакоида (1001) и гексагональной призмы (1011) средний размер крупных кристаллов корунда 1,3 см в длину, отдельные кристаллы достигают 4,2 см. Более мелкие кристаллы представлены изометричными зернами размером 0.46x0.93; 0.77x0.82; 0.34x1.15; 0.24x0.23 мм. Облик кристаллов столбчатый, удлинённый по оси  $L_3$ , реже бочковидный или таблитчатый. Цвет корунда от серовато-розового, бледно-розового до ярко-розового, фиолетово-розового и вишневого. Прозрачные индивиды отсутствуют из-за наличия газово-жидких включений, минеральных включений и мелкой трещиноватости (отдельности) развитой параллельно грани ромбоэдра. Присутствуют и более мелкие (1-3 мм) кристаллы корунда. Содержание корунда по шлифам колеблется от 0,1 до 5-7 %.

Породообразующие минералы представлены плагиоклазом № 2620, содержание которого колеблется в широких пределах от 05% в меланократовых породах до 90-95% в плагиоклазитах (рис. 4.31, а, б). Зерна ставролита ромбической и округлой формы светло-желтого до

насыщенного желтого цвета, размеры от 0,1x0,7 до 5,2x4,4 мм. Практически все зерна ставролита трещиноваты и содержат включения плагиоклаза и аксессуарных рутила, циркона, алланита. Гранат наблюдается в виде сильнотрещиноватых изометричных зерен размером от 0,20,3 до 45 мм. Зерна амфибола размером от 0,16x0,22 до 1,6x2,8 мм. Биотит присутствует в виде разноориентированных лейст со значительной хлоритизацией.

Включения отличаются от корунда меньшим рельефом и хорошей спайностью.

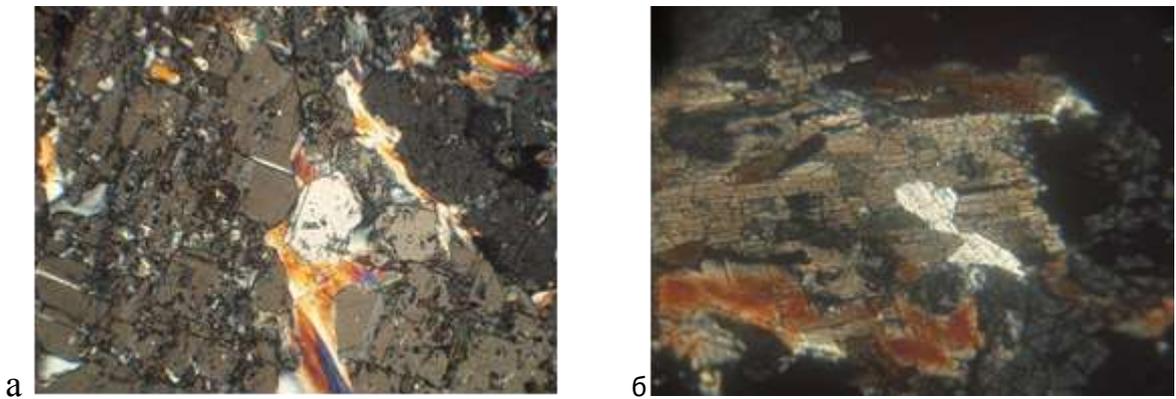


Рисунок 4.31 – а) агрегат мусковита внутри корунда. Тонкие белые полоски – трещины отдельности. С анализатором. Ув. 30<sup>x</sup>; б) корунд с динамическим двойникованием. С анализатором. Ув. ~200<sup>x</sup>.

Главный вторичный минерал мусковит образует различные по размерам пластинки и гнезда. На рисунке видны разные по форме агрегаты позднего мусковита. Размер гнезд мусковита достигает 3 мм. Внутри некоторых гнезд мусковита встречаются зерна рутила размером до 0,2 мм. Иногда это отдельные гнезда (до 1 мм), состоящие из множества мелких зерен рутила. Замещение корунда мусковитом проходит в щелочных условиях при высокой активности калия.

Корунд содержит большое количество мелких трещин. Возможно, поэтому шлиф растащен (рис. 4.31, б). В корунде есть участки двойников с разной ориентировкой швов. По-видимому, это динамические (динамогенные), трансляционные двойники. Швы двойникования ориентированы под разными углами. Деформации, предполагается,

осуществлялись в условиях химического равновесия со средой, которой проявлен катаклаз.

Подавляющее число кристаллов хитостровского корунда содержат минеральные включения, представленные главным образом гранатом, плагиоклазом, рутилом, ильменитом, цирконом. По трещинкам наблюдаются слюдястые включения и агрегаты гидроксидов алюминия, представленные диаспором.

Изучение поверхности кристаллов корунда, «загрязненного» минеральными включениями, проведено на лазерном микроскопе Color 3D VK-9710K. Анализ характера включений показал, что ширина характерных слоев с диаспором может достигать 100 мкм при их глубине 2030 мкм (рис. 4.32).

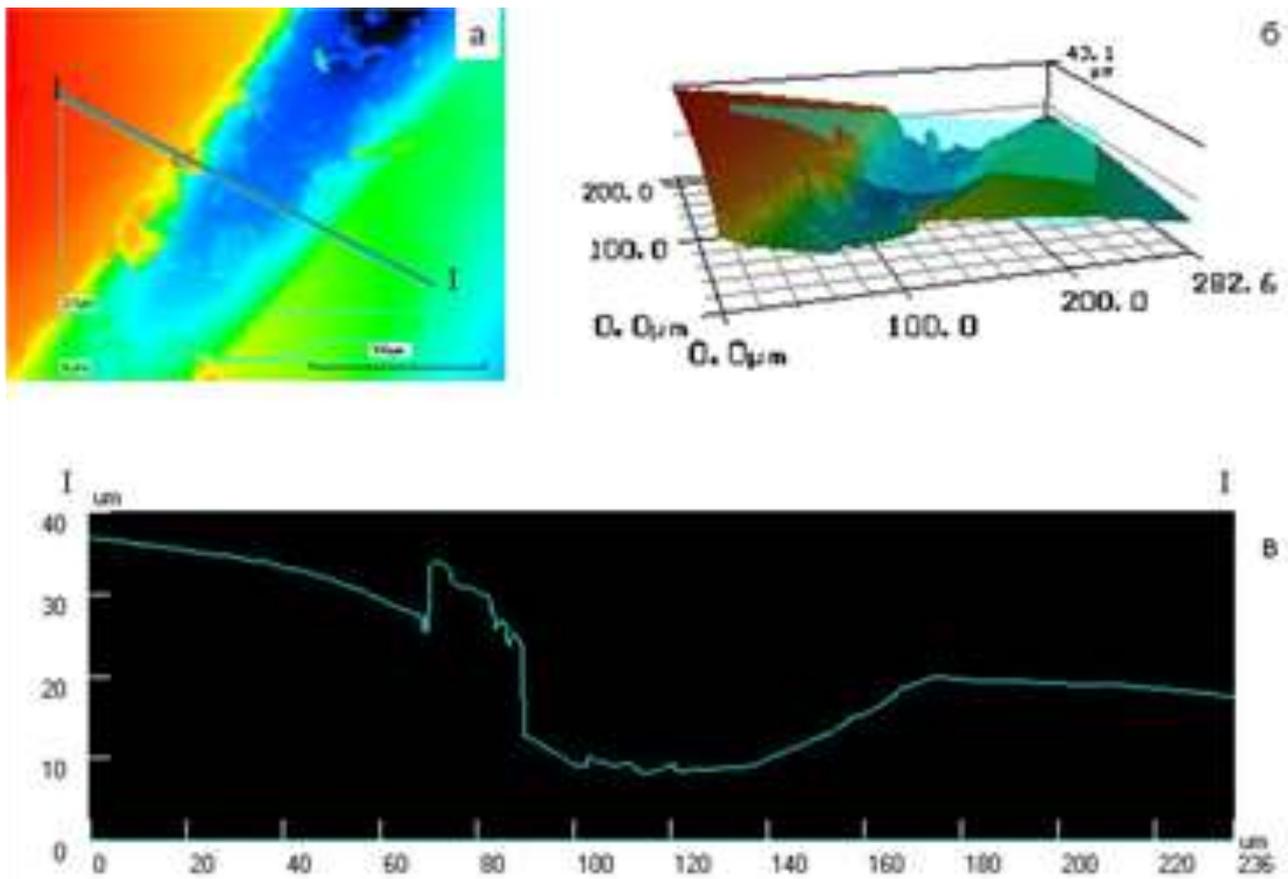


Рисунок 4.32 - Морфология поверхности зерна корунда: а - поверхность зерна с включением диаспора, I-I линия профиля; б - 3D-изображение; в -

профиль поверхности корунда по линии I-I. Изображение на лазерном микроскопе Color 3D VK-9710K

Основная масса корунда Хитострова представлена призматическими кристаллами длиной 1-5 см и толщиной 0,53 см. Цвет его розовый различных оттенков, малиновый, фиолетовый. Заметно выражен дихроизм с изменением окраски от серовато-розовой до ярко-розовой и малиновой.

В основном корунд непрозрачен, чистые просвечивающие разности очень редки. Наиболее декоративны образцы, где кристаллы корунда заключены в белой массе плагиоклазита.

Мультиэлементное картирование и анализ вариаций химического состава отдельных минералов выполнялись на сканирующем электронном микроскопе VEGA II LSH (Tescan) с энерго-дисперсионным микроанализатором INCA Energy 350 (Oxford instruments) (ИГ КарНЦ РАН).

Вариации состава породообразующих минералов корундсодержащих гнейсов (табл. 3.1) рассчитаны по данным анализов на электронном сканирующем микроскопе с энергодисперсионной приставкой Tescan. Гранат с кристаллохимической формулой  $(Ca_{0.3}Fe_{1.77}Mg_{0.96})_3Al_2.04Si_{3.00}O_{12}$  соответствует гроссуляр-пироп-альмандиновому составу. Плагиоклаз представлен изоморфной смесью олигоклазового состава. Биотит характеризуется повышенными содержаниями магния (Таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Вариации состава породообразующих минералов корундсодержащих гнейсов

| Спектр  | Содержание оксидов, % |         |                      |         |                      |         |                      |
|---------|-----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|---------|----------------------|
|         | Na <sub>2</sub><br>O  |         | Na <sub>2</sub><br>O |         | Na <sub>2</sub><br>O |         | Na <sub>2</sub><br>O |
| Корунд  |                       | Корунд  |                      | Корунд  |                      | Корунд  |                      |
| Диаспор |                       | Диаспор |                      | Диаспор |                      | Диаспор |                      |
| Гранат  |                       | Гранат  |                      | Гранат  |                      | Гранат  |                      |

|                                   |               |                                   |               |                                   |               |                                   |               |
|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|-----------------------------------|---------------|
| Плагиокла<br>з<br>(<br>олигоклаз) | 7,20-<br>9,08 | Плагиокла<br>з<br>(<br>олигоклаз) | 7,20-<br>9,08 | Плагиокла<br>з<br>(<br>олигоклаз) | 7,20-<br>9,08 | Плагиокла<br>з<br>(<br>олигоклаз) | 7,20-<br>9,08 |
| Амфибол                           | 2,85-<br>3,31 | Амфибол                           | 2,85-<br>3,31 | Амфибол                           | 2,85-<br>3,31 | Амфибол                           | 2,85-<br>3,31 |
| Биотит                            |               | Биотит                            |               | Биотит                            |               | Биотит                            |               |

Морфоструктурные особенности корунд-гранат-амфиболовых гнейсов месторождения, морфология корундов и реакционные взаимоотношения высокоглиноземистых минералов корунд-гранат-амфиболовых гнейсов месторождения Хитостров показаны на рис. 4.33 – 4.35.

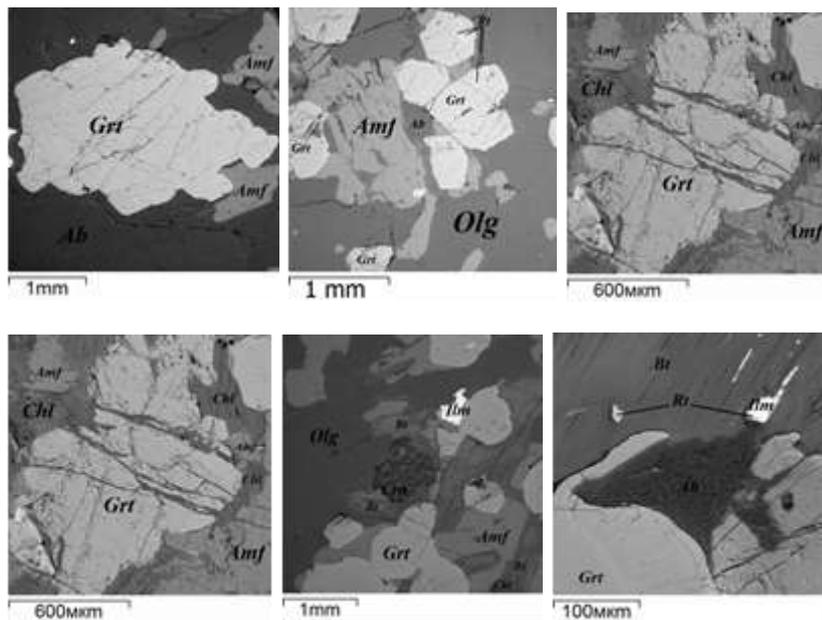


Рисунок 4.33 - Морфоструктурные особенности корунд-гранат- амфиболовых гнейсов месторождения Хитостров. Фото СЭМ VEGA II LMU. Условные обозначения: Grt - гранат; Ab - альбит; Olg - олигоклаз; Amf - амфибол; Chl - хлорит; Ilm - ильменит; Rt - рутил; Zrn - циркон; Dsp – диаспор

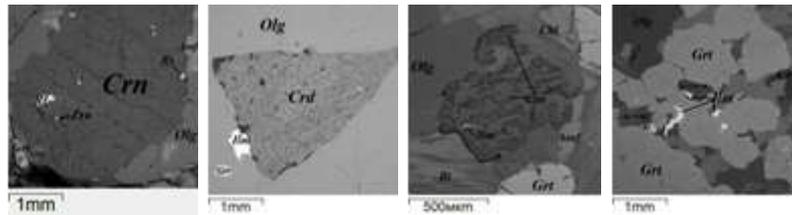


Рисунок 4.34 - Морфология корунда в гнейсах месторождения Хитостров. Фото СЭМ VEGA II LMU. Условные обозначения: Crn - корунд; Olg - олигоклаз; Ab - альбит; Grt - гранат; Bt - биотит; Chl - хлорит; Amf - амфибол; Pm - ильменит; Rt - рутил; Zrn - циркон; Dsp - диаспор

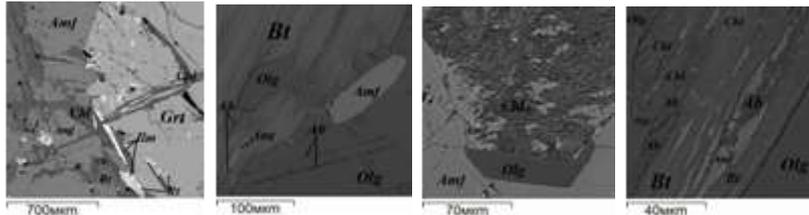


Рисунок 4.35 - Реакционные взаимоотношения высокоглиноземистых минералов корунд-гранат-амфиболовых гнейсов месторождения Хитостров. Фото СЭМ VEGA II LMU. Условные обозначения: Olg - олигоклаз; Ab - альбит; Bt - биотит; Amf - амфибол; Chl - хлорит

#### Выводы по главе 4

*В этой главе даны аналитическая схема размещения и сводный материал по корундовым объектам зарубежья и России. Охарактеризованы наиболее крупные районы отработанных, ныне действующих и перспективных на ближайшее время месторождений. В той или иной мере отражена роль магматизма и метаморфизма в корундообразовании, которое носит полигенный характер и происходило в четыре основных периода.*

*На этом фоне рассмотрены рубины Могокского района (Мьянма), благородный корунд Шри-Ланки, рубины месторождения Снежное (Таджикистан), а также российских объектов рубины проявления Рай-Из (Полярный Урал), рубины месторождения Незаметнинское (Хабаровский край) и рубины Хитострова (северная Карелия). Все эти данные могут быть использованы при определении горно-геологических условий месторождения (участка), чтобы аргументированно выбрать способ вскрытия и технологию его разработки.*

## ГЛАВА 5. Горнотехнические условия разработки месторождений корунда

Месторождения корунда 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, площадь сечения уменьшается. В выработках наблюдаются частые случаи внезапного обрушения разуплотненных взрывом горных пород, которые очень редко крепятся из-за отсутствия крепежного материала в горах и трудности его доставки.

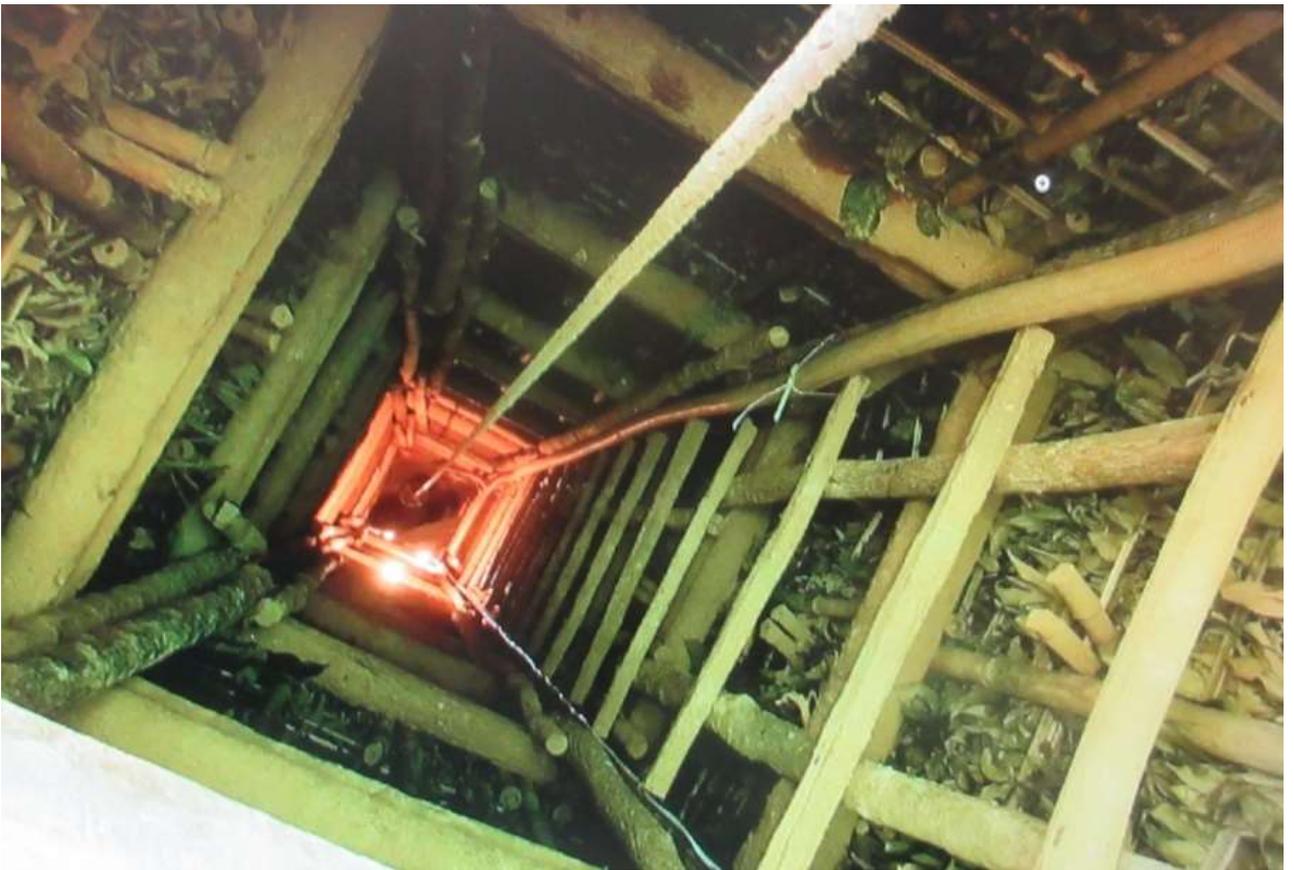


Рисунок 5.1 – Подземная добыча корунда ( Могок, Мьянма)



Рисунок 5.2 Пример добычи корундов из россыпей: а проходка шахты на рисовой плантации (Шри-Ланка); б добыча из речного русла. Фото Vincient Pardieu

### 5.1 Отечественный и зарубежный опыт горных работ и анализ горнотехнических условий разработки месторождений корунда

В настоящее время горно-геологические, геомеханические и горнотехнические особенности условий освоения коренных месторождений корунда, расположенных, как правило, в высокогорных районах, 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 капитальных вложений. Проблема заключается в том, что в районах расположения месторождений на большой высоте отсутствуют вода, электричество, недостаточно кислорода в атмосфере.

Первостепенное значение приобретает вопрос совершенствования технологии подземной разработки месторождений корунда, эффективность которой предопределяет технико-экономические показатели всего предприятия. В настоящее время приоритетным становится направление, связанное с комплексной механизацией 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 [Rosengren, 2001; Еременко и др., 2013; Louchnikov et al, 2014; и др.].

Научно обоснованный выбор рациональной технологии и параметров разработки месторождений, представленных рудными телами сложной формы, возможен на основе изучения специфики производства горных работ. 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). Уделено внимание специфике взрывной отбойки и конструктивному оформлению систем разработки рассматриваемых месторождений.

Одной из радикальных мер по снижению потерь при добыче корундосодержащих руд и рациональному использованию природных ресурсов является применение твердеющей смеси для закладки выработанного пространства. Однако возможность и целесообразность ее применения в различных условиях неодинакова [Кириченко и др., 1986; Ариоглу и др., 1987; Landriault, 1995; и др.]. Например, из-за отсутствия на территориях, где расположены месторождения корунда (Могок (Мьянма), Снежное (Таджикистан), Майт (Таиланд), Хунза и Сумджам (Пакистан), Лонгидо (Танзания), Чангли (Вьетнам), Субера (Австралия), Кукурт (Афганистан) и др.) гранулированных доменных шлаков, выбор

подобной смеси для закладки ограничен. В работе обращено внимание на исследования, связанные с выбором смесей на основе использования производственных отходов (пыли цементных заводов, привозных извне доменных шлаков) и местных заполнителей (вулканические пемзовые пески). В результате физико-химических исследований предложенной твердеющей смеси на основе пыли и пемзового песка дан анализ гидратации и твердения закладочного материала. Разработана технология приготовления закладки на этой основе и приняты параметры транспортирования смеси по трубопроводу с помощью сжатого воздуха.

Исследования проводились 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 полученных результатов [Кравченко, Куликов, 1974; Хомяков, 1984; Хайрутдинов и др., 2001].

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 [Плякин, Михайленко, 2012].

Практически оказывается 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. Протодяконова, а средний доминирующий коэффициент крепости равен 8-12 [Теория крепости..., 1974]. 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, обеспечивающих 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.

Проектные проработки предполагают выемку участков месторождений вести подземным способом с применением следующих систем разработки:

1. с магазином и отбойкой руды глубокими скважинами для участков мощностью рудного тела свыше 4 м;
2. с магазином и шпуровой отбойкой руды для участков мощностью рудного тела до 4 м;
3. с выемкой камер горизонтальными слоями с закладкой для участков наиболее богатых, а также с разветвлениями, сближенными жилами и невыдержанными элементами залегания.

В качестве закладочного материала рекомендуется использовать пустые породы.

К эксплуатационным потерям руды в данных условиях относятся потери за счет неполноты отбойки руды на контактах рудных тел, потери при отбойке за счет разбрасывания рудной мелочи в очистном пространстве, в закладке, при скреперовании и погрузке, потери от неполноты выпуска под налегающими породами при погашении целиков.

Разубоживание руды происходит за счет внутрирудных включений пустой породы, частичной прирезки боковых пород, при выпуске замагазинированной руды после обрушения потолочин и междукамерных целиков под налегающими породами. В целях снижения потерь и разубоживания руды необходимо выполнение определенных технических условий. К ним относятся такие, как устройство настила из обрезных досок; обрушение потолочин и междукамерных целиков в зажатой среде;

проведение систематического контрольного опробования при подготовительных и нарезных работах и при выпуске руды из блоков.

## 5.2 К вопросу выбора рациональных систем и технологий разработки месторождений корунда

Проведена научно-исследовательская и опытная работа с целью выбора рациональных систем и технологии разработки крутопадающих месторождений корунда. Разработка месторождений крутопадающих маломощных месторождений часто ведется в разнообразных горно-геологических условиях: руды и вмещающие породы имеют различную крепость и устойчивость, элементы залегания рудных тел меняются в широких пределах. На месторождениях промышленные контуры рудных тел устанавливаются путем опробования горных выработок, пройденных для этой цели (ГОСТ Р 56828.15-2016). В странах с высокоразвитой горнорудной промышленностью подземная разработка крутопадающих маломощных месторождений является основным способом добычи руд. Например, в Канаде и ЮАР разработка данных месторождений практически полностью ведется подземным способом [Михайлов, 2008; Добыча драгоценных металлов, 2017). 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 на рис. 5.3.

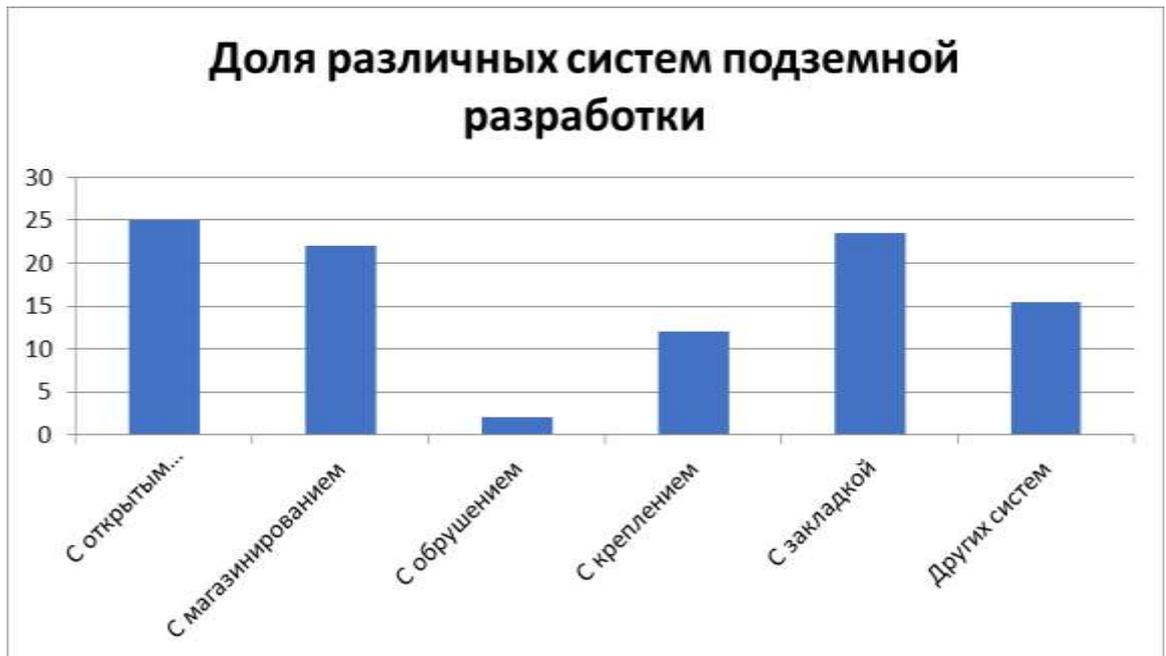


Рисунок 5.3 – Доля различных систем подземной разработки

Добыча руд за рубежом в основном ведется с применением наиболее гибких систем разработки, горизонтальными слоями с закладкой, подэтажными штреками, а также с магазинированием руды. Эффективность систем разработки на зарубежных рудниках в последние десятилетия повышается за счет совершенствования техники и технологии горных работ. Самым крупным достижением в области совершенствования технологии очистной выемки считается появление механизированного варианта системы разработки горизонтальными слоями ( высотой до 5 м) с закладкой, применяемых в сравнительно устойчивых рудах и вмещающих породах. При этом варианте на бурении шпуров и скважин и доставке руды применяют мощное высокопроизводительное оборудование, которое позволяет вывести эту систему разработки в число эффективных. В последние годы распространение получают системы разработки с закладкой выработанного пространства. Применение системы разработки подэтажными штреками с последующей закладкой выработанного пространства позволяет увеличить высоту блоков до 250 м.

При разработке месторождений корунда имеются особенности, которые содержатся в ряде требований, ограничивающих область применения систем.

Во- первых, месторождения представлены разнообразными горно-геологическими условиями, которые необходимо учитывать. Руда и вмещающие породы обладают различной крепостью и устойчивостью, рудные тела имеют сложную форму и изменчивые элементы залегания, что в значительной мере может влиять на технологию выемки и способствовать потерям и разубоживанию руды.

Во- вторых, в случае нецелесообразности объединения сближенных рудных тел возникает необходимость их отдельной выемки. В этом варианте устойчивость прослойки породы, разделяющей рудное тело, существенно будет зависеть от параметров и способа взрывной отбойки.

В- третьих, заданная интенсивность разработки месторождений становится причиной решения вопроса об одновременном применении открытого и подземного способа при ведении очистных работ на нескольких этажах. Для успешного решения данного вопроса выбор эффективной технологии разработки месторождений должен проводиться с учетом вышеуказанных условий.

#### Выводы к разделу 5

*Даны обоснования параметров геомеханики при освоении коренных месторождений корунда с учетом горно- геологических, геомеханических и горнотехнических особенностей условий. Идея исследований заключена в обеспечении высокой прибыльности разработки и минимизации сроков окупаемости капитальных вложений. Оценка и анализ результатов производственных экспериментов играют важную роль на завершающей стадии исследований.*

*В разделе делается акцент на том, что 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 работ определяется рациональная технология очистной выемки, обеспечивающая эффективные показатели по производительности труда, полноте и качеству извлечения руды.*

*На основе производственных испытаний по транспортировке твердеющей смеси с помощью сжатого воздуха предложен метод расчета параметров пневмотранспорта смеси по горизонтальным трубопроводам. Сделан вывод, что закладка выработанного пространства твердеющей смесью при разработке рудных тел сложной формы улучшает технико-экономические показатели и способствует расширению его производственной мощности.*

*Разработка параметров скважинной отбойки крутопадающих маломощных корундсодержащих рудных тел показывает, что механизированная разработка жил вертикальными прирезками с отбойкой руды скважинными зарядами является достаточно эффективной технологией.*

*Несмотря на принадлежность наклоннопадающих рудных тел малой мощности, залегающих в устойчивых вмещающих породах, представляющих сложные объекты разработки, они отнесены к главным месторождениям, в которых сосредоточены значительные запасы корундсодержащего сырья.*

## **ГЛАВА 6.Способы отработки коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья**

### **6.1 Разработка способа отработки крутопадающих маломощных жильных месторождений**

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 [ Барнов, Еременко и др., 2015; Барнов, Еременко и др., 2016].

Разработаны параметры бурогидровзрывных работ. За основу взяты параметры очистных лент ( забоев) отработки горизонтальных и пологопадающих маломощных жил камерно- столбовой системой разработки [ Галченко, Сабянин, 2011; Еременко и др., 2015; Барнов, Еременко и др., 2016]. Параметры бурогидровзрывных работ определяют оптимальные размеры отделяемых гидроразрывом структурных кондиционных блоков при ведении очистных работ. 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 [ Барнов, Еременко и др., 2016]

В работе [ Барнов, Еременко и др., 2015; Еременко и др., 2015] представлены варианты отработки горизонтальных и пологопадающих маломощных жил, но не предложены варианты отработки крутопадающих жильных месторождений с углом падения от 70 до 90° мощностью от 0,8 до 45 м. При проведении исследований на золотодобывающем руднике Зум- Холбинском в Бурятии, а также на никелевых рудниках Миитель и Ляйнстер в Австралии выявлены сложные горно- геологические и горнотехнические условия разработки

крутопадающих маломощных месторождений: разработка тонких жил, имеющих крутое падение, низкая прочность горных пород всяческого бока, высокая производительность системы разработки, выемка в восходящем порядке, отсутствие необходимости оставления потолочных целиков, теледистанционная погрузка отбитой руды, позволяющая снизить риск обрушения горных пород и др. [ Назарчик и др., 1976; Назарчик и др., 1977; Harding, Scarratt, 1986; Hughes, 1997].

Для сложных горно- геологических и горнотехнических условий разработки крутопадающих маломощных жил разработан способ отработки месторождений уступной выемкой с отбойкой руды скважинными зарядами ВВ ( рис. 6.1), с проходкой буровзрывным ( бурогидровзрывным) способом рудных штреков ( рис. 6.2) ( или традиционным буровзрывным) и одновременной полной механической закладкой выработанного пространства пустыми породами [ Барнов и др., 2015; Louchnikov et al, 2014; Rosengren, 2001].

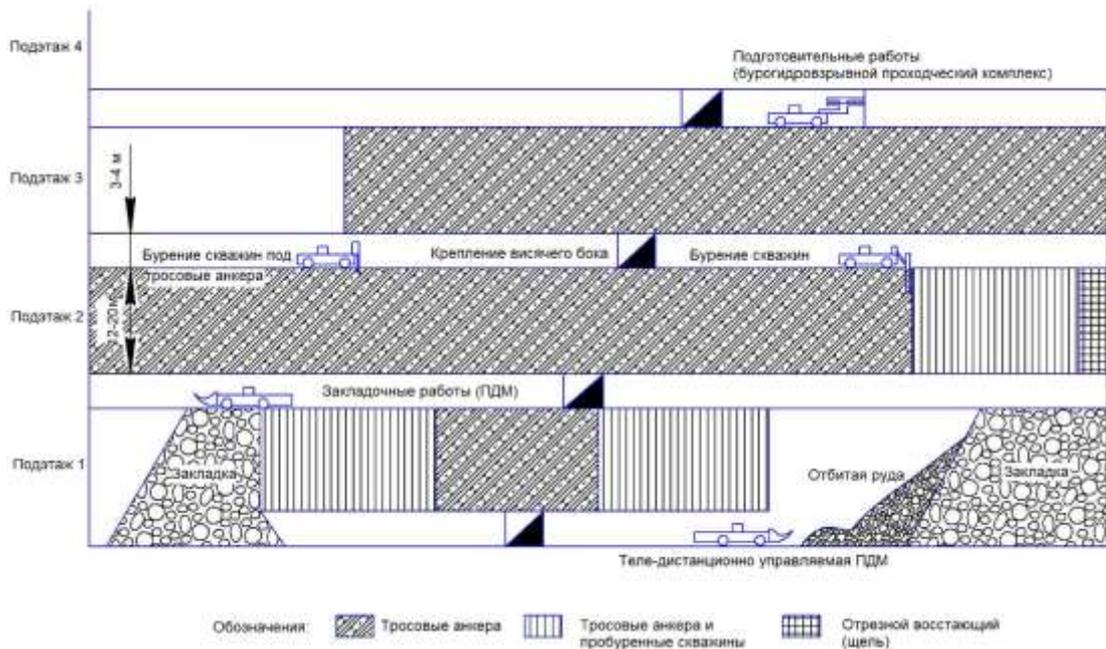


Рисунок 6.1 Способ отработки месторождения уступной выемкой с отбойкой руды глубокими скважинными зарядами ВВ, с проходкой гидровзрывным способом рудных штреков и закладкой выработанного пространства

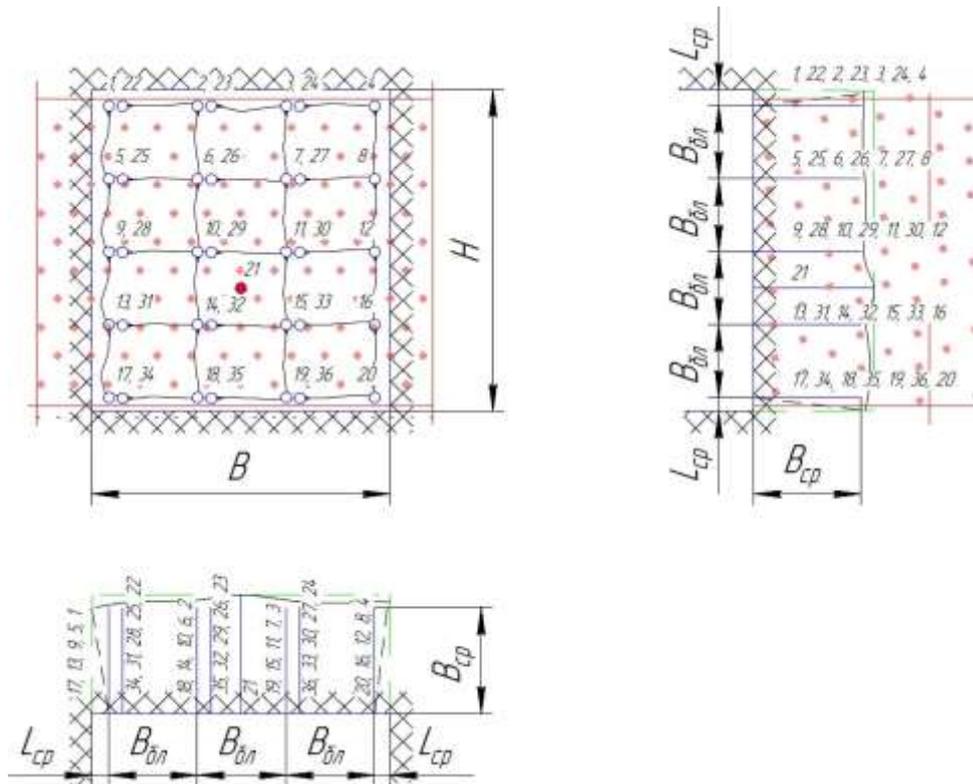


Рисунок 6.2 Схема паспорта бурогидровзрывных работ БГВР. 1-36 – шпурсы продольного гидроразрыва; 21 – центральный шпур поперечного гидроразрыва, а также для проведения сотрясательного взрыва заряда ВВ с эффектом декаплинга;  $B$  – ширина выработки, м;  $H$  – высота выработки, м;  $B_{сп}$  – глубина отбиваемого слоя, м;  $B_{бл}$  – средний размер отбиваемого структурного блока, м;  $L_{сп}$  – расстояние от оконтуривающего шпура до стенки выработки, м

Первоначально предлагаемый способ разрабатывался для условий освоения коренных месторождений корунда, расположенных, как правило, в высокогорных районах.

Целью данного варианта отработки является наиболее полная выемка запасов полезного ископаемого в восходящем порядке от нижней границы рудного тела (участка). Предлагаемый вариант освобождает от необходимости создания рудных потолочных целиков и предотвращает образование зон концентрации напряжений. Проектируемый участок рудного тела разделяется на 4 подэтажа с образованием 8 рабочих забоев. При вскрытии участка ограничивается длина выемки запасов руды обратным ходом от флангов к центру участка с учетом физико-механических свойств руды и вмещающих пород, например, до 125 м.

Вскрытие месторождения производится через главный транспортный уклон с углом падения  $11^\circ$ .

Подготовительные работы включают: проходку уклона (в лежачем 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 длиной с учетом физико-механических свойств руды и вмещающих пород, например, 25 м. Бурение глубоких скважин производится с вышележащего этажа.

С целью уточнения границ рудного тела в процессе подвигания очистных работ в рудных штреках рекомендуется периодически проводить шламовое бурение (рис. 6.3), которое осуществляется, например, с помощью бурового станка Solomatic. С интервалом 10 м бурятся 3 вертикальные скважины для получения геологических и геотехнических данных. Две скважины бурятся 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.

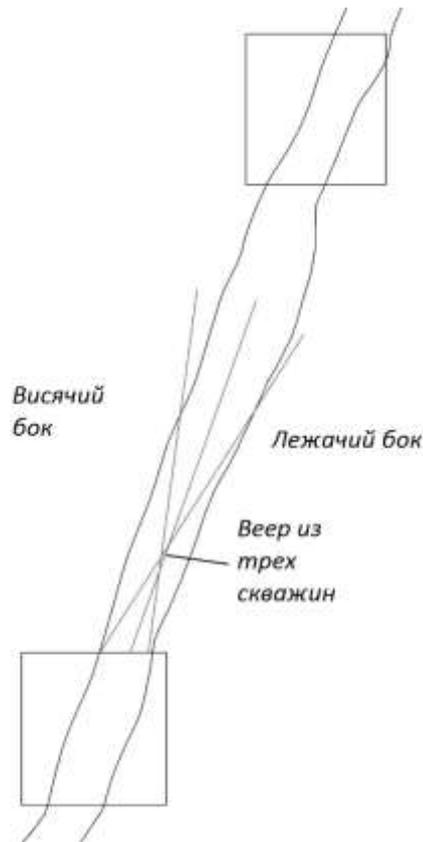


Рисунок 6.3 – Схема шламового бурения

Погрузка отбитой руды осуществляется с помощью дистанционно управляемой погрузочно- доставочной машины. Производительность ПДМ: 80 т/ч при дистанционно управляемой погрузке и 120 т/ч при управляемой погрузке. 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. Затем очистные работы переходят на вышележащий подэтаж.

В зависимости от применяемого компрессорного оборудования могут быть использованы пневмоударники как на обычное, так и на повышенное давление энергоносителя.

В ИГД СО РАН создан конкурентоспособный, отвечающий требованиям современного производства пневмоударник.

Конструкция этого пневмоударника способна в будущем заменить на российских горных предприятиях зарубежные машины. Проведены испытания пневмоударника, установившие его работоспособность, и зарегистрированы диаграммы давлений в рабочих камерах. По методике, основанной на использовании теоремы Б.В. Суднишникова, построены силовая характеристика, рассчитаны основные энергетические и кинематические параметры, построены графики скорости и перемещения ударника по времени рабочего цикла.

Полученные результаты подтверждают создание нового энергонасыщенного погружного пневмоударника для ударно-вращательного бурения скважин в массиве прочных горных пород. Выпуск этого оборудования на предприятиях РФ и широкое применение в практике буровых работ усилит конкурентные позиции как отечественной техники, так и прорывных технологий в горнодобывающей отрасли.

Проведенные на горнодобывающих предприятиях исследования показали, что при проходке рудных штреков буровзрывным способом и доставке руды в выработках, расположенных в лежащем боку месторождения разубоживание составляет в среднем 57 %; при условии, что отбойка слоев ведется в сторону закладки, к разубоживанию необходимо добавить 40 % по первому взрываемому ряду и 20 % по второму.

С учетом изменения горно- геологических и горнотехнических условий разработки крутопадающих маломощных жильных месторождений возможны дополнительные варианты развития очистных работ с применением данного способа.

## 6.2 Разработка и обоснование параметров технологии гидроразрыва корундосодержащих горных пород при отработке жильных месторождений

В последние годы в связи с освоением месторождений разных геологических типов удельный вес жильных месторождений в добыче руд существенно сокращается [Галченко, Сабянин, 2011; Harding, Scarratt, 1986; Hughes, 1997; Bowersox, Chamberlin, 1995]. Связано это в основном с освоением крупных месторождений, представленных рудными телами большой мощности.

В силу особенностей геологического строения, горно-геологических, геомеханических и горнотехнических условий освоения коренные месторождения корунда, расположенные, как правило, в высокогорных районах в настоящее время не являются привлекательными объектами для инвестиций [Агеева и др., 1989; Баратов, Россовский, 1986; Гансер, 1967; Геология и полезные ... , 1980; Галченко, 1981; Барнов, 2010]. Месторождения данной группы располагаются на высоте свыше 2,0 км от уровня моря в Таджикистане, Афганистане, Пакистане, Индии, Бирме и др. Несмотря на то что высокое качество, стоимость сырья и преобладающая возможность штольневого вскрытия месторождений способна обеспечить высокую прибыльность разработки и минимальные сроки окупаемости капитальных вложений, данные условия трудновыполнимы из-за отсутствия в районах расположения месторождений на большой высоте в труднодоступных местах - воды, электричества, достаточного содержания кислорода в воздухе и пр.

Рубины сосредоточены в двух продуктивных зонах: Верхней и Нижней. Они залегают параллельно друг другу на расстоянии в сотни метров и отделены мраморно-кристаллосланцевой толщей мощностью около 100 м. Верхняя зона, основная продуктивная зона месторождения, прослежена по простиранию на 290 м, по падению на 30 м. В естественном эрозионном срезе протягивается на глубину 150 м. Она

представляет согласное внутрислое тело крайне изменчивой мощности, варьирующей от 0,0 до нескольких см и от нескольких см до 0,5-0,6 м, редко до 1 м. Протяженность участков зоны средней мощности (0,15 м) по простиранию и падению от нескольких до 25 м. В целом зона имеет форму вытянутой по простиранию четко видной залежи, в которой неравномерно чередуются раздувы с пережимами.

Рубин в продуктивной зоне ассоциируется со слюдами: ярко-зеленым фукситом, бесцветным мусковитом (серицитом), светло-коричневым флогопитом, суммарное количество которых колеблется в широких пределах, до 70 % объема зоны. Кристаллы самоцвета распределены неравномерно. Наибольшее их количество располагается в раздувах зоны. Они ориентированы по отношению к контактам по-разному: то перпендикулярно, то параллельно, то диагонально и как бы разрезают сланцеватость.

Количество корунда-сырца, извлекаемого из одного «гнезда» (раздува зоны), колеблется от 20 г до 50 кг. Выход кондиционного (ювелирного и кабошонного) материала из корунда-сырца от 0 до 10 %, в среднем 0,9 %. Ценность месторождения значительно повышает коллекционный материал, представленный крупными кристаллами и друзами кристаллов ярко красного корунда.

Вмещающие мраморы в висячем и лежащем боках продуктивной зоны заметно минерализованы. Она представлена неравномерно рассеянными вкраплениями флюопита, фуксита, флогопита, скаполита, графита и др., а также мелкими кристаллами рубина. Перечисленные минералы формируют минералогический ореол (своего рода ореол рассеяния), окаймляющий рубиноносную зону со стороны висячего и лежащего боков и прослеживающийся на некоторое расстояние вкост простирания зоны, до 12 м.

Нижняя продуктивная зона расположена в 100 м к югу от Верхней. Её протяженность по простиранию 260 м. Мощность с учетом ореола

минерализованных мраморов до 10 м. На глубину по падению прослеживается до 50 м.

По главным параметрам: характеру изменчивости мощности и внутреннего строения рудных залежей, по крайне неравномерному содержанию полезного компонента, его количеству и качеству, месторождение отнесено к IV группе сложности.

Промышленный потенциал месторождения Снежное ( по сумме запасов и ресурсов) составляет: корунд- сырец-13,8 т; ювелирный корунд-612 тыс. карат; коллекционный корунд-1,5 т.

К настоящему времени месторождение отработано карьерообразной выработкой на глубину около 30 м. Оставшиеся потенциальные запасы рубина в недрах Верхней продуктивной зоны соразмерны крупному месторождению. Отсутствие инвесторов препятствует возобновлению геологоразведочных работ в соответствующих объемах. В то же время потенциальные запасы рубина в недрах оставляют для месторождения Снежное приоритет крупнейшего месторождения рубина в данном регионе.

При взрывной отбойке руды, содержащей корунды, с помощью шпуровых зарядов происходит разрушение корундового материала более 90 % от общего объема. Также основная часть корундов, особенно крупных размеров разрушается при механическом и взрывном воздействии, так как при резком разупрочнении переходе горных пород и корундов из напряженного состояния в разгруженное, происходит разрушение крупных кристаллов корунда, образование трещин.

В основном месторождения данного типа, разрабатываемые в сложных горнотехнических условиях, осваиваются, как правило, вручную, с использованием при отбойке руды зубил, кувалд и молотков, а также примитивных средств взрывания и взрывчатых материалов. В забоях, как правило, 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, площадь сечения уменьшается. В выработках наблюдаются частые случаи внезапного обрушения разуплотненных взрывом горных пород, которые очень редко крепятся из-за отсутствия крепежного материала в горах и трудности его доставки.

Наиболее приемлемым 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 параметры геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья, технологические схемы и технические средства гидроразрыва горных пород. Гидравлический разрыв это процесс, при котором давление жидкости воздействует непосредственно на породу вплоть до ее разрушения и возникновения трещины. Продолжающееся воздействие давления жидкости расширяет трещину вглубь от точки разрыва. В закачиваемую жидкость может быть добавлен расклинивающий материал. Назначение этого материала удерживать созданную трещину в раскрытом состоянии после сброса давления жидкости.

На сегодняшний день технология гидроразрыва имеет несколько областей применения. При добыче нефти и газа гидроразрыв используют для обеспечения больших площадей дренирования, в которые и осуществляется медленная подпитка углеводородами из пласта с очень низкой проницаемостью [Курленя, Клишин, 2011]. При добыче угля гидроразрыв применяют для разупрочнения труднообрушаемой кровли [Леконцев, Сажин, 2014]. Для решения задач по оценке состояния массива горных пород также применяется метод гидроразрыва. Он основан на принципе восстановления первоначальных напряжений в массиве горных

пород и дальнейшего увеличения давления вплоть до образования в массиве трещин разрыва [ Курленя и др., 1994]. Каждая область применения подразумевает свою геотехнологическую основу, однако есть ряд единых принципов и подходов к прогнозированию направления развития трещин гидроразрыва. Окончательная ориентация трещины зависит только от поля действующих напряжений. Разрыв горной породы происходит в направлении, перпендикулярном наименьшему напряжению. Породный массив всегда имеет естественную трещиноватость. Известно, что преимущественная система трещиноватости горных пород связана с напряженным состоянием, как правило, таким образом, что плоскости трещин ( микротрещин) доминирующей системы трещиноватости перпендикулярны ( или близки к этому направлению) минимальному сжимающему напряжению. Существующий опыт гидроразрыва показывает, что трещина гидроразрыва стремится к развитию вдоль направления максимального сжатия среды. Если образующаяся при гидроразрыве трещина приближается к поверхности раздела слоев и породы ограничивающих горизонтов обладают более высокими прочностными характеристиками, чем обрабатываемый пласт, то рост трещины будет приостановлен.

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 ( рис. 6.4) на определенном удалении от свободной поверхности. Причем диаметр перпендикулярной трещины перекрывает

все сечение выработки. Учитывая условия высокогорья и отсутствие силовых коммуникаций, диаметр шпуров для разделения массива на блоки должен быть минимальным, около 1216 (20) мм. По этой же причине в качестве 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), проворот 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.

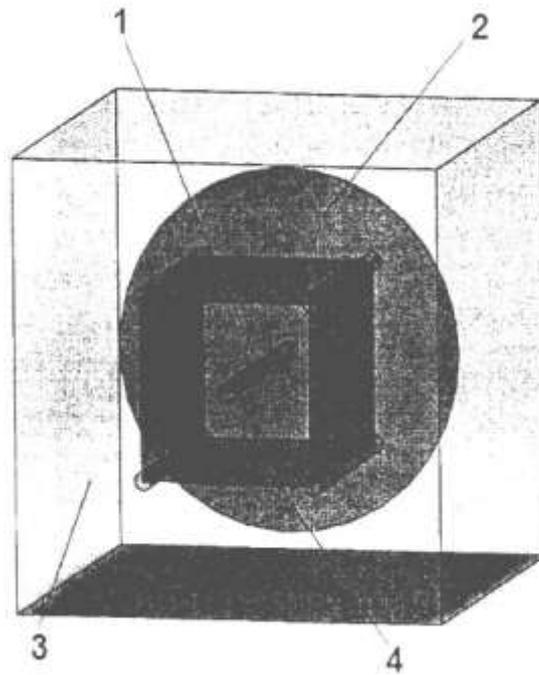


Рисунок 6.4 Схема реализации технологии гидроразрыва для отделения блоков корундсодержащей руды: 1 центральный шпур (скважина); 2 поперечный гидроразрыв; 3 массив горных пород; 4 продольный гидроразрыв

Следует учитывать и последовательность гидроразрыва. Сначала выполняется поперечный гидроразрыв, при этом шпур центрального гидроразрыва должен быть выполнен с перебором относительно остальных шпуров, поскольку в процессе развития поперечной трещины ее плоскость должна находиться в цельном массиве горных пород. Далее выполняется продольный гидроразрыв, причём одновременно во всех шпурах.

Гидроразрыв позволяет только разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения. Для отбойки сформированных блоков необходимо провести максимально щадящий взрыв на дне центрального шпура, взрывная волна которого раскроет трещину гидроразрыва и отбросит блоки на некоторое расстояние. Также можно производить механическое воздействие на геоматериал, например, с использованием перфораторов.

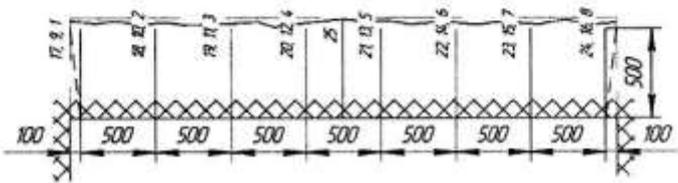
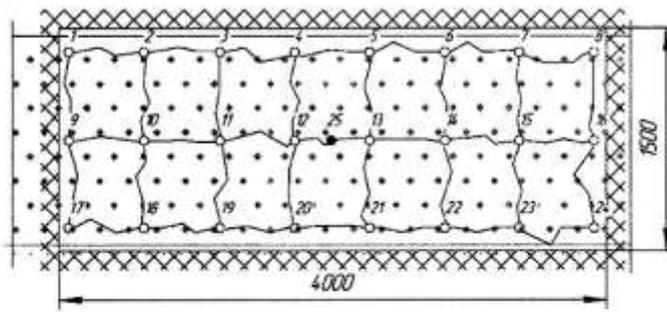
Зона горных пород, которая примыкает к инициируемому заряду ВВ, расположенному в шпуре, представляет собой кольцо, в котором

механические колебания пород превышают 1400 мм/с. Чтобы снизить влияние взрыва на массив горных пород, который имеет трещины гидроразрыва, рекомендуется снижать линейную плотность заряда в шпурах. С этой целью в смесь ВВ следует добавлять инертный материал, например, гранулированный полистирол. В качестве альтернативного варианта можно использовать патронированное ВВ с эффектом декаплинга: непрерывный заряд типа Powershear; ВВ Trimex; заряд без оболочки; частичное заполнение шпура; детонирующие шнуры и пр.

В настоящее время разрабатываются схемы обеспечения в сложных условиях высокогорья рудника электричеством с использованием ветряных энергостанций, солнечных батарей, аккумуляторов и переносных генераторов, а также применения подходящих для данных условий перфораторов для бурения шпуров в горах и др.

При проведении теоретических и экспериментальных исследований для сохранения целостности рубинов в качестве альтернативы существующим технологиям освоения тонких и маломощных жильных месторождений обоснованы параметры технологии гидроразрыва для освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья.

a)



б)

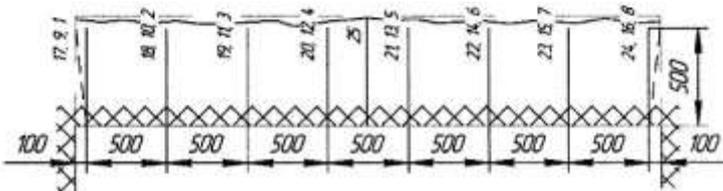
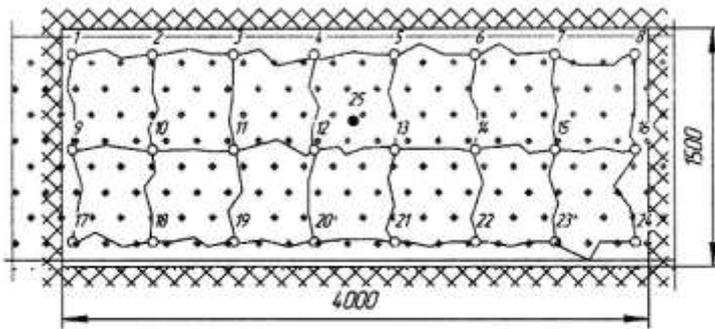


Рисунок 6.5 – Паспорт бурогидровзрывных работ

### 6.3 Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга

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

При взрывной отбойке руды, содержащей корунды (рубины), с помощью шпуровых зарядов происходит разрушение корундового геоматериала – более 90 % от общего объема [ Барнов, Еременко и др., 2015; Harding, Scarratt, 1986; Hughes, 1997; Bowersox, Chamberlin, 1995; Геология и полезные ... , т.1, 1980]. Также основная часть корундов разрушается при быстром разупрочнении – переходе горных пород и корундов из напряженного состояния в разгруженное, происходит разрушение крупных кристаллов и образование в них трещин.

Наиболее приемлемым вариантом отбойки руды для данных условий является способ, 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 геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья, технологические схемы и технические средства гидроразрыва горных пород [ Барнов, Еременко и др., 2015].

Гидроразрыв позволяет только разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения ( Курленя, Клишин, 2011; Леконцев, Сажин, 2014; Курленя и др., 1994). Для отбойки сформированных блоков необходимо провести максимально щадящий взрыв на дне центрального шпура или дополнительно нескольких шпуров, взрывная волна которого раскроет трещины гидроразрыва и

отбросит блоки на некоторое расстояние на почву очистной ленты, слоя или выработки (рис. 6.6).

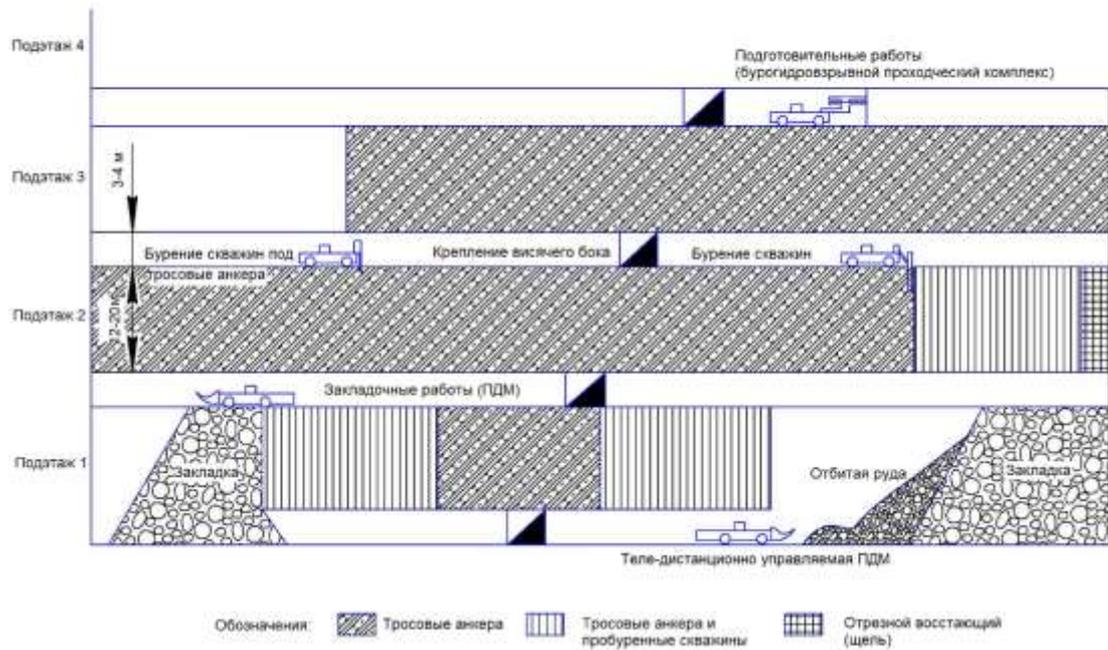


Рисунок 6.6 - Способ отработки месторождения уступной выемкой с отбойкой руды глубокими скважинными зарядами ВВ, с проходкой гидровзрывным способом рудных штреков и закладкой выработанного пространства.

Рекомендуется проводить отбойку блоков зарядами ВВ с использованием эффекта декаплинга (Броуд, 1975; Справочник взрывника, 1988). При этом достигается снижение сейсмического воздействия взрыва на массив горных пород за счет неполного заполнения шпуров ВВ по длине и сечению, а также снижение плотности ВВ, т.е. нарушается прямая связь между зарядом ВВ и разрушаемым массивом горных пород. Соприкосновение заряда ВВ со стенками шпура производит связанный взрыв (обычное взрывание) (рис. 6.7), а при наличии, например, воздушного промежутка между стенками шпура и оболочкой заряда ВВ позволяет существенно снизить сейсмическое действие взрыва, так как возникает эффект декаплинга. При декаплинге ударная волна

неоднократно отражается от стенок полости, оставаясь запертой внутри, и значительно меньше энергии отдается сейсмическим возмущениям массива горных пород. Декаплинг считается полным, если размеры полости и давление в ней таковы, чтобы ударная волна, не разрушая полости, приводила только к упругим их деформациям [Бруд, 1975]. Если же возникают пластические деформации, сокрытие будет частичным. Для качественного создания эффекта декаплинга при взрыве зарядов ВВ рекомендуется покрывать стенки шпуров специальными материалами или применять при формировании зарядов инертные промежутки и забойку шпуров, например, минеральные ампулы.

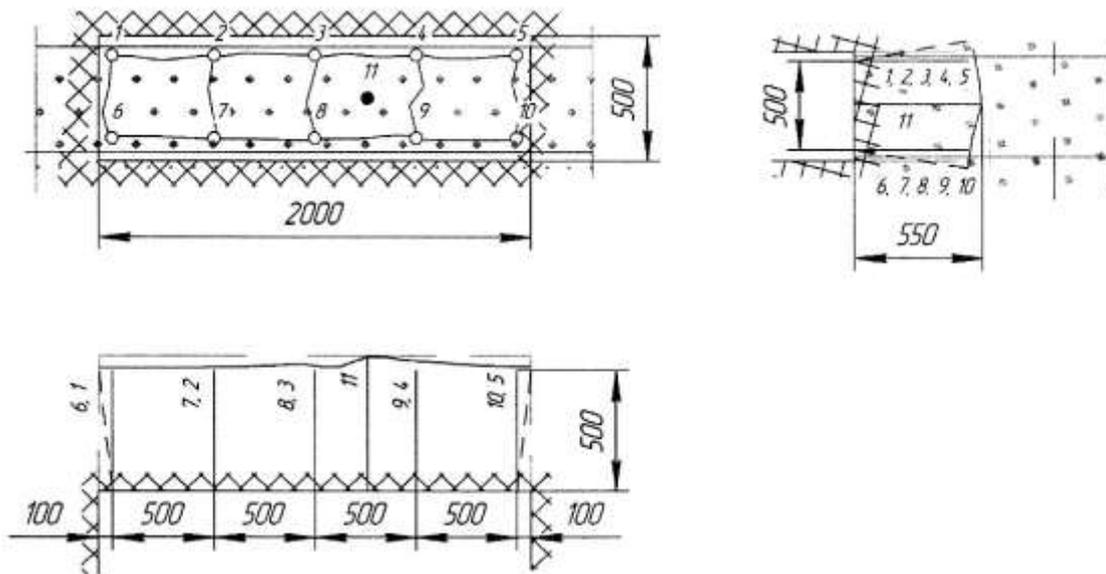


Рисунок 6.7 – Параметры бурогидровзрывных работ (паспорт БГВР):

1–10 – шпура продольного гидроразрыва; 11 – центральный шпур поперечного гидроразрыва, а также для проведения сотрясательного взрыва заряда ВВ с использованием эффекта декаплинга; 2000, 500 мм – ширина и высота очистной ленты; 500 мм – длина шпуров продольного гидроразрыва; 550 мм – длина центрального шпура.

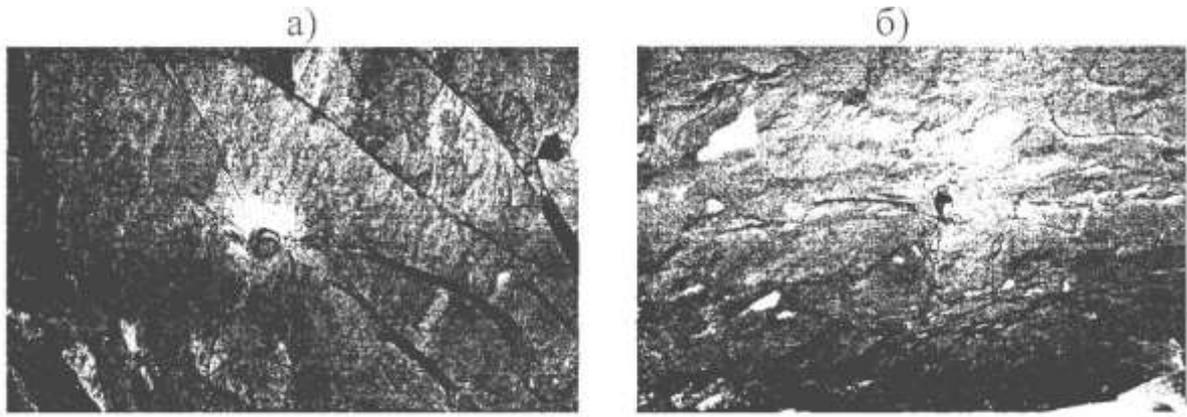


Рисунок 6.8 – Зона нарушенных взрывом разному ВВ горных пород при проходке выработок на руднике Cuiaba в Бразилии и Зум-Холбинском в Бурятии с визуально наблюдаемыми техногенными трещинами в радиусе более 300 мм

Проведение обычных взрывов шпуровых зарядов ВВ при проходке выработок или отработке очистных лент создает зоны разрушенных взрывом горных пород – зоны нарушенности пород ЗНП, которые представляют собой сеть трещин размером от микро- до макроскопических, в сочетании с радиальным растрескиванием ( рис. 6.8, 6.9), особенно при использовании мощных ВВ, например, Игданита. Несоблюдение проектных параметров БВР, применение мощных ВВ, отказ от контурного взрывания, недостаточная изученность физико-механических свойств горных пород приводит к увеличению сечения выработок и очистных лент, а также нарушает целостность сформированных гидроразрывом блоков. Например, при проходке подготовительной выработки на одном из рудников в Восточной Сибири визуально наблюдалось изменение проектного сечения выработки: 2,6х2,8 м ( рис. 6.10). Подвигание забоя за цикл составляло – 1,5 м. При соблюдении проектных параметров объем отбитой горной породы составлял 10 м<sup>3</sup> массой 27 т. Но из-за увеличения сечения выработки на 15 % масса отбитой горной породы возросла до 31 т. Горная порода массой 4 т оказалась сверх нормы на одном цикле проходки. Возникли издержки при погрузке и транспортировке незапланированного объема, потребовалось дополнительное время. На ( рисунке 6.11.) представлен

эмпирический график, который показывает, как возрастает площадь увеличения сечения выработки при различной длине подвигания забоя, которая зависит от радиуса зон нарушения горных пород взрывом ( $R_{зпп} = 10+40$  см). При увеличении площади сечения выработки на 15 % до 8,2 м<sup>2</sup>, возрастает объем оборки горной породы и транспортировки на 0,6 т на 1 п.м проходки (1 т на 1,5 п.м проходки) при  $R_{зпп} = 10$  см.

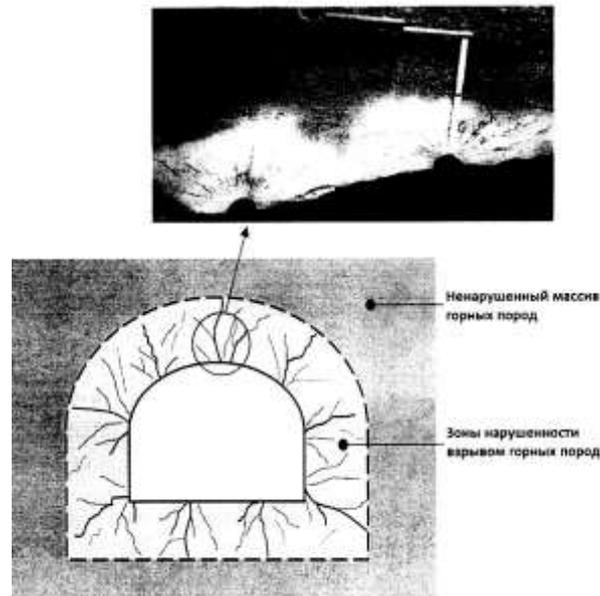


Рисунок 6.9 – Микро- и макроскопические трещины в зоне нарушенных взрывом ВВ горных пород

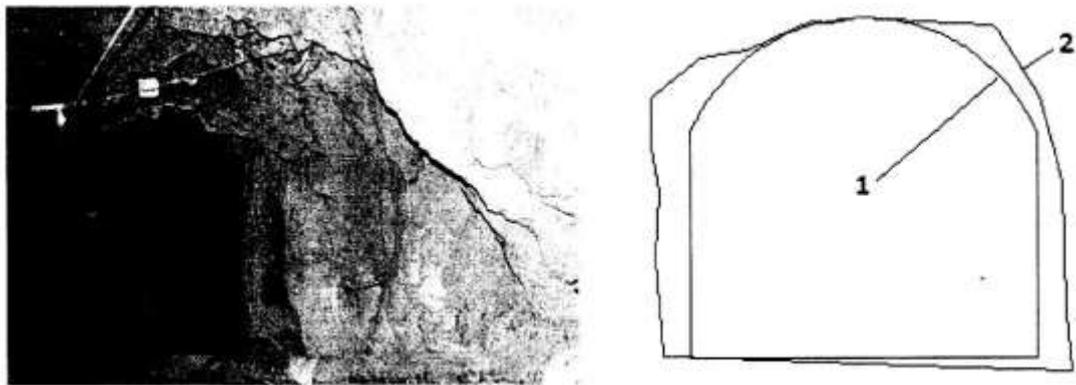


Рисунок 6.10 –Нарушение сечения подготовительной выработки: 1 – проектное сечение; 2 – существующее сечение

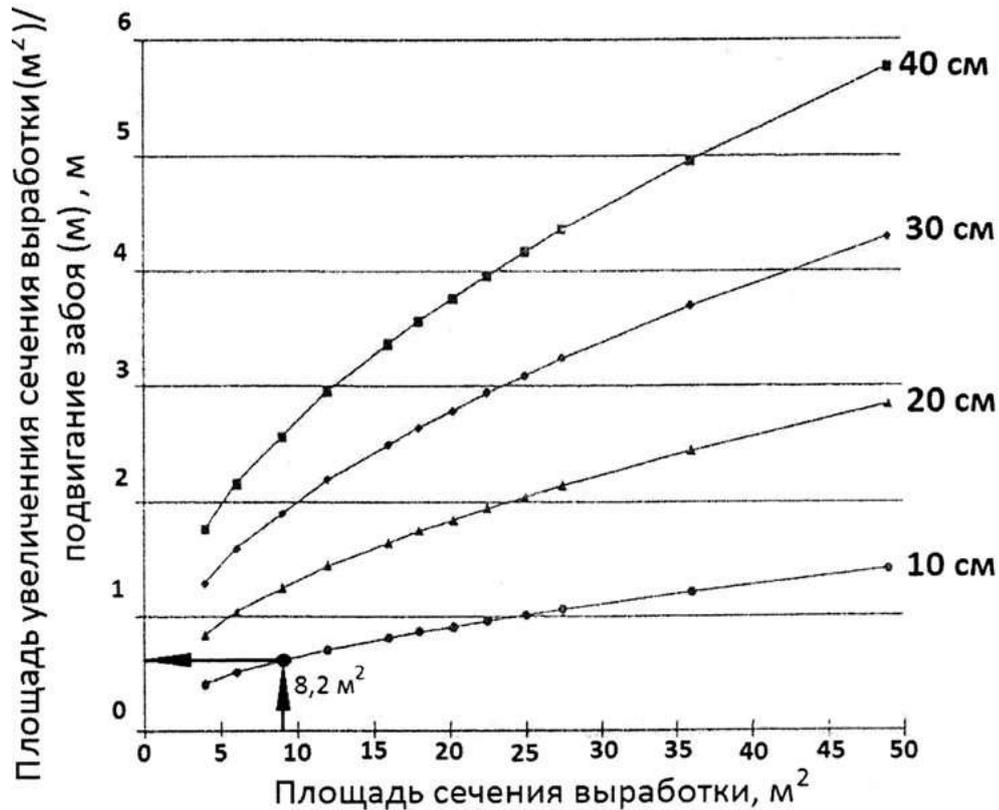


Рисунок 6.11 – Зависимость площади увеличения сечения выработки при различной длине подвигания забоя, от радиуса зон нарушения горных пород взрывом ( $R_{зип} = 10+40$  см)

При проведении экспериментальных исследований разработаны параметры бурогидровзрывных работ. За основу взяты параметры очистных лент (забоев) отработки горизонтальных и пологопадающих, тонких и маломощных жил камерно-столбовой системой разработки [Галченко, Сабянин, 2011; Еременко и др., 2015], наиболее подходящей для данных условий разработки корундовых месторождений, расположенных в горах на высоте более 2 км [Барнов, Еременко и др., 2015).

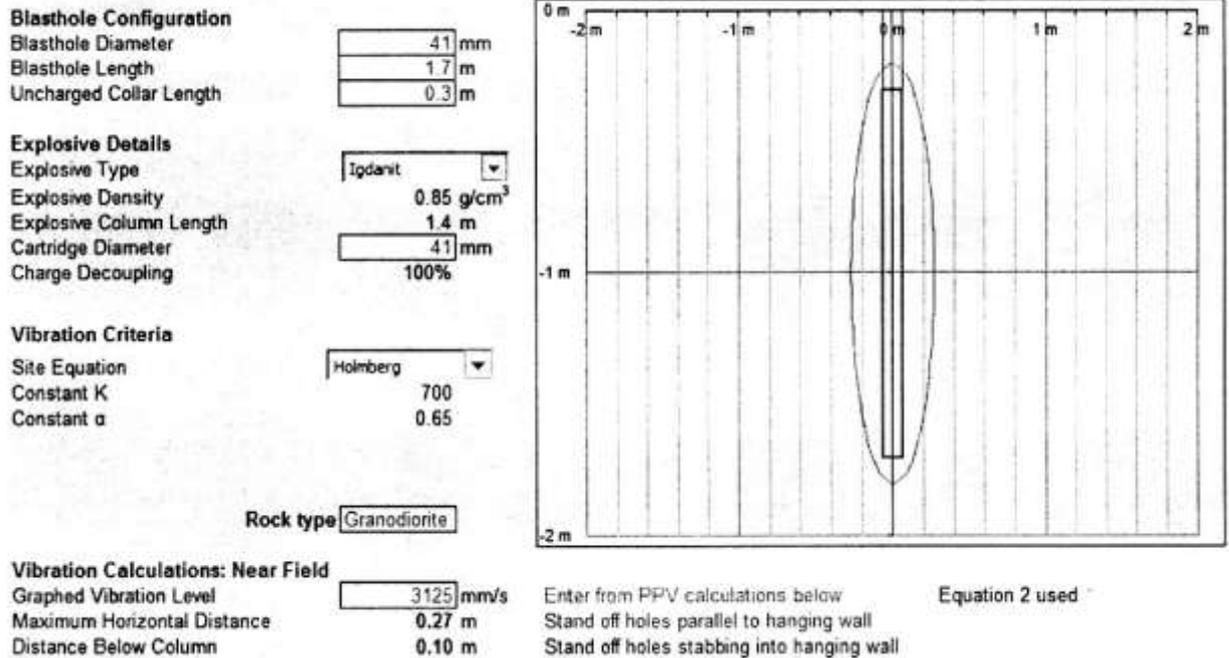
Для раскрытия трещин гидроразрыва и отбойки сформированных блоков проводится щадящий взрыв с эффектом декаплинга на дне центрального шпура или при необходимости в нескольких дополнительных шпурах. Энергия взрыва обычных шпуровых зарядов ВВ повреждает целостность сформированных гидроразрывом блоков руды или снижает их прочность. В результате возникают новые трещины,

плоскости ослабления и напластования, которые были непроницаемы до взрыва, и целостность кондиционного куска нарушается. При этом происходят значительные потери корундового геоматериала, увеличивается разубоживание руды и объемы транспортировки, повышаются требования к креплению выработок и устойчивости горных пород. С помощью специальных методов взрывания, например, предварительного расщепления (раскалывания) взрывом массива по трещинам гидроразрыва сохраняется целостность кондиционных кусков руды. Правильно организованный и проведенный щадящий взрыв позволяет сократить: объемы увеличения сечения выработок, очистной ленты и транспортируемой породы; расходы на крепление выработок и очистного пространства; время и стоимость оборки выработок и установки крепи.

При щадящем взрывании больший эффект достигается в крепких породах и в залежах с горизонтальным напластованием, с минимальным повреждением массива горных пород разломами и природными трещинами

В несвязных, выветрелых, сильнотрещиноватых породах наиболее сложно получить качественный гидроразрыв и достигнуть необходимого эффекта при взрыве (рис. 6.12, ). Схемы расположения шпуров и массу зарядов ВВ необходимо менять в зависимости от свойств горных пород и структурной нарушенности. То, что работает в крепких породах, непригодно в слабых и сильнотрещиноватых массивах (рис. 6.13) [Барнов, Еременкои и др., 2016].

a)



б)

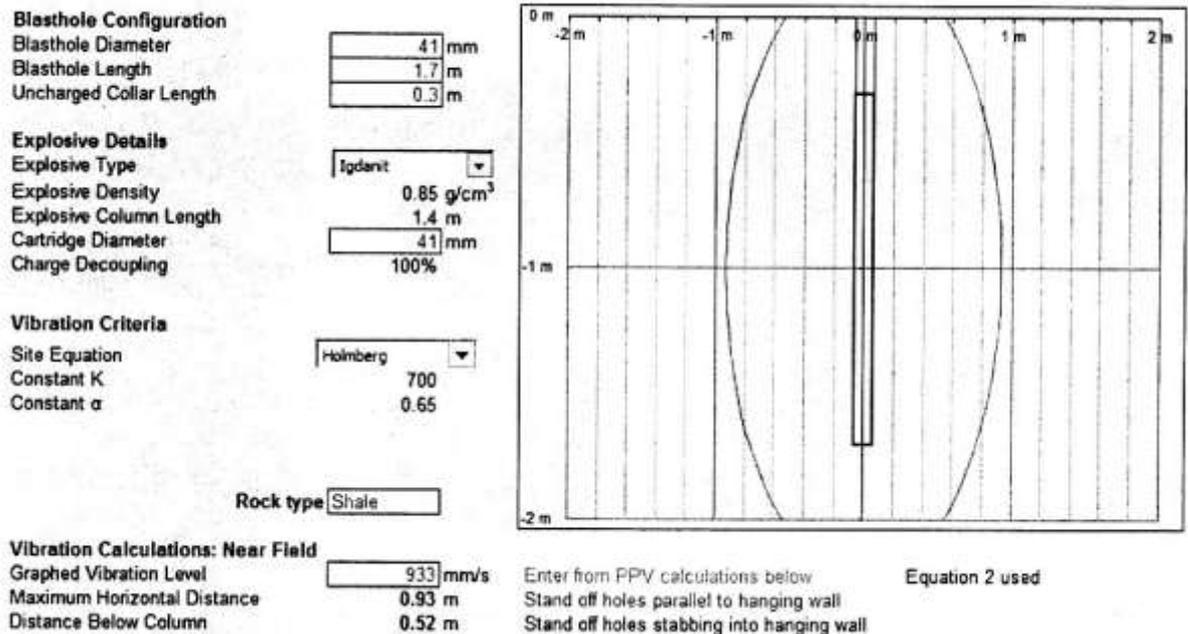


Рисунок 6.12 – Радиус ЗНП при взрывании шпурового заряда ВВ (Игданита) в крепких породах гранодиоритах  $R_{ЗНП}=0,27$  м (а) и слабых сланцах  $R_{ЗНП}=0,93$  м (б).

Blasthole diameter - диаметр шпура (41 мм); Blasthole length - длина шпура (1,7 м); Explosive density - плотность ВВ (Игданита) (0,85 г/см<sup>3</sup>); Cartridge diameter - диаметр патрона (41 мм); Charge decoupling - декаплинг заряда (100 %); Graphed vibration level - уровень колебаний в ближней зоне (в гранодиоритах - 3125 мм/с, в сланцах - 933 мм/с) (Hughes, 1997)

Щадящий взрыв с эффектом декаплинга минимизирует негативное влияние на состояние сформированных гидроразрывом блоков при обработке очистных лент при камерно-столбовой системе разработки и возмущение примыкающего породного массива с помощью следующих технических решений: уменьшения энергии взрыва на метр шпура; сокращения количества шпуров, в которых размещаются заряды ВВ; неполной зарядки шпура; внутри контура взрыва бурятся дополнительные шпуры для поперечного гидроразрыва и проведения щадящего взрыва; детонация зарядов ВВ производится с замедлением для получения свободной поверхности и максимального угла отрыва.

Для достижения большего эффекта щадящего взрыва необходимо уменьшить энергоемкость ВВ на метр шпура. Например, ВВ типа Игданит имеет слишком высокую мощность, однако смесь ВВ типа Impact и Игданит может эффективно применяться в условиях сухих пород. В обводненных породах рекомендуется использовать патронированные ВВ, соединенные трейсерами 10 г/м или другими детонирующими шнурами подходящей мощности, в случае если диаметр патрона намного меньше диаметра шпура.

Масса ВВ и разнесение зарядов ВВ в шпурах при щадящем взрыве обуславливаются типом горной породы, поэтому для определения их параметров необходимо провести тестовые взрывания. Для патронированных зарядов ВВ обычно необходима забойка, например, минеральными ампулами, глиной или подходящими пробками для удержания энергии взрыва и предотвращения выдавливания заряда при малых замедлениях. Оптимальный вариант, при котором заряды ВВ при щадящем взрыве следует инициировать одновременно для обеспечения равномерного разрушения массива по трещинам гидроразрыва. В практике эффективного результата достигают путем инициирования групп зарядов ВВ с равными замедлениями с обеспечением соответствующей свободной поверхности.

ЗНП, примыкающая к шпуру, представляет собой кольцо, в котором механические колебания пород превышают 1400 мм/с, что соответствует уровню трещинообразования [ Louchnikov, 2014]. В качестве примера для сравнения представлен контур ЗНП при взрывании шпуровых зарядов ВВ (Игданита)  $\varnothing$  45 мм (рис. 6.13, а) и зарядов ВВ типа Econotrim (изолированное патронированное ВВ)  $\varnothing$  21 мм в шпурах  $\varnothing$ 45 мм (рис. 6.13, б). В первом случае диаметр ЗНП вокруг шпура составил в среднем 900 мм, во втором – 200 мм.

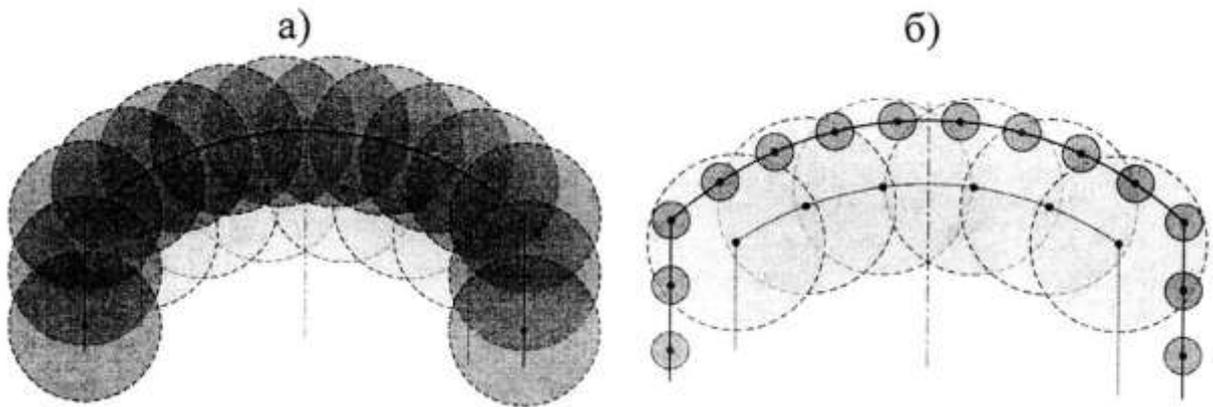


Рисунок 6.13 – ЗНП диаметром 900 мм при взрывании шпуровых зарядов ВВ Игданита  $\varnothing$  45 мм (а) и 200 мм при взрывании ВВ типа Econotrim  $\varnothing$  21 мм в шпурах  $\varnothing$  45 мм (б)

Для уменьшения нарушения сформированных гидроразрывом кондиционных блоков корундсодержащей руды также рекомендуется при проведении щадящих взрывов снижать линейную плотность заряда ВВ на метр шпура. Плотность ВВ можно снизить путем добавления к нему гранулированного полистирола. В качестве альтернативы используются патронированные ВВ с эффектом декаплинга, поставляемые специализированными производителями. При проведении исследований на горнодобывающих предприятиях параметров щадящего взрыва с помощью ВВ различной плотности установлено, что наиболее качественный результат получен при взрывании патронированных ВВ с эффектом декаплинга, а также комбинированного ВВ при соотношении

компонентов смеси 50/50, например, Игданита и гранулированного полистирола.

#### Выводы к главе 6

*Проектный порядок отработки предлагаемым способом позволяет поддерживать постоянную скорость ведения очистных работ при меньших затратах в отличие от других способов отработки маломощных крутопадающих жил. Одновременная отработка трех (четырёх) подэтажей, порядок подготовки участка, очистных и взрывных работ позволяют создать поточность и, как следствие, обеспечить эффективность геотехнологии. Применение при проходке рудных штреков бурогидровзрывной технологии позволяет значительно уменьшить показатели разубоживания и потерь руды, что в значительной степени компенсирует снижение данных показателей при дальнейшей скважинной отбойке массива. Использование для одновременной полной механизированной закладки пустых пород и камер временного складирования позволяет минимизировать расходы на ее транспортирование, хранение и, как следствие, уменьшить экологическую нагрузку на среду обитания человека в ареале влияния горнотехнической системы. Применение бурогидровзрывного способа проходки выработок позволяет уменьшить негативное влияние взрывных работ на среду обитания человека внутри горнотехнической системы за счет их исключения из процесса проходки подготовительных горных выработок.*

*Для сохранения рублинов в условиях применения технологии гидроразрыва при освоении коренных месторождений корунда камерно-столбовой системой разработки рассмотрены варианты проведения щадящих взрывов зарядами ВВ с эффектом декаплинга для отбойки сформированных разрывом блоков с сохранением их целостности.*

## **ГЛАВА 7. Обоснование механизма селективной дезинтеграции корундсодержащих горных пород с целью извлечения полезного компонента**

### 7.1 Механизм дезинтеграции горных пород семейства минералов корунда

Процесс добычи и переработки полезных ископаемых сопровождается стадиями дробления и измельчения с целью извлечения ценных минералов. При этом на стадиях обогатительного передела измельчение горных пород является наиболее энергоемким и дорогостоящим технологическим процессом. Одним из путей повышения технико-экономической эффективности обогатительного передела является реализация селективной дезинтеграции, что позволяет увеличить выход минерального сырья и снизить энергозатраты за счет понижения степени измельчения при увеличении размеров конечной фракции. Проблема селективной дезинтеграции особенно актуально стоит при добыче сырья для ювелирных целей и обрабатывающей промышленности, где ценность размеров конечного продукта трудно переоценить [Хопунов, 2013; Барнов, Каркашадзе, 2017]. Например, при добыче семейства минералов корунда (рубины, сапфиры) нахождение корунда часто связано с корундовыми сиенитами и сиенит-пегматитами, образующими дайки и жилы в толщах щелочных сиенитов или гранито-гнейсов и гнейсов вблизи контактов их с массивами щелочных или нефелиновых сиенитов. К подобным объектам относятся 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.

Минералы корунда в продуктивных толщах отличает большое разнообразие форм. Весьма актуальной технической задачей является именно селективная дезинтеграция с целью максимального сохранения благородного корунда. Необходимо обеспечить дезинтеграцию горной породы по граничной поверхности ценного минерала и вмещающей минеральной среды. В промышленных масштабах поставленная задача может быть решена путем рационального выбора дробильно-измельчительного оборудования и оптимизации механизмов направленного механического и физического воздействия [Ревнивцев и др., 1988].

При решении задачи извлечения рудных минералов с тонкими вкраплениями во вмещающих породах в процессе рудоподготовки, широко применяют мельницы самоизмельчения с размерами фракций до 20 мкм. Такие мельницы обеспечивают более полное раскрытие ценных минералов, способствуя получению рудных концентратов высокого качества. Однако задача селективности разрушения в данном случае практически не решается и положительный эффект достигается преимущественно за счет измельчения до самых мелких фракций. Очевидно, что при решении задачи извлечения ценных минералов для ювелирной отрасли такой метод не подходит.

Используемые на практике машины для дробления материалов в зависимости от назначения и принципа действия машин реализуют следующие методы разрушения: раздавливание, ударное воздействие, раскалывание и излом. При этом одновременно могут реализоваться

несколько механизмов разрушения в зависимости от режимов работы дробилок [Газалеева и др., 2014].

Щековые дробилки осуществляют разрушение горных пород преимущественно раздавливанием и частично истиранием между двумя плитами-щеками при их периодическом сближении. В данном случае в разрушаемой горной породе создается напряженное состояние, аналогичное одноосному режиму механического воздействия сжатием.

Конусные дробилки реализуют процесс разрушения раздавливанием, изломом и частично истиранием между двумя коническими поверхностями, одна из которых движется эксцентрично по отношению к другой. При этом в разрушаемой горной породе создаются напряжения, аналогичные одноосному режиму сжатия совместно со сдвиговыми напряжениями.

Валковые дробилки реализуют процесс разрушения раздавливанием между двумя валками, вращающимися навстречу один другому. Напряженное состояние в материале можно охарактеризовать как неравномерное двухосное.

Дробилки ударного действия, в том числе молотковые или роторные, осуществляют разрушение ударами шарнирно подвешенных молотков или жестко прикрепленных к ротору бил. Реализуются также удары дробимого материала об отражательные плиты и соударения друг с другом. Механизм силового нагружения обусловлен сосредоточенными силами, действующими с одной поверхности, и массовыми силами инерции, распределенными по всему объему разрушаемого материала – навстречу силе удара.

## 7.2 Селективная дезинтеграция и роль компьютерного моделирования

В процессе дробления горная порода разрушается за счет распространения трещин под действием комбинаций различных видов силовых воздействий. Изучение механизма селективного разрушения горных пород базируется на актах управляемого объемного или

поверхностного силового воздействия, создающего в объеме минералов различные напряженно-деформированные состояния [Газалеева и др., 2015]. С точки зрения управляемой селективной дезинтеграции минерального сырья необходимо стремиться к тому, чтобы разрушающая энергия над поверхностью ценного минерала превосходила ту же энергию в его объеме. В этом случае можно утверждать, что процесс распространения трещин будет происходить преимущественно вдоль поверхности минерала, решая тем самым задачу селективной дезинтеграции и повышения степени раскрытия минералов. Представлена методика расчета критерия эффективности селективного дробления горных пород, применяемая 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 компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении наибольшего эффекта селективной 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. Исследования представляют интерес при разработке новых технологий селективной дезинтеграции с выделением ценных и ювелирных минералов [Федотов, 2014; Барнов, Каркашадзе, 2017].

Рассмотрим критерий в виде отношения энергии формоизменения на поверхности эллипсоида к этой же энергии в его объеме. Принимаем во внимание, что чем больше энергии будет сосредоточено на поверхности зерна по отношению к энергии в его объеме, тем больше вероятность сохранности зерна при условии разрушения слоя на контакте зерен и внешней матрицы. Критерий сохранности зерна выглядит так:

$$\chi = \frac{\sigma_{sm} \Delta V}{U_m}, \quad (7.1)$$

где  $\sigma_{sm}$  – усредненное значение критерия Мизеса на поверхности эллипсоида;

$\Delta V$  – объем рассматриваемого поверхностного слоя эллипсоида толщиной  $\delta$ :

$$\Delta V \approx \pi (ab + ac + bc) \delta; \quad (7.2)$$

для определенности примем в расчетах толщину слоя, равную 10 % от минимальной полуоси эллипсоида:

$$\delta = 0,1a. \quad (7.3)$$

Примем также во внимание, что площадь поверхности эллипсоида составляет:

$$S = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\delta} = \frac{4}{3} \pi (ab + ac + bc). \quad (7.4)$$

Актуальную научную задачу обоснования режима силового нагружения горных пород, обеспечивающего селективную дезинтеграцию минерального сырья при дроблении, можно проводить экспериментальным и (или) теоретическим методом.

В практике обогатительного передела широко используют экспериментальные методы в лабораторных и производственных условиях. Действительно, технологические схемы, оборудование и режимы работы дробления и измельчения находятся под постоянным контролем технологов, что позволяет получить важные практические рекомендации [Барнов, Раджабов, Чихладзе, 2015]. Однако недостатком такого подхода является необходимость учета многообразных случайных и неуправляемых факторов, включая вариацию исходных физических свойств минерального сырья и режимов работы оборудования. Поэтому выявление и надежное статистическое доказательство положительного эффекта представляет собой не простую научную задачу. Более достоверную информацию с минимальным количеством случайных факторов можно получить в лабораторных условиях, однако перенос

лабораторных результатов в реальный производственный процесс влечет за собой погрешности масштабного фактора.

**Селективная дезинтеграция.** Процесс добычи и переработки полезных ископаемых предусматривает стадии дробления и измельчения с целью последующего извлечения ценного компонента минерального сырья. Одним из путей повышения технико-экономической эффективности обогатительного передела является реализация технологий селективной дезинтеграции, что позволяет увеличить выход годного минерального сырья и снизить энергозатраты (Газалеева и др., 2015). Проблема селективной дезинтеграции имеет особую актуальность при добыче сырья для ювелирных целей, где ценность крупных размеров конечного продукта возрастает многократно. Особого внимания заслуживают месторождения корунда, главным образом рубина, в метаморфизованных мраморах. В минеральном строении таких горных пород общей структурной особенностью является материнская порода с включениями корунда и рубина разнообразных размеров и конфигураций. Выделение этих минералов из материнской породы без переизмельчения представляет огромный практический интерес. Перспективным примером месторождений такого типа может служить Кучинское месторождение на Южном Урале, месторождение Снежное (Таджикистан), месторождение Хунза (Пакистан), Джегдалек (Афганистан) и др.

В промышленных масштабах поставленная задача решается путем выбора рационального дробильного оборудования и оптимизации режимов механического воздействия (Газалеева и др., 2014).

Для реализации метода компьютерного моделирования применительно к проблеме обоснования метода селективного дробления горных пород необходимо решить следующие задачи:

- 1) Обосновать критерии оценки напряженного состояния на кусок горной породы, влияющие на процесс селективного разрушения;

- 2) Разработать методику учета влияния граничных условий силового воздействия на кусок горной породы, влияющих на критерий селективного разрушения в сложнапряженном состоянии;
- 3) Выбрать оборудование, обеспечивающее селективность дробления в различных условиях механического нагружения;
- 4) Исследовать влияние геометрической формы ценного минерала на селективность разрушения;
- 5) Установить влияние модулей деформаций минерального зерна и вмещающей среды на фактор селективности разрушения.

Во всех известных технологиях дробления горная порода разрушается за счет распространения трещин растяжения и сдвига под действием внешних силовых воздействий. Для обоснования наиболее рационального режима разрушения воспользуемся показателем эффективности селективной дезинтеграции породы. За основу результативного критерия сохранности зерна принимаем условие, при выполнении которого энергия деформаций среды над поверхностью ценного минерала превосходила бы ту же энергию в его объеме. Для этой цели в расчетах используем энергию формоизменения, пропорциональную напряжениям Мизеса и отражающую долю касательных напряжений в полной энергии деформаций [Мизес, 1948; Mises, 1964; Ишлинский, Ивлев, 2001]. С точки зрения управляемой селективной дезинтеграции минерального сырья необходимо стремиться к тому, чтобы разрушающая энергия над поверхностью ценного минерала превосходила ту же энергию в его объеме. Очевидно, что в этом случае процесс распространения трещин будет происходить преимущественно вдоль поверхности ценного минерала, сохраняя целостность его объема.

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:

$$U_m = [(\sigma_1 - \sigma)^2 + (\sigma_2 - \sigma)^2 + (\sigma_3 - \sigma)^2], \quad (7.5)$$

где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение, Па;

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}, \quad (7.6)$$

$G$  – модуль сдвига, Па.

Критерий сохранности зерна:

$$\chi = \frac{U_{m1}}{U_{m2}}, \quad (7.7)$$

где  $U_{m1}$  – энергия формоизменения в поверхностном слое над поверхностью эллипсоида;

$U_{m2}$  — энергия формоизменения зерна, Дж/м<sup>3</sup>.

Критерий эффективности напряженного состояния, влияющего на процесс селективного разрушения, представим в виде отношения:

$$F = \frac{U_{2m}}{U_{3m}}, \quad (7.8)$$

$U_{2m} = \sigma_{sm} \Delta V$ , Дж/м<sup>3</sup>;

$\sigma_{sm}$  – усредненное значение критерия Мизеса (Мизес, 1948) в объеме над поверхностью эллипсоида;

$\Delta V$  – объем рассматриваемого поверхностного слоя эллипсоида толщиной  $\sigma$ :

$$\Delta V = \pi [(a + \delta) \cdot (b + \delta) \cdot (c + \delta) - abc], \quad (7.9)$$

$U_m$  – удельная энергия формоизменения самого эллипсоида, Дж/м<sup>3</sup>;

$U_{3m}$  – удельная энергия формоизменения в объеме над эллипсоидом, Дж/м<sup>3</sup>.

Примем также во внимание, что площадь поверхности эллипсоида составляет

$$S = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\Delta V}{\delta} = \frac{4}{3} \pi (ab + ac + bc). \quad (7.10)$$

Для определённости и сравнительного сопоставления расчетов примем толщину слоя, равную 10 % от минимальной полуоси эллипсоида –  $\delta = 0,1a$ . Для начала рассмотрим вариант, аналогичный структурному расположению минерала корунда внутри матрицы материнской породы – мрамора. В этом 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 полуосей эллипсоида вращения:  $a = b = 0,005$  м;  $c = 2a = 0,01$  м. Матрица представлена кубиком со сторонами 0,1 м.

При моделировании напряженно- деформированного состояния среды при различных условиях разрушения использован программный пакет Structural Mechanics Module «Solid, Stress- Strain» COMSOL Multiphysics. На рис. 7.1 представлен геометрический объект моделирования, отражающий расположение единичного минерального зерна в материнской породе – матрице.

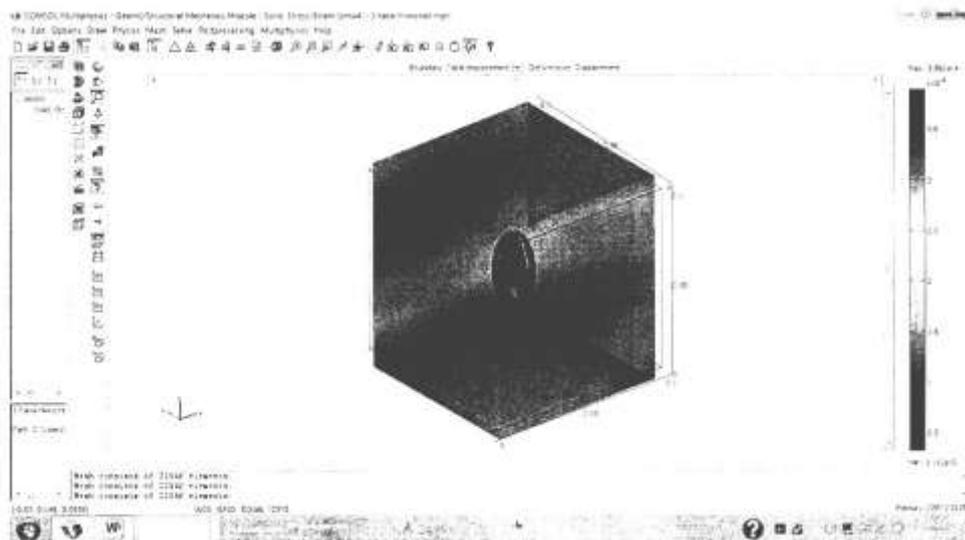


Рисунок 7.1 – Объект моделирования – эллипсоидальное минеральное зерно в матрице

На данной стадии моделируем одноосное напряженное состояние, вызванное действием в направлении  $Z$  постоянного сжимающего напряжения  $P_z = 10$  МПа. Наиболее близкий технологический аналог процесса дробления реализуется в щековой дробилке.

В качестве критерия сохранности зерна при условии разрушения границы рассмотрим критерий в виде отношения энергии формоизменения на поверхности эллипсоида к этой же энергии в его объеме. На рис. 7.2 представлена модель горной породы с единичным зерном 3 (ценный минерал) в виде эллипсоида вращения, заключенная в матрицу 1 (вмещающая порода). Принимаем во внимание, что чем больше энергии формоизменения будет сосредоточено в объеме 2 над поверхностью ценного зерна по отношению к этой же энергии в его объеме 3, тем больше вероятность сохранности зерна. Для определенности и сравнительного сопоставления различных условий примем в расчетах толщину слоя 2, равную 10 % от минимальной полуоси эллипсоида.

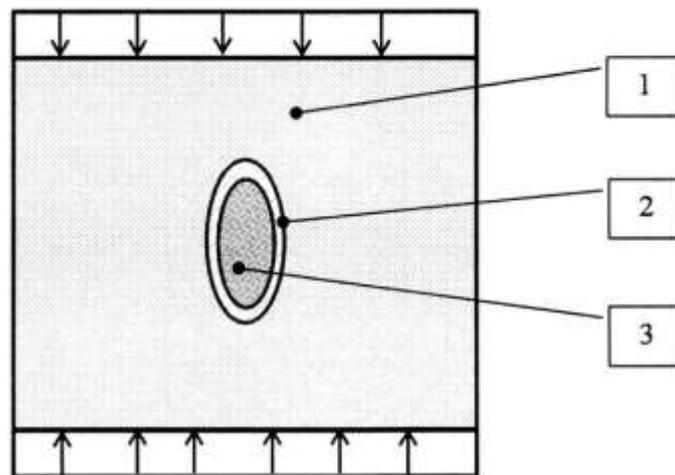


Рисунок 7.2 – Геометрическая модель объекта моделирования: 1– вмещающая среда; 2 – пограничный объем; 3 – ценный минерал

В качестве примера рассмотрим вариант, аналогичный структурному расположению минерала корунда внутри матрицы материнской породы мрамора. В этом 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.

Как отмечалось, одноосное напряженное состояние, вызванное действием в направлении большой полуоси эллипса сжимающих напряжений, характерно для процесса дробления в щековой дробилке. При величине сжимающих напряжений 10 МПа в породе реализуются напряжения Мизеса [Мизес, 1948], величина которых внутри ценного минерального зерна на- много больше, чем на поверхности. Эта ситуация продемонстрирована на рис. 7.3. Следовательно, вариант дробления в щековой дробилке приводит к переизмельчению ценных минералов. При этом удельная энергия формоизменения в выделенном объеме вокруг эллипсоида составляет  $U_{2m} = 1,96 \cdot 10^6$  Дж/ м<sup>3</sup>; эта же энергия внутри эллипсоида равна  $U_{3m} = 1,64 \cdot 10^6$  Дж/ м<sup>3</sup>. Следовательно, критерий эффективности селективного разрушения в варианте использования щековой дробилки составляет:

$$\chi = = = 1,19. \quad (7.11)$$

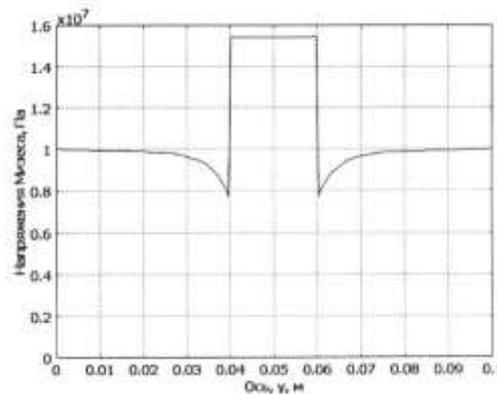


Рисунок 7.3 – Напряжения Мизеса (Мизес, 1948) вдоль оси  $y$  при одноосном напряженном состоянии

В последующих анализах результатов моделирования, установлено, что чем больше величина  $F$ , тем это лучше с позиций селективного разрушения. По данной методике выполнены аналогичные расчёты для варианта двусосного напряженного состояния, характерного для механизма разрушения в валковой дробилке.

В данном случае вдоль оси  $y$  действующее напряжение создает аналог двусосному напряженному состоянию.

Рассмотрим действие двух одинаковых напряжений:  $P_z = 10$  МПа;  $P_y = 10$  МПа;  $P_x = 0$ . На рис. 7.4 представлено распределение напряжений Мизес в том же направлении, как на рис. 7.3. Картина распределения напряжений не изменилась.

Удельная энергия формоизменения в выделенном объеме вокруг эллипсоида  $U_{2m} = 2,02 \cdot 10^6$  Дж/ м<sup>3</sup>; энергия внутри эллипсоида  $U_{3m} = 1,46 \cdot 10^6$  Дж/ м<sup>3</sup>. Соответственно, критерий эффективности селективного разрушения составляет

$$F = \frac{U_{2m}}{U_{3m}} = \frac{2,02 \cdot 10^6}{1,46 \cdot 10^6} = 1,38. \quad (7.12)$$

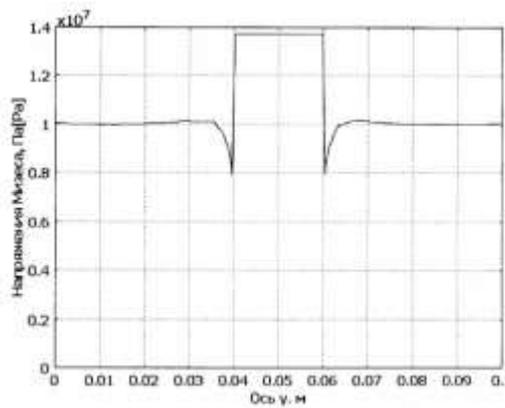


Рисунок 7.4 – Напряжения Мизеса [ Мизес, 1948] вдоль оси  $y$  при двухосном напряженном состоянии

Таким образом, двухосный режим разрушения имеет более высокий критерий селективности, чем одноосный.

Расчетная величина критерия сохранности зерна составляет  $\chi = 1,38$ , что свидетельствует о том, что этот вариант с точки зрения селективного разрушения имеет несколько большие преимущества по сравнению с одноосным напряженным состоянием.

Из всех проанализированных механизмов разрушения установлено, что наибольшие значения критерия эффективности селективности разрушения достигаются в технологиях дробления «в слое», когда куски горной породы дезинтегрируются в условиях всестороннего сжатия.

Рассмотрим действие трех одинаковых напряжений:  $P_z = P_y = P_x = 10$  МПа. На рис. 7.5 представлено распределение напряжений Мизеса, в том же направлении  $y$ , как и в предыдущих случаях (рис. 7.3, 7.4). При сравнении картины распределения напряжений, представленных на графиках рис. 7.3, 7.4, на графике рис. 7.5 прослеживается возможность максимального сохранения ценного минерального зерна, так как напряжения в этом случае принимают минимальные значения по сравнению с предыдущими вариантами нагружения. Наиболее вероятная область распространения трещин находится на границе зерна в материнской породе.

Критерий эффективности селективного разрушения составляет:

$$F = \frac{U_{2m}}{U_{3m}} = \frac{2,68 \cdot 10^5}{0,61 \cdot 10^5} = 4,39. \quad (7.13)$$

При трехосном всестороннем равномерном сжатии имеет место наибольшее значение критерия селективности. Такой режим разрушения можно на практике реализовать, если разместить исходную горную породу с ценными минеральными включениями, например, в песке.

На рис. 7.4 представлено распределение напряжений Мизеса в направлении  $y$ . В данном случае картина распределения напряжений кардинально изменилась, поскольку наибольшие значения напряжений Мизеса распределяются преимущественно в поверхностном слое. При этом подтверждается возможность максимального сохранения исходных размеров ценного минерального зерна, поскольку трещины будут распространяться вдоль границы – без проникновения в объем зерна. Что касается критерия эффективности селективности разрушения, то его величина составляет  $\chi = 4,39$ , что является наибольшим значением, полученным по результатам моделирования.

На рис. 7.6 представлено распределение напряжений Мизеса под действием  $\square$ раскалывающих сосредоточенных нагрузок, расположенных

вдоль оси симметрии. Производственный аналог – разрушение в конической дробилке:

$$P_z = 10 \text{ МПа} (x < 0,0075 \text{ м}) \cdot (x > 0,0025 \text{ м}); P_y = P_x = 0.$$

Критерий эффективности селективного разрушения

$$F = \frac{U_{2m}}{U_{3m}} = \frac{1,68 \cdot 10^5}{1,42 \cdot 10^5} = 1,18. \quad (7.14)$$

С точки зрения селективности разрушения – этот вариант наихудший.

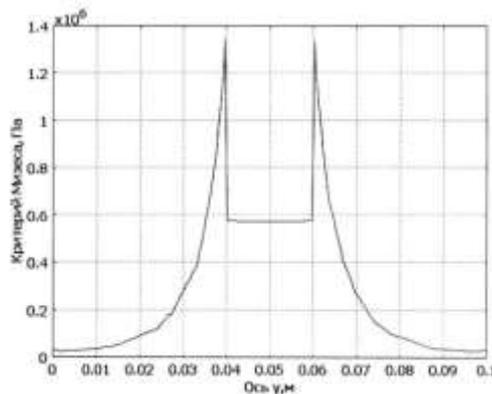


Рисунок 7.5 – Распределение напряжений Мизеса [ Мизес, 1948] при всестороннем равномерном сжатии

Распределение клиновидного напряжения, вызванного ударом при вращении по куску в полете:

$$P_z = (x < 0,075) \cdot (x > 0,025) \cdot 107 \text{ Па}. \quad (7.15)$$

Объемная сила инерции противоположная ( по третьему закону Ньютона):

$$Q_z = P_z \cdot \delta^2 / a^2. \quad (7.16)$$

Критерий эффективности селективного разрушения

$$F = \frac{U_{2m}}{U_{3m}} = \frac{122,1 \cdot 10^7}{73,6 \cdot 10^7} = 1,65. \quad (7.17)$$

По результатам компьютерного моделирования прогнозируются наилучшие показатели селективного дробления в случае равномерного

трехосного сжатия куска горной породы и разрушения на границах минеральных зерен под действием возникающих при этом касательных напряжений. В широком производстве аналоги данных типов дробилок, реализующих дробление в условиях всестороннего сжатия, применяются редко. Причиной является высокая удельная энергоёмкость и низкая производительность дробления в условиях всестороннего сжатия. Данные дробилки вряд ли применимы при дроблении и измельчении руд (железистые кварциты, руды цветных металлов) при масштабной переработке полезных ископаемых. Что касается дробления особо ценных горных пород, например, при извлечении минералов корунда (рубины, сапфиры), то в этом случае вопрос энергоёмкости не имеет принципиального значения и технология представляется весьма перспективной.

В табл. 7.1 представлены результаты расчётов критерия селективного разрушения применительно к описанным выше технологиям дробления.

Таблица 7.1 – Результаты компьютерного моделирования

| № п/п | Механизм дробления   | Внешние напряжения  | Критерий эффективности селективного разрушения |
|-------|--|---|--|
| 1     | Конусная дробилка – раскалывающие сосредоточенные напряжения на противоположных гранях | Одноосное сосредоточенное напряженное состояние:<br>$P_x = P_y = 0; P_z = 10 \text{ МПа}$ | 1,18   |
| 2     | Щековая дробилка – распределенные напряжения на противоположных гранях                 | Одноосное напряжённое состояние:<br>$P_x = P_y = 0; P_z = 10 \text{ МПа}$                 | 1,19   |

|   |  |  |      |
|---|--|--|------|
| 3 | Валковая мельница –<br>распределённые<br>напряжения по двум осям | Двухосное напряженное<br>состояние:<br>$P_x = 0; P_y = P_z = 10$ МПа | 1,38 |
| 4 | Молотковая дробилка  | Удар с силами инерции:<br>$P_x = 0; P_y = 0; P_z = 10$<br>МПа        | 1,65 |
| 5 | Дробление в закрытом<br>сосуде, заполненном<br>песком            | Трехосное равномерное<br>сжатие:<br>$P_x = P_y = P_z = 10$ МПа       | 4,39 |

Технологический вариант с реализацией режима дробления в условиях трехмерного сжатия реализуется, если поместить исходную горную породу в емкость с сыпучей средой.

Следует отметить, что подобный механизм дробления под действием всесторонних сжимающих напряжений реализуется в способе виброинерционного разрушения материалов, при котором материал разрушается «в слое» при заданной регулируемой нагрузке в условиях интенсивного вибрационного воздействия при крутильных колебаниях. Перемешивание крупных и твердых фракций в процессе вибраций способствует более полному проявлению механизма разрушения в режиме всестороннего сжатия.

Вариант селективного разрушения горных пород с включениями ценных минералов под действием всесторонних сжимающих напряжений испытан в лабораторных условиях. Экспериментальная установка включает в себя пресс, передающий сжимающее усилие через поршень в полость цилиндрического стакана. В объеме стакана размещают куски породы с ценными минералами. Свободное пространство между кусками породы заполнено кварцевым песком. Методикой экспериментов предусмотрено приложение нагрузки на поршень для реализации первого

и последующего актов уплотнения и разрушения породы. После каждого акта силового воздействия из стакана извлекалась раздробленная масса и просеивалась на ситах. Селективность разрушения породы оценивалась визуально по количеству и качеству ценных минералов. На (рисунке 7.6) представлены результаты лабораторных испытаний, в которых осуществили дробление кусков метаморфизованных кальцитов, доломита с включениями корундов. Визуально просматривается фактор селективного дробления с проявлением неразрушенных зерен корунда. Полученный результат имеет важное практическое значение в разработке технологий извлечения ценных минералов.

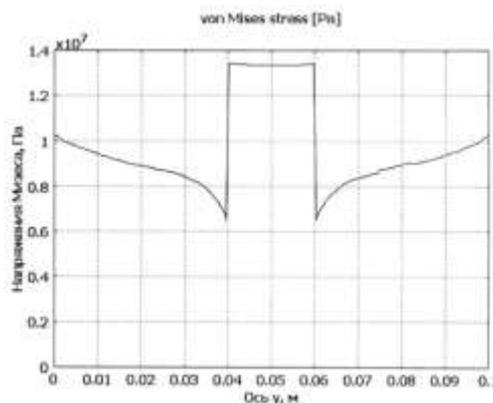


Рисунок 7.6 – Распределение напряжений Мизеса [ Мизес, 1948] под действием раскалывающих нагрузок

Таким образом, в процессе научных исследований разработана методика расчета эффективности селективного дробления, которая может быть использована при сопоставленном анализе использования различных режимов силового воздействия. Доказано, что наилучшие результаты селективного дробления достигаются при реализации режимов всестороннего сжатия, в том числе при сжатии «в слое». Положительный эффект подтвержден лабораторными испытаниями.

7.3 Изучение строения и минерального состава рудных корундсодержащих залежей для селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения полезного компонента

Изучение строения и минерального состава показано на примере месторождения корундов Снежное. Общая горно- геологическая характеристика дана в главе 3. Рудная залежь ( Верхняя зона) месторождения Снежное характеризуется ярким цветом, разнообразием структур, широким набором минералов и большой изменчивостью этих параметров.

Яркий цвет определяют: сахарно- белый и ( или) черный скаполит и плагиоклаз, изумрудно- зеленый и темно- желтый – слюды, черный – графит и рудные минералы, красный различных оттенков – рубин и рутил.

Структура залежи обусловлена кристалломорфологическими формами, размерами минералов и их ориентировкой относительно контактов. Породообразующие минералы по размеру можно разделить на три группы. Первая представлена крупными от 1 до 10 см и более минералами ( чаще всего это рубин), вторая – средними 0,5–1 см ( плагиоклаз и скаполит) и третья мелкими 0,1–0,5 см ( слюды, рутил). Этот признак сильно разнообразит структуру залежи и в некоторых случаях отражает первично- осадочное строение.

По степени кристаллографического совершенства они располагаются в том же порядке, хотя рубин в составе залежи отличается от мономинерального мрамора большей симметричностью и совершенством граней, а также лучшей сохранностью ( меньшей трещиноватостью). В составе слюдитов встречаются правильные кристаллы с высокой симметричностью граней. В этой связи слюдиты необходимо рассматривать как благоприятную вмещающую среду для образования кристаллов. Это вероятно можно объяснить более благоприятной геохимической средой внутри слюдитов, способствующих росту кристаллов в разных направлениях и более пластичной среде, защищающей самоцвет от огромного литостатического давления.

Общую структуру залежи можно определить, как гетеробластовую и точнее порфиробластовую. Можно отметить, что обилие минералов определяет разнообразие структур.

Текстуры залежи также отличаются многообразием. Среди них выделяется сланцеватая, плейчатая, линзовидная, петельчатая и узловатая. Они обусловлены первично-осадочными неоднородностями, возникшими на стадии седиментации.

Форма залежи представляет собой различные конфигурации слоя за счет расширения, сужения и выклинивания. Например, на месторождении Снежное внутрипластовая залежь в мраморах локализуется на определенной поверхности или сближенных до нескольких десятков сантиметров поверхностях. Ее средняя мощность 15 см с расширением не более 0,5 м. Она вскрыта карьером по простиранию на 290 м и на глубину до 30 м. Поверхности мраморов в контакте со слюдами часто имеют волнообразную форму. Граница между ними всегда резкая, иногда на ней наблюдаются зеркала скольжения.

Резкие контакты залежи объясняются поднятием территории и влиянием экзогенных геологических процессов. Подобная картина происходит при смене морского седиментогенеза на континентальный и прибрежно-морской.

В составе залежи фиксируются не менее 4-х видов слюд: флогопит, фуксит, мусковит, голубые слюды (в форме розеток). При большом разбросе содержаний петрогенных компонентов их объединяет одинаковое содержание  $K_2O$  (от 10,09 до 11,60 мас. %). В значительных количествах, помимо других минералов, в интерстициях слюд отмечается карбонат, по-видимому, кальцит.

Вторым в количественном отношении минеральным образованием залежи являются скаполит и плагиоклаз. Они образуют линзовидные межслюдные скопления до 2 см в поперечнике или самостоятельные хорошо обособленные порфиробласты. В составе слюдитов они

распределены неравномерно и почти всегда содержат пойкилобластовые включения слюд, карбоната, рутила, пирита и др.

Скаполит образует чаще всего бесформенные выделения, но иногда встречается в форме длиннопризматических, игольчатых, белых кристаллов с зеркальными гранями призмы, с характерной продольной штриховкой. Они вытянуты вдоль сланцеватости слюдитов. Его состав варьирует от 25-40 до 80 % ( $n_g=1,590$ ,  $n_p=1,560 \pm 0,003$ ) мейонитовой молекулы. Плагноклаз образует вытянутые вдоль сланцеватости слюдитов кристаллы часто черного цвета, на гранях которых видны параллельные линии полисинтетических двойников. Черный цвет в нем определяют многочисленные минеральные включения. Его состав отвечает 46 % анортитовой молекулы. Однако отмечался геологами «Памиркварцсамоцветы» альбит. Эти разновидности плагноклаза наблюдались в виде кайм вокруг рубина. Как правило, кристаллы плагноклаза «забиты» включениями слюд, рутила, турмалина, циркона и других минералов. В шлифах они напоминают ячеистую, мозаичную структуру.

Из минералов титана доминирует рутил. Чаще всего он образует очень мелкие (сотые доли миллиметра) без граней, изометричные или призматические кристаллы черного цвета, но наблюдаются срезы и красновато-бурого цвета. Они встречаются в виде включений в крупных минералах, формируя участки пойкилобластовых структур. Рутил также отмечается в графитовых «пленочных» выделениях размером  $2 \times 2 \times 0,03$  см. Наблюдаются и одиночные крупные порфиробласты красного рутила, сопоставимые по размеру с основными минералами слюдитов.

Титанит образует две группы форм. Первая - «конвертообразные» крупные мутные порфиробласты, которые замещены полупрозрачными вытянутыми кристаллами рутила. В отдельных шлифах их количество достигает 25-30 %. Вторая группа, это микроскопические изометричные, без граней, включенные внутрь основных минералов. Незамещенные

кристаллы титанита практически не наблюдаются. От него остались одни конвертообразные формы. Что является причиной неустойчивости титанита, минерала, широко развитого в пределах музкольской серии, внутри слюдитов можно объяснить особым характером флюидов, имеющих местный источник.

Графит образует очень мелкие тонкие чешуйки, занимающие интерстиции породообразующих минералов. Возможно, «пылеобразное» вещество, наблюдаемое внутри рубина и других минералов, также представлено графитом. Часто отмечаются очень тонкие пленки графита на гранях рубина или в интерстициях слюд. Акцессорными минералами залежи также являются турмалин, пирит, апатит и циркон. Последний представлен полуокатанными утолщенными кристаллами со следами транспортировки. Они слабо окатаны. В нем определена изоморфная примесь гафния в количестве ( $\text{HfO}_2$ ) от 0,8 до 2,0 мас. %. Циркон фиксируется внутри плагиоклаза и скаполита.

Рубин слюдитовой залежи распределяется в ее контурах очень неравномерно, составляя от 30 до 95 % ее объема. Отмечаются практически мономинеральные участки залежи мощностью 10-15 и длиной 20-50 см, сложенные тесно сросшимися кристаллами рубина. В этом случае они ориентируются удлинением вдоль слоистости мраморов. Мономинеральные обособления рубина имеют форму линз, желваков и коротких, ограниченных вертикальными поверхностями пластов, напоминающих тротуарную плитку. Подобные обособления более характерны для Нижней зоны.

В составе слюдитов рубин образует скопления одиночных кристаллов, ориентированных от направления вдоль контактов и параллельно спайности слюд до перпендикулярного к ним. Рубин образует кристаллы от 1 до 10 и более см по длине оси. Часто они имеют яркокрасный цвет различных оттенков. В музее экспедиции «Памиркварцсамоцветы» в советское время хранилось пять обломков

кристаллов длиной 20-23 и в поперечнике 7-10 см и весом более 2 кг. Эти кристаллы являются одними из крупнейших в мире.

Качественные характеристики кристаллов и их геммологические свойства улучшаются благодаря присутствию глинистого вещества, которое сохраняет самоцвет от внешнего воздействия.

В желваковидных обособлениях наблюдается формирование граней по касательным направлениям к округлым поверхностям. Часто на них наблюдаются каверны и пустотки, которые производят впечатление о растворении минерала. Каверны и пустотки на поверхности желваков рассматриваются как образования, возникшие еще на стадии диагенеза бокситоподобного материала за счет сингенетичного материала. Недоразвитые грани, по-видимому, являются результатом влияния вмещающих пород.

В шлифах рубин имеет слабую светло-розовую окраску с едва заметным плеохроизмом. В некоторых разрезах, в центральных частях иногда наблюдаются синие прозрачные пятна и полосы или же пылеобразные твердые, а также газово-жидкие мелкие скопления. Некоторые зерна имеют широкие, с нечеткими краями полисинтетические двойники и две системы несопадающей с ними совершенной спайности, пересекающейся под углом близким к  $90^\circ$ . Линии спайности располагаются под углом к плоскости пинакоида.

Приведенный минералогический материал свидетельствует о двух возрастных генерациях залежей: поздняя, представленная рубином и его видимой невооруженным глазом ассоциацией, и ранняя. Последняя наблюдается в виде пойкилобластовых включений в скаполите, плагиоклазе и самом рубине.

При исследовании окраски рубинов нами было установлено, что содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в пределах шлифа из розового рубина меняется от 0,24 до 0,00 мас. %.

Плотность самоцвета 3,995-4,012 г/см<sup>3</sup>, показатель преломления ( без определения оптической индикатрисы) средне- густо окрашенных рубинов 1,763–1,771, а слабо – 1,761–1,769. По этим параметрам рубины месторождения Снежное сопоставимы с рубинами месторождений Джегдаллек ( Афганистан), Могок ( Мьянма), Майт ( Таиланд), Хунза ( Пакистан) и Лонгидо ( Танзания). Внутри рубина отмечаются многочисленные включения рутила, карбоната и слюд. Для рутила характерны окатанные кристаллы, кальцит характеризуется отсутствием примеси MgO ( стерильным кальцитовым составом), а слюды представлены бесхромным, мало титанистым мусковитом. В качестве изоморфной примеси отмечается Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в количестве 0,3–0,5 мас. %. Вариации его количества определяют многообразие тонов и оттенков самоцвета.

При проведении исследований выполнено рентгеновское исследование различно окрашенных корундов. Ставилась задача проследить влияние изоморфных примесей на структуру минерала. Получены дифрактограммы 3х различно окрашенных минералов: бесцветного, синего и красного. Они практически полностью идентичны, за исключением бесцветного корунда. Его некоторые отличия объясняются тем, что в нем появляется пик другой фазы, по-видимому, диаспора. Все остальные пики, во всех минералах показывают, что элементы- хромофоры не влияют на структуру самоцвета. Этот корунд относится к другому генетическому типу

Представленный материал позволяет обоснованно говорить о двух типах рубиновой минерализации. Первый тип образует полиминеральные линзовидные залежи слюдитов с рубином ( Верхняя продуктивная зона) ( рис. 7.7). В нем самоцвет не имеет стыков с минералами мраморов (с кальцитом), отделяясь от них массой силикатных минералов. Второй тип представлен мономинеральным рубином ( Нижняя продуктивная зона).

Он заключен в мраморный матрикс, контактируя с кальцитом или доломитом, при отсутствии стыков с силикатными минералами

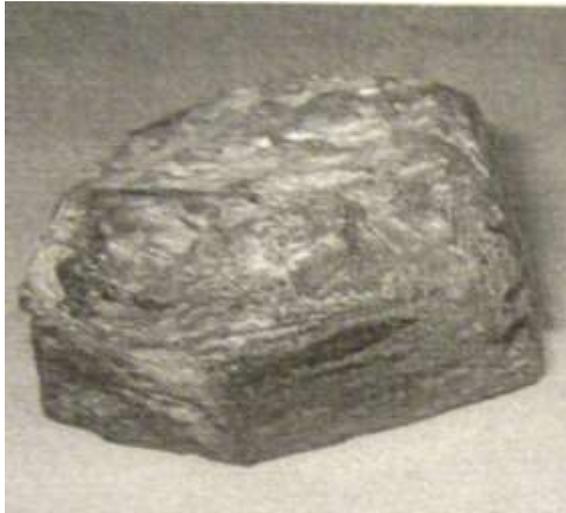


Рисунок 7.7 – Обломки кристаллов рубина из Верхней продуктивной зоны в «фукситовой рубашке», длина 8 см

Качественные характеристики кристаллов и их геммологические свойства улучшаются благодаря присутствию глинистого вещества, которое сохраняет корунд от внешнего воздействия.

#### Выводы по главе 7

*В процессе научных исследований разработана методика расчета эффективности селективного дробления, которая может быть использована при сопоставленном анализе использования различных режимов силового воздействия. Доказано, что наилучшие результаты селективного дробления достигаются при реализации режимов всестороннего сжатия, в том при сжатии «в слое». Положительный эффект подтвержден лабораторными испытаниями.*

*Представлена методика расчета критерия эффективности селективного дробления горных пород при извлечении из них ценных минералов без переизмельчения. На основе компьютерного моделирования сформулирован вывод о достижении наибольшего эффекта селективной 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.*

## **ГЛАВА 8 Исследование способов вскрытия корундоносных пород**

### **8.1 Общие сведения**

В мировой практике при обогащении коренных самоцветов основными свойствами, определяющими выбор методов добычи и обогащения, является минеральный состав породы, крепость породы и слагающих минералов, твердость минералов, их вязкость и хрупкость. Дробление пород перед обогащением проводят щадящее, в три стадии: первая и вторая осуществляется с применением щековых, реже конусных, дробилок, третья - на валковых дробилках. Из плотных коренных базальтов, мраморов, гнейсов добыча самоцветов производится с применением буровзрывных работ, что отражается на стоимости добычи, которая становится нерентабельной, а добытое сырье приобретает дефекты из-за образования в кристаллах мелких техногенных трещин. [Барнов, Мельников, 2015]. Важной проблемой при разработке коренных месторождений, во избежание повреждения крупных кристаллов корунда, является выбор 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. На первых стадиях обогащения применяют классификацию с последующим использованием гравитационных методов (винтовые сепараторы, отсадочные машины или концентрационные столы), используя разницу в плотностях, размерах и форме частиц. Гравитационные методы при обогащении корундов используются как самостоятельный процесс, так и в комбинации с другими методами. При отработке россыпей гравитационные методы (дражный, гидравлический)

являются основными [ Бочаров, Игнаткина, 2007]. При обогащении бедных по содержанию корунда руд, для уменьшения затрат на дробление, на стадии предконцентрации на месторождениях Индии применяют радиометрическую сепарацию с последующим дроблением, гравитационным обогащением (отсадка, концентрация с использованием гравитационного сепаратора Floatex для сепарации частиц средней плотности, концентрация на столах), магнитную сепарацию для удаления сростков со слабомагнитными минералами ( плагиоклаз и др.) электрическую и жировую сепарации. [ Raghv et al, 2011]. Мировой опыт, практика отечественных предприятий и многочисленные научно-исследовательские разработки, доказывают эффективность магнитной сепарации при обогащении самоцветов. Электрические методы обогащения, 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 обогащения является оптическая сепарация [ Forsthoff, 2000; Knapp et al, 2014; Pieper et al, 2018)].

До недавнего времени фабрик по обогащению корундовых руд не существовало. Общепринятыми методами обогащения руд, содержащих драгоценные или поделочные камни являются ручная рудоразборка.

Методы добычи драгоценных камней, за исключением алмазов, в большинстве стран ( африканских и азиатских) весьма примитивны; в некоторых районах они, по существу, те же, что и на заре нашей эры. Самый простой способ - это сбор драгоценных камней, находящихся непосредственно на поверхности. В некоторых странах практикуются гидравлические способы разработки россыпей, когда рыхлый обломочный материал смывается со склонов сильными водяными струями.

Винтовые сепараторы эффективны для выделения мелкоразмерного рубина. Преимуществами винтовых сепараторов являются: отсутствие

движущихся деталей, простота конструкции, незначительная занимаемая площадь, наглядность процесса, простота обслуживания, низкие эксплуатационные расходы.

Концентрационные столы обладают высокой степенью концентрации ценных минералов, но имеют сравнительно низкую производительность, вследствие чего не могут применяться для основной концентрации бедных пород.

В табл. 8.1 приводятся примеры типов и способов обогащения корундовых руд.

Таблица 8.1 – Типы и способы обогащения месторождений коренных корундовых руд

| Тип      | Порода  | Состав                   | Пример месторождений  | Схема обогащения   |
|----------|---|--------------------------|---|--|
| Коренной | Нефелин- сиенитовая магма, обедненная кремнеземом |                          | Фабрика Астингс, штат Онтарио, Канада   | Эффективная магнитная сепарация. Корундовый концентрат содержит 95-96,5 % $Al_2O_3$    |
|          | Дисилифицированные пегматиты и плагиоклазиты      | Содержат до 70 % корунда | Урал, Березовское месторождение, Канада штат Онтарио, Италия Пьемонт, ЮАР северный Трансвааль | Разрабатываемое месторождение морундит-пегматита с корундом в ЮАР, северный Трансвааль |
|          | Вторичные кварциты гидротермального происхождения |                          | Семиз- Бугу, Казахстан  |  |
|          | Слюдистые сланцы                                  | Низкие                   |   |  |

|  |  |                      |   |   |
|--|--|----------------------|---|---|
|  | метаморфогенного генезиса                        | концентрации корунда |   |   |
|  | Перекристаллизация бокситов                      |                      | Синангой, Хакасия   |   |
|  | Региональный метаморфизм протерозойских бокситов |                      | Кызылтащ, близ озера Иртящ, Урал, Теченское<br><br>Семиз- Бугу, Казахстан; ЮАР; Мадагаскар; Индия; Могок север Мьянма | Можно сравнительно легко добывать промывкой<br><br>Нигде рубин и сапфир не извлекаются отдельно |

## 8.2 Технологии вскрытия корундсодержащих пород

В настоящее время месторождение Снежное отрабатывается полукустарными методами, при которых большое количество самоцвета разрушается при добыче.

Здесь приводятся результаты по технологиям вскрытия корундсодержащих пород на примере месторождений метаморфогенного типа (месторождение Хитостров и месторождение Снежное).

По вещественному составу корундоносные породы месторождения Хитостров существенно отличаются соотношением основных породообразующих минералов, слагая изолированные блоки (рис. 8.1).



Рисунок 8.1 Текстурно- структурные особенности породы и кристаллов корунда

Основные породообразующие минералы в руде на месторождении Хитостров отличаются по форме, плотности, твердости и магнитным свойствам. Наиболее четко проявляются различия по блеску, цвету и прозрачности.

На предварительной стадии обработки минерального сырья ( процессы дробления, измельчения) первостепенную роль играют механические свойства минералов – твердость, предел упругости, пластичность и др. Одной из величин, характеризующих количественную оценку твердости минерала, является микротвердость. Определение микротвердости корунда месторождения Хитостров производилось по стандартной методике на приборе ПМТ-3 путем вдавливания правильной четырехгранной алмазной пирамиды с углом при вершине  $136^\circ\text{C}$  под нагрузкой от 5 до 200 гс в плоскую поверхность полированных образцов.

Одной из величин, характеризующих количественную оценку твердости минерала, является микротвердость. Средняя микротвердость кристаллов корунда по литературным данным составляет  $1955\text{--}2200$  кгс/ $\text{мм}^2$  [ Лебедева, 1977]. Для корунда месторождения Хитостров характерна анизотропия значений микротвердости, это отражается в разбросе численных значений – от 1775 до 2597 кгс/ $\text{мм}^2$ . Наблюдается значительный разброс значений микротвердости и для роговой обманки, что также связано с анизотропией физических свойств этого минерала ( рис. 8.2 и 8.3). Микротвердость наиболее низка в кристаллах корунда, находящихся в ассоциации с диаспором, плагиоклазом. Ее значения снижаются до  $1463\text{--}1661$  кгс/ $\text{мм}^2$ , при среднем  $1553$  кгс/ $\text{мм}^2$ . В образцах, где корунд находится в ассоциации с амфиболом, микротвердость близка к литературным данным.

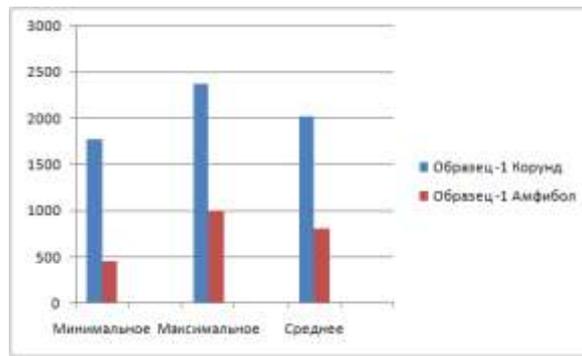


Рисунок 8.2 – Значения микротвердости породообразующих минералов корундовых гнейсов месторождения Хитостров, Н, кгс/мм<sup>2</sup> (образец 1)

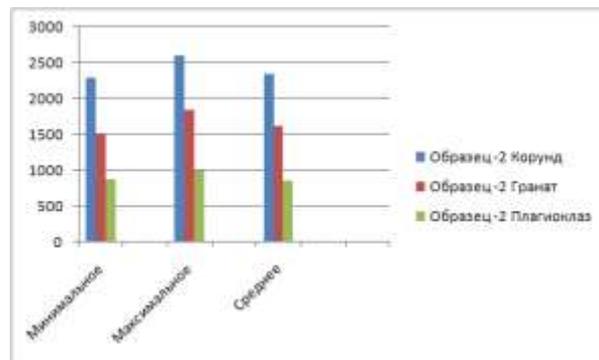


Рисунок 8.3 – Значения микротвердости породообразующих минералов корундовых гнейсов месторождения Хитостров Н, кгс/мм<sup>2</sup> (образец 2)

На образцах корундовой руды месторождения Хитостров установлено, что биотит в породе Хитострова после обжига при температуре 550-600 °С расщепляется и порода рассыпается на составляющие минералы без дробления и измельчения.

Положительные результаты достигнуты в анализе спектров отражения и изображений образцов корундов, обработка изображений осуществлялась в трех системах представления цвета: RGB, Yuv и HLS. Пороги в системах Yuv и HLS назначались линейными, что в случае системы Yuv обозначает параллелепипед с заданными границами, а в случае HLS – сектор шара. Пороги для системы RGB задавались нелинейно при помощи эллипсоида, описанного вокруг заданной нулевой точки с координатами (R0, G0, B0) и заданными радиусами для R, G и B. Методом оптической сепарации получены селективные концентраты и

установлена эффективность при определении контрастности цветовых характеристик минералов в цветовом пространстве. В данном случае использовано пространство HLS, которое кодирует цвет при помощи таких составляющих, как цветовой тон, светлота и насыщенность. В ходе экспериментальных исследований над образцами 16–435 и 16–146 удалось установить, что пик на 693 нм связан с люминесценцией корунда, вызванной излучением на длине волны в 405 нм (глубокий синий цвет).

Для обогащения рекомендована передвижная установка, состоящая из отдельных модулей: а – предварительная термообработка руды крупностью кусков 100 мм; б – классификация; в – модуль магнитной сепарации; г – оптическая сепарация немагнитных фракций классифицированного материала

В результате обогащения выделены три продукта: 1 немагнитная фракция, представленная плагиоклазом и его сростками; 2 корунд и 3 коллективный концентрат, представленный гранатом, ставролитом и амфиболом.

В связи с возобновлением добычи на месторождении Снежное в Таджикистане изучена обогатимость пород, содержащих темно-красный рубин в парагенезисе с основным плагиоклазом, аналогичным плагиоклазитам Хитострова.

На месторождении выделяются три рубинсодержащие минеральные ассоциации:

*Первая* составляет темно-красный рубин в парагенезисе с основным плагиоклазом, титанитом и пиритом. Его вмещают обохренные мелко-среднезернистые кальцитовые мрамора.

*Вторая* ассоциация составляет розово-светло-красный рубин с коричневым или изумрудно-зеленым амфиболом, флогопитом и графитом в белых крупнозернистых кальцитовых мраморах.

*Третья ассоциация* составляет ярко-красный рубин цвета голубиной крови. Он находится совместно с фукситом, основным

плагиоклазом (№ 80–90), титанитом, рутилом и графитом в крупнозернистых белых мраморах. Отдельные кристаллы рубина третьей ассоциации обрамляются фукситовой каймой и погружены в белую каолиноподобную массу.

Рубин не образует крупных скоплений и распространен крайне неравномерно вдоль поверхностей напластования мраморов. Размеры его индивидов колеблются от 0.1 до 5 см, в среднем составляя 0.2–0.5 см. Встречаются и более крупные кристаллы. Мелкие кристаллы размером до 0.7 см иногда обладают прозрачностью.

Минерализованные зоны сложены мелкочешуйчатым желто-коричневым флогопитом, фукситом, хромфлогопитом, клиногумитом, шпинелью, хромдиопсидом, хлоритоидом, паргаситом, белой глиной. В подчиненных количествах присутствуют рубин, ильменит, рутил, пирит, пирротин, графит, турмалин, берилл (единичные находки).

Методом РФА в образце породы месторождения Снежное установлено присутствие в составе глинистых минералов – форстерита, феррохлора, флогопита, антигорита, что согласуется с данными других исследователей. Присутствие глинистых минералов способствует спеканию слюд и упрочнению породы. В изученных образцах кальцитового мрамора и слюдита месторождения Снежное определены морфология и состав включений.

На рис. 8.4 показаны рамановские спектры минералов месторождения Снежное.

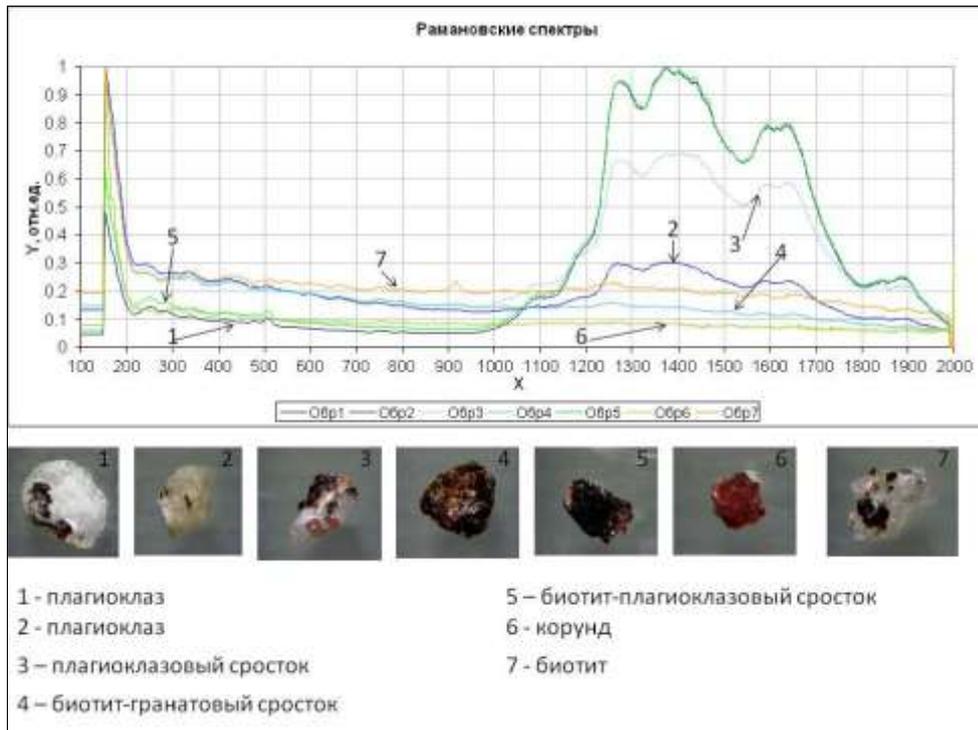


Рисунок 8.4 Рамановские спектры минералов (месторождения Снежное)

Исходя из характеристик минералов критериями эффективного разделения корунда и минералов вмещающей породы могут быть только плотность и цвет, что предопределяет использование гравитационных методов обогащения и оптической сепарации.

Для уменьшения потерь корунда при добыче была оценена возможность термодробления руды. Основанием послужило изучение минерального состава и его близость по количеству слюд к корундовым породам Хитострова.

Для обогащения руды 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.

Дробление руды на проектируемой установке производится в 2 стадии: 1) хвосты рудоразборки исходной руды крупностью 160 мм подаются в приемный бункер щековой дробилки на дробление 1-й стадии; 2) дробленый продукт (крупностью 80 мм) поступает на

рудоразборный конвейер для дальнейшей ручной рудоразборки (2-я стадия).

Черновые концентраты составляют не менее 85 % при среднем содержании в руде 9,73 %. Они должны поступать в отделение ручной рудоразборки.

### 8.3 Оптические технологии обогащения

В последние годы в горнодобывающей промышленности активно развиваются потенциально эффективные для обогащения минерального сырья оптические технологии (в России широко используется термин «фотометрические», в зарубежной – "color sorting" и "optical sorting") [Brandt & Haus, 2010; 2016; Barry et al, 2016]. Принцип работы оптических сепараторов основан на определении цветовых различий между минеральными компонентами с последующим выделением их из исходной руды посредством системы пневмоклапанов. В России серийно выпускается оптический сортировщик Smartsort Компании СиСорт ООО, Россия, г. Барнаул, предназначенный для сортировки широкого спектра сыпучих материалов не только по цвету, но и по форме и текстуре. В технологиях технического зрения используются различные специально разработанные оптико-электронные системы и алгоритмы анализа изображений, позволяющие разделять минералы даже со слабой цветовой контрастностью. Исследования, проводимые на стенде для цветового анализа статических объектов кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО (г. Санкт-Петербург), позволили установить объективные (измеряемые) отличия оптических характеристик образцов различных минералов. Анализ цветовых параметров, в том числе цветовые тона, светлота и насыщенность, осуществлялся в различных цветовых моделях – HLS, Yuv и HLS.

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. 8.5. 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. 8.5) 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 синих цветов, что и вызвало люминесценцию некоторых образцов. Для выявления люминесценции использовался фиолетовый лазерный диод с пиком излучения на 405 нм.

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

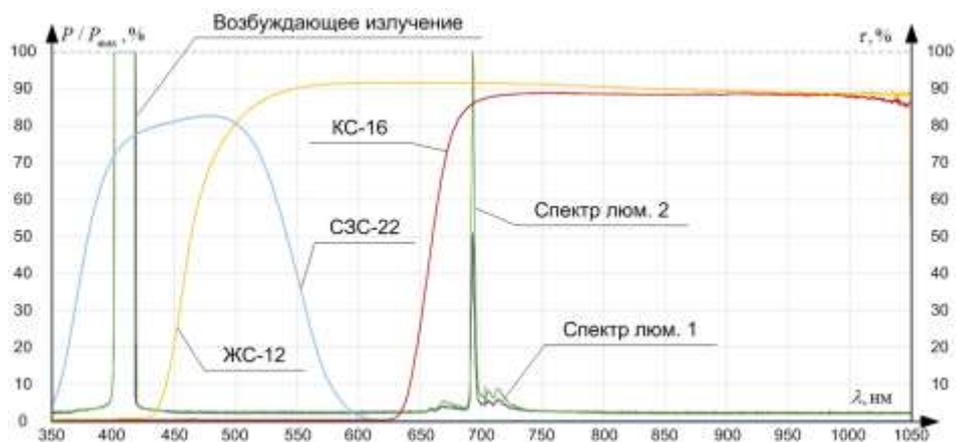


Рисунок 8.5 Спектры излучения люминесценции идеального корунда и спектры пропускания фильтров

В ходе исследований образцов корундсодержащих пород месторождений Хитостровское и Снежное были измерены спектры отражения отдельных областей (участков) поверхности. Спектры характеризуются спектральными зависимостями, идентичными спектру корунда, с ярко выраженными узкими пиками люминесценции на длине волны в 693 нм. Для отдельных образцов заметны вторичные пики люминесценции на 706 и 714 нм или более выраженные пики в синей области спектра от 420 до 520 нм (отсюда насыщенный синий цвет).

В качестве примера на рис. 8.6, 8.7 приведены результаты анализа спектров корунда в образцах месторождения Хитостров и месторождения Снежное.

Поверхность корунда (месторождение Хитостров) представлена на рис. 8.7, 8.8.

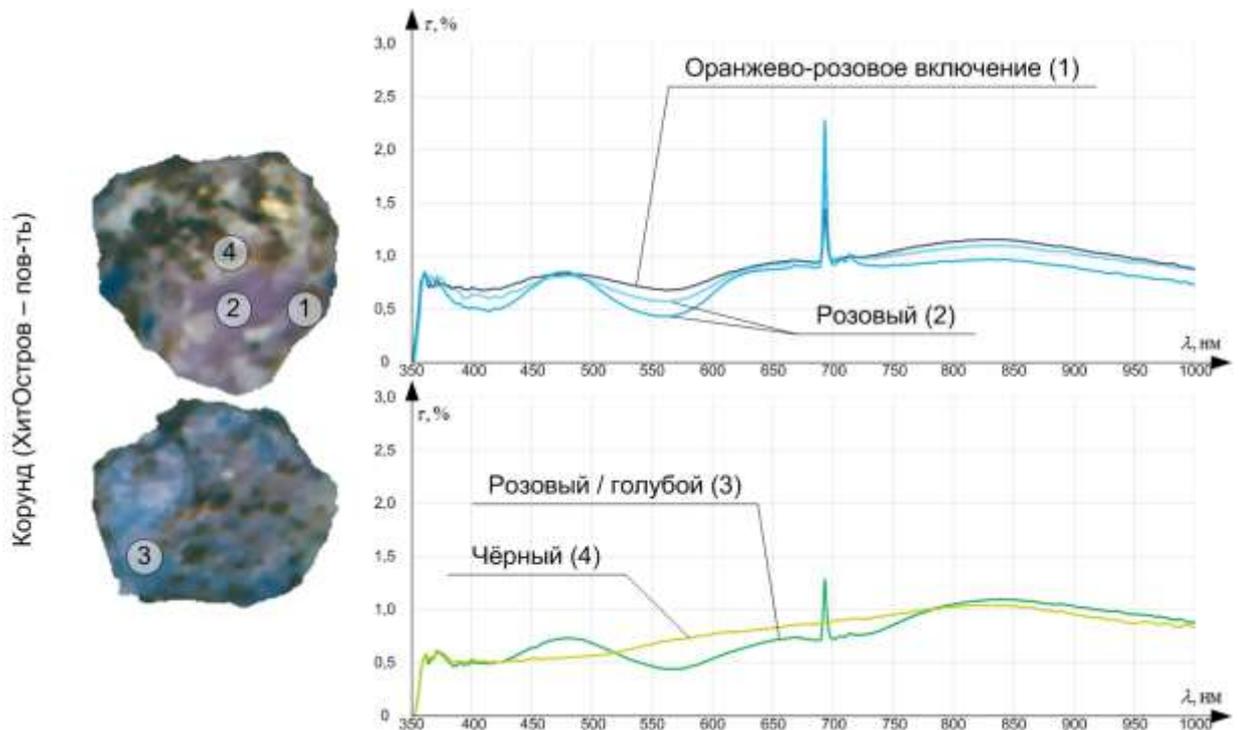


Рисунок 8.6 Спектры отражения областей первого образца группы Хитостров- поверхность

В ходе исследований были измерены спектры отражения различных областей двух образцов группы корундов Хитостров- поверхность.

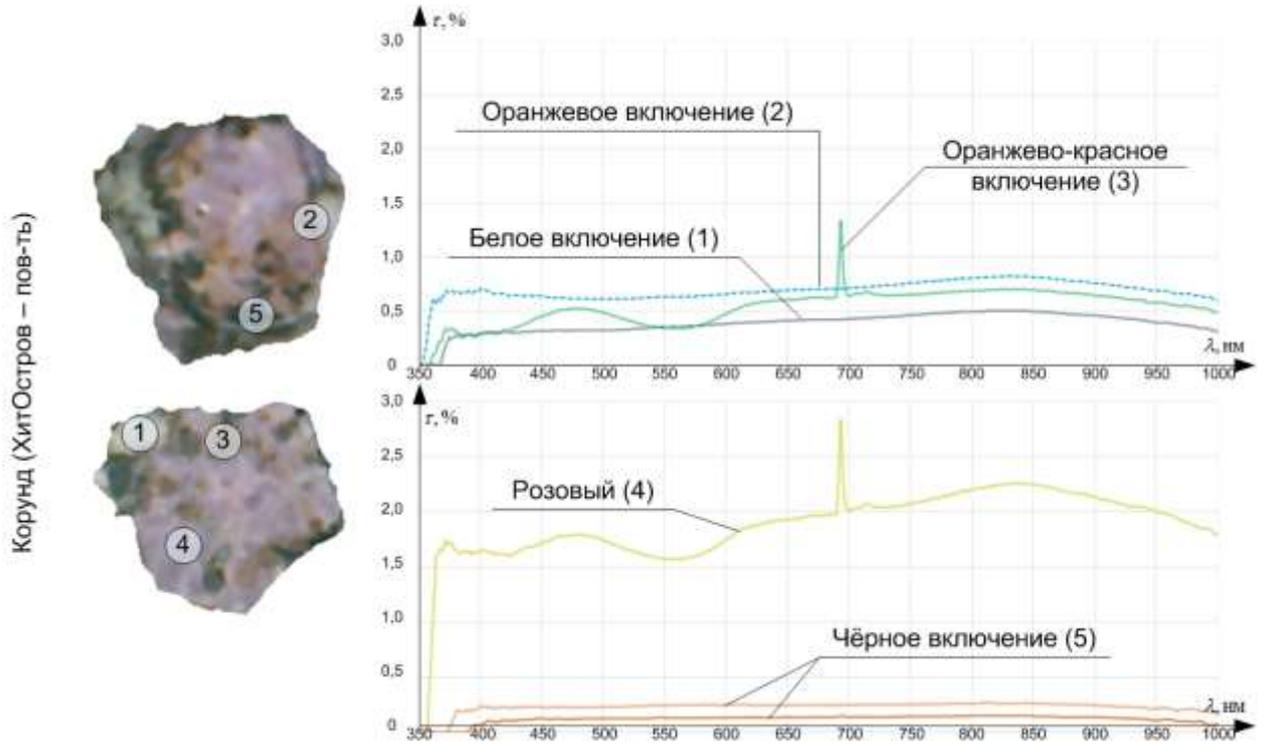


Рисунок 8.7 Спектры отражения областей второго образца группы Хитостров-поверхность

На спектрах присутствуют ярко выраженные узкие пики люминесценции на длине волны в 693 нм. Кроме того, на спектрах заметны вторичные пики люминесценции на 706 и 714 нм.

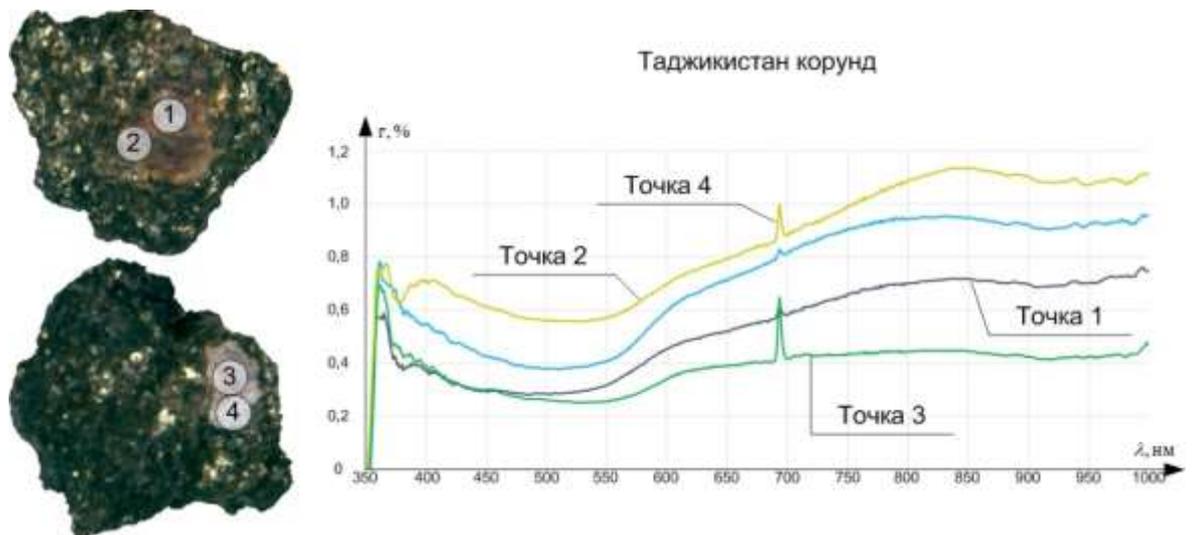


Рисунок 8.8 – Спектры отражения областей образцов месторождения Снежное

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 до 850 нм). Данные спектры имеют едва заметный пик люминесценции корунда на длине волны в 693 нм. 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 и 714 нм. Однако на указанных спектрах отсутствует выраженное увеличение отражения в области синих оттенков спектра (от 450 до 500 нм), характеризующее слабонасыщенные розовато-лиловые оттенки (рис. 8.8).

Зоны корунда на изображениях (рис. 8.9) достаточно эффективно выделяются в наиболее распространенных для использования цветовых пространствах (RGB, Yuv и HLS). В силу того что оптические характеристики корундов в образцах разные, то пороги для выделения на соответствующих изображениях областей, им принадлежащих, подбирались для каждого образца отдельно. На обработанных изображениях указаны соответствующие значения площадей зон относительно площади изображения всего объекта в %. Светло-серые оттенки характеризуют области корунда, а темно-серые – области вмещающей породы. При этом анализ, проведенный для трех различных цветовых моделей, показал: для модели RGB зоны цветности, характеризующие корунд, занимают 44,68 % от изображения образца, для модели Yuv – 40,85 %, для модели HLS – 51,47 % (рис. 8.9)

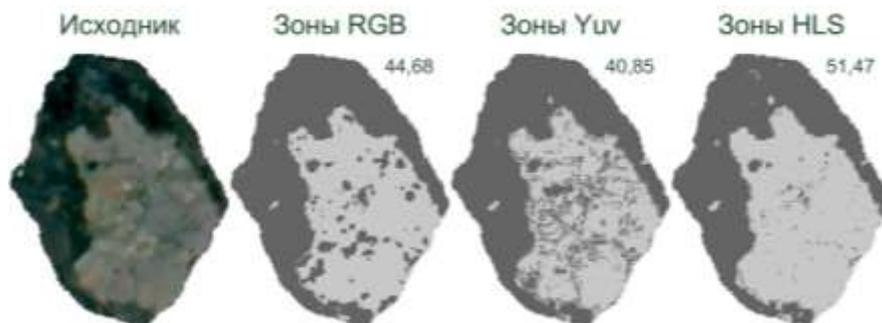


Рисунок 8.9 – Результаты обработки изображений корундовых образцов месторождения Снежное

Значения порогов выделения областей, принадлежащих корунду в цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS различны, но более стабильны и предсказуемы в системе HLS (табл. 8.2). Этот факт объясняется принципами воспроизведения цвета в каждой из указанных цветовых пространств (необходимый диапазон выделяемых цветовых оттенков в пространстве RGB задается при помощи эллипсоида вращения, заданного центральной точкой с координатами R0, G0 и B0, а также радиусами по осям R, G и B; для пространств Yuv и HLS удобно использовать линейные пороги для выделения диапазонов цветовых оттенков).

Таблица 8.2 – Значения порогов выделения областей, принадлежащих корунду в цветовых пространствах RGB, Yuv и HLS

| Объект    | Группа образцов            | Цветовое обоснования пространство RGB |               |             |               |              |                |
|-----------|----------------------------|---------------------------------------|---------------|-------------|---------------|--------------|----------------|
|           |                            | жел<br>ваков R0                       | раз<br>виты   | п<br>ородам | по<br>яса     | г<br>еологич | эл<br>ювиальны |
| Хитостров | 1                          | 124                                   | 40            | 1           | 20            | 1            | 40             |
|           |                            | 90                                    | 40            | 8           | 20            | 1            | 40             |
|           |                            | 85                                    | 40            | 6           | 20            | 9            | 40             |
|           | 2                          | 40                                    | 101           | 2           | 13            | 4            |                |
|           |                            | 40                                    | 85            | 2           | 10            | 4            |                |
|           |                            | 40                                    | 61            | 2           | 90            | 4            |                |
|           | 3                          | 25                                    | 20            | 3           | 15            | 5            | 20             |
|           | 4                          | 60                                    | 20            | 6           | 20            | 7            | 20             |
|           | 5                          | 40                                    | 20            | 3           | 5             | 4            | 20             |
|           |                            | 15                                    | 10            | 2           | 5             | 2            | 10             |
| Снежное   | Корунд                     | 45                                    | 30            | 5           | 30            | 4            | 30             |
|           | Мелкий кристалл<br>корунда | 100                                   | 40            | 7           | 30            | 1            | 40             |
|           | 1                          | 80                                    | 20            | 6           | 20            | 2            | 20             |
|           |                            | 70                                    | 20            | 3           | 20            | 1            | 20             |
|           | 2                          | 110                                   | 30            | 9           | 30            | 1            | 30             |
|           |                            | 70                                    | 30            | 7           | 30            | 7            | 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                  | [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 |              |            |
|           |                         | Н                         | 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 corundum         | [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)   |

Сложность оценки эффективности выделения областей корунда на изображениях для полиминеральных образцов связана с тем, что многокомпонентный цвет вмещающей породы перекликается с выделяемыми оттенками корунда. Возможно, увеличение количества выделяемых цветовых зон приведёт к более удачным результатам.

Потенциально, разделение возможно с использованием любой из моделей, однако их реальную эффективность и возможные преимущества друг перед другом необходимо исследовать экспериментально для каждого конкретного месторождения.

#### Выводы по главе 8

*Важной проблемой в настоящее время становится разработка рациональных, экологических технологий обогащения с использованием методов оптической сортировки. Приведены принципы работы оптических сепараторов. При проведении исследований по обогащению корундсержащих 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 использования при их обогащении оптической сортировки.*

## ГЛАВА 9. Области применения корундов

Высокая твердость корунда определяет его практическое значение: порошок корунда применяется для шлифовки драгоценных камней, металлов, оптических стекол. Из цементированных молотых корундовых пород изготавливают круги шлифовальных станков. Кроме того, в наклеенном на бумагу или полотно виде он дает наждачные шкурки. Рубины играют роль подшипников и опорных камней в часовых механизмах, обеспечивая высокую точность хода и продлевая их жизнь. В одном часовом механизме их может быть до 16 штук. Шестеренки часового механизма укрепляются на подшипниках, и если эти подшипники были бы сделаны из другого материала, менее прочного, чем рубин, то они бы очень быстро изнашивались, а механизм выходил бы из строя. В часовых механизмах нашел свое применение и сапфир. Их твердость не меньше рубинов, но сапфиры порой обладают идеальной прозрачностью и большой плотностью самого кристалла. Поэтому из сапфира изготавливается сверхпрочное стекло, которое принято называть сапфировым стеклом. Если им покрыть циферблат часов, то на нем не появятся царапины. Также сапфировое стекло популярно в создании мобильных телефонов.

Рубины и сапфиры используются в оптических квантовых генераторах ( лазерах). Сапфир не реагирует с любыми кислотами и щелочами. Он противостоит высоким давлениям и температурам, жесткому радиоактивному излучению. Его можно сварить со стеклом и припаивать к металлу ( иллюминаторы, позволяющие следить за процессом, протекающим в приборах и аппаратах, где царят вакуум, высокие температуры и давления, батискаф и др.). Для этого используется прозрачный, бесцветный, искусственный сапфир. Сапфир в качестве датчика перепада давления находит применение для обнаружения аварийных участков магистральных газопроводов. Всего

миллиметровый слой теплоизолятора с использованием корунда заменяет пятисантиметровый слой обычной минеральной ваты.

Engineered Cementitious Composite ( ECC) является уникальным типом цементного композита, армированного волокнами с высокими эксплуатационными характеристиками. Корунд, твердый и прочный материал, вводится в смесь ECC, чтобы улучшить сопротивление скольжению. ECC с корундом соответствует самым высоким требованиям для новых дорог. После 100 000 циклов нагрузки при моделировании движения сопротивление скольжению, подвергнутого воздействию ECC с корундом, остается очень высоким [ NguyenDinh et al, 2018]. Результаты экстраполяции показали, что ECC с корундом может выполнять требования сопротивления скольжению до конца срока службы покрытия без какого-либо дополнительного вмешательства.

#### Выводы по главе 9

*Расширяются области применения технического корунда. При комплексной геотехнологической оценке корунд доступен для освоения при благоприятных технологических, экономических и экологических факторах для получения корундов различного назначения.*

## Заключение

Диссертационная работа по специальности « Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения - 1.6.10.» затрагивает широкий круг вопросов, включенных в паспорт специальности и посвященных изучению геологии коренных благородных корундов, генетическим типам, условиям формирования корундовых месторождений, геологическому обеспечению эксплуатационных работ в условиях горнодобывающих предприятий по аналогии с благородными металлами.

Корунд представляет собой единственную природную модификацию с так называемым корундовым мотивом упаковки атомов Al и O. Его кристаллы обладают целым рядом особенностей твердости, окраски и оттенков.

Изучение образцов и проб благородных корундов различных генетических типов, собранных автором или полученных в дар из месторождений и проявлений Памира, Афганистана, Мьянмы, Шри Ланка, Индии, России и других стран, проводилось с использованием современных методов в нескольких аналитических центрах научно-исследовательских институтов ( прецизионное изучение микроэлементного состава на квадрупольном масс- спектрометре X- SERIES 2 Terhmo, электронно- микроскопические исследования кристаллов корунда на растровом сканирующем электронном микроскопе фирмы Carl Zeiss EVO- LS-10, оснащенный энергодисперсионной приставкой Oxford MAX 50. изучение ИК- спектров образцов на ИК- Фурье спектрометре Nicolet 380 с использованием микроскопа Centaurus компании THERMO Scientific, химический состав минералов на электронно- зондовом микроанализаторе JXA-8100 фирмы JEOL, микроскопическое изучение флюидных включений ( ФВ) производилось с использованием оптического микроскопа Olimpus BX-51, методы натуральных измерений с помощью

тензометрических датчиков, акустический и др. на основе компьютерного моделирования и др.).

Разработана типизированная генетическая классификация месторождений и проявлений благородного корунда. В ней отражаются магматический, пегматитовый, скарновый постмагматический гидротермальный, метаморфогенный и метасоматический, вторичные экзогенные коры выветривания и россыпи генетических типов. Обоснована определенная роль магматизма, метаморфизма и метасоматизма при формировании генотипов коренных благородных корундов в зависимости от условий рудообразования.

Сравнительный анализ Международной генетической классификацией (Giuliani et al, 2020) и разработанной автором классификации месторождений благородных корундов мира дает основание показать фактические преимущества последней по полноте материалов. В российской литературе, помимо авторских материалов (Барнов и др., 2015; Барнов и др., 2016), в целом генетическая классификация корундов мира отсутствует.

Важным условием корундообразования является, во-первых, протокристаллизация из расплавов в глубинных магматических очагах при условии последующего быстрого застывания основной массы расплава. В этом отношении большую роль играют ультраосновные породы, представленные формацией ультраосновных-щелочных пород и карбонатитов и связанных с ними пневматолито-гидротермальных образований. Наиболее характерным признаком магматического происхождения корундов является оплавленность их кристаллов. Значение имеют ювелирные рубин и сапфир месторождений Могок (Мьянма) и Чантхабур (Таиланд), образованные в зонах скарнированных доломитовых мраморов и кальцифирах. Во-вторых, образование корунда обусловлено прогрессивным метаморфизмом высокоглиноземистых осадочных пород. Особенно перспективными в этом отношении

представляются кристаллические щиты докембрийских платформ (Карело-Кольский регион), а также древние метаморфические толщи и офиолитовые пояса складчатых областей (Алтай, Саяны, Казахстан, Урал, Дальний Восток).

Обобщенные материалы по месторождениям и крупным проявлениям благородных корундов зарубежья и России определены на принципах металлогенических понятий и терминов российской школы (Российский металлогенический словарь, 2003). Выделены основные глобальные структурные блоки: 15 провинций (Индокитайская, Южно-Азиатская, Карело-Кольская), поясов (Восточно-Австралийский, Дальневосточный, Восточно-Китайский, Уральский, Восточно-Африканский, Восточно-Бразильский, Юго-Западный Гренландский) и районов распространения благородных корундов (Нигерийский, Колумбийский, Восточно-Американский, Западно-Американский, Канадский).

До настоящего времени приоритет остается за месторождениями остаточных древних кор химического выветривания рубино- или сапфиросных горных пород и за известными промышленными месторождениями рубина и сапфира аллювиальных и делювиально-аллювиальных россыпей. Вместе с тем становятся перспективными и актуальными многоплановые исследования коренных источников благородного рубина, что подчеркивается в данной работе.

Приводимая аналитическая схема размещения основных месторождений и крупных проявлений благородных корундов зарубежья и России позволяет охарактеризовать районы отработанных, ныне действующих и перспективных на ближайшее время месторождений

Разными методами датирования (в основном U- Pb методом) определены четыре основных периода образования корунда во всем мире от архея до кайнозоя (Polat et al., 2010; Giuliani et al, 2014; Garnier et al, 2006; Litvinenko et al, 2020; Sutherland, Khin et al, 2019; и др.). На

примерах ряда геологических объектов различного генезиса показана четкая детерминированность химизма, физических свойств и парагенетических минеральных ассоциаций благородных корундов, присущая месторождениям зарубежья и России. Установлены пороги цветовых пространств RGB, Yuv и HLS для областей корундосодержащих руд месторождений Хитостров (Карелия, Россия) и Снежное (Таджикистан).

В России пока известно немного проявлений минералов корундовой группы таких, как рубин и сапфир. Значительно истощены некогда известные копи самоцветов Урала и Забайкалья. Между тем многообразие геологического строения огромной территории России - надежная предпосылка наличия месторождений различных генетических типов корундов. Особенно перспективными в этом отношении представляется Фенноскандинавский щит (российская часть), а также древние метаморфические толщи и офиолитовые пояса складчатых областей (Алтай, Саяны, Урал, Дальний Восток). При благоприятных технологических, экономических и экологических факторах коренной благородный корунд доступен для получения продукции различного назначения.

В результате экспериментальных работ, выполненных в производственных условиях, получены данные по закономерностям 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.

Экспериментально изучены отходы производства и рекомендован к использованию активный заполнитель-песок, значительно сокращающий расход вяжущих материалов.

Результаты производственных испытаний по транспортировке твердеющей смеси с помощью сжатого воздуха положены в основу

метода 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.

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

Для эффективной разработки корундосодержащих наклонно падающие рудных тел малой мощности, залегающих в устойчивых вмещающих породах, рекомендована камерно-столбовая система подземной разработки. 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.

Для сохранения благородных корундов при освоении коренных месторождений рекомендуется применение технологии гидроразрыва. Гидроразрыв позволяет разделить геоматериал внутри массива горных пород на блоки и снять напряжения.

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

Анализ литературных и экспериментальных данных по типам и способам обогащения месторождений корундовых руд (коренные и россыпные) и фактическим результатам научных исследований позволил сконцентрировать усилия на поиске новых подходов к проблеме

извлечения благородных корундов ( термодробление, оптическая сепарация и др.), что апробировано в лабораторных условиях.

Не подлежит сомнению, что расширение поисковых работ приведет к новым открытиям и возрождению мировой славы русского благородного корунда.

## Список использованной литературы

- Агеева, Л. И.* Rb- Sr и K- Ar датированию довендских метаморфических образований Памира / Л. И. Агеева, Г. В. Клименко, М. Д. Щеблыкина // Докембрий в фанерозойских складчатых областях. Фрунзе: Илим, 1989. С. 65-66.
- Ананьева А.С., Ананьева Т.А., Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П.* Благородные корунды и цирконы из россыпей Приморья // Записки ВМО. 1998. № 4. С. 42–44.
- Ариоглу Э., Лю Кечьжень, Сунь Кайнянь и др.* Разработка месторождений с закладкой: Пер. с англ./ Под ред. С. Гранхольма. М.: Мир, 1987. 519 с.
- Банк Г.* В мире самоцветов / Г. Банк. М.: Мир, 1979. 158 с.
- Баратов Р. Б., Россовский Л.Н.* Новые данные о перспективах Гималаев на редкие металлы и драгоценные камни // ДАН СССР. 1986. Т. 287, № 5. С. 1183-1187.
- Барнов Н.Г.* Влияние метода дробления на селективность обогащения полиметаллической руды / Н.Г. Барнов, М.М. Раджабов, В.В. Чихладзе // Горный журнал. 2015. №12. С. 47-50.
- Барнов Н.Г.* Обоснование механизма селективной дезинтеграции горных пород с целью извлечения цельного камнесамоцветного сырья / Н.Г. Барнов, Г.Г. Каркашадзе // Горный журнал. 2017. №1. С. 47-49.
- Барнов Н.Г.* Типоморфизм рубинов и сапфиров / Н.Г. Барнов, Е.П. Мельников, М.А. Викторов // Отечественная геология. 2015. №4. С. 42-49.
- Барнов Н.Г., Еременко В.А.* Обоснование параметров геотехнологии освоения коренных месторождений корунда в сложных условиях высокогорья / Н.Г. Барнов, В.А. Еременко, А.С. Кондратенко, В.В. Тимонин // Горный журнал. 2015. № 11. С. 41–46.

*Барнов Н.Г., Мельников Е.П.* Генетические типы благородных корундов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 6. С. 79–85.

*Барнов Н.Г., Мельников Е.П., Викторов М.А.* Минералогия месторождения благородных корундов мира // Отечественная геология. 2016. №1. С. 39-45.

*Барнов, Н. Г.* Геологические условия локализации и предпосылки промышленной минерализации рубина в мраморах на примере месторождения Снежное (Центральный Памир): автореф. дис. ... канд. г.-м. наук: 25.00.11 / Барнов Николай Георгиевич; РГГРУ. М., 2010. 26 с.

*Барнов, Н. Г., Еременко В.А.* Отбойка сформированных гидровзрывом блоков при ведении очистных работ зарядами ВВ с эффектом декаплинга / Н. Г. Барнов, В. А. Еременко, А. С. Кондратенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. №3. С. 200-209.

*Бархатов, Б.П.* Тектоника Памира / Б. П. Бархатов. Л.: ЛГУ, 1963. 241 с.

*Бочаров В.А.* Технология обогащения полезных ископаемых / В.А. Бочаров, В.А. Игнаткина. Т.2. Обогащение золотосодержащих руд и россыпей, обогащение руд черных металлов, обогащение горно-химического и неметаллического сырья. М.: Руда и металлы, 2007. 405 с.

*Браун Г.* Драгоценные камни и геммология в Австралии // Вестник геммологии. 2002. № 2. С. 42–46.

*Броуд, Г.Л.* Еще о ядерных взрывах в подземных полостях / Г. Л. Броуд // Расчеты взрывов на ЭВМ. Подземные взрывы: Сб. статей / Под ред. Г. Броуда. М.: Мир, 1975. С. 68-103.

*Буканов, В.В.* Цветные камни и коллекционные минералы. Энциклопедия / В. В. Буканов. СПб: Ottava Book Printing, 2014. 464 с.

*Высоцкий С.В.* Сапфиры Приморья. / С.В. Высоцкий, А.В. Баркар. Владивосток: Дальнаука, 2006. 112 с.

*Высоцкий С.В.; Щека, С.А.; Баркар, А.В.; Нечаев, В.П.* Приморье фрагмент Восточно-Азиатского сапфирного пояса? // Вестник ДВО РАН. 2003. №6. С. 57-66.

*Газалеева Г. И.* Рудоподготовка дробление, грохочение, обогащение / Г. И. Газалеева, Е. Ф. Цыпин, С. А. Червяков. Екатеринбург: ООО «УЦАО», 2014. 914 с.

*Галченко Ю. П.* Оценка сложности формы рудных тел при разработке жильных месторождений // Совершенствование методов управления извлечения запасов из недр при разработке рудных месторождений. М.: ИПКОН АН СССР, 1981. С. 69–77.

*Галченко Ю. П., Сабянин Г.В.* Проблемы геотехнологии жильных месторождений. – М.: Издательство «Научтехлитиздат», 2011. 367 с.

*Гансер А.* Геология Гималаев. М.: Мир, 1967. 348 с.

*Геология и полезные ископаемые Афганистана.* Т. 1. М.: Недра, 1980. 535 с.

*Геология и полезные ископаемые Афганистана.* Т. 2. М.: Недра, 1980. 335 с.

*Годовиков А.А.* Минералогия. М.: Недра, 1983. 328 с.

*Громов А. В.* Розовый корунд из Хитостровского проявления в Северной Карелии // Мир камня. 1993. №2. С. 1-3.

*Дергунов А.Б., Казак А.П., Молдаванцев Ю.Е.* Серпентинитовый меланж и структурное положение гипербазитового массива Рай-Из (Полярный Урал) // Геотектоника. 1975. № 1. С. 28–34.

*Дир У. А.* Породообразующие минералы / У. А. Дир, Р. А. Хауи, Дж. Зусман. М.: Изд. «МИР», 1966. Т.5. 408 с.

*Дмитриев Э. А.* Типы корундовой минерализации в докембрийских мраморах Музкол-Рангкульского антиклинория // Геология, поиски и разведка месторождений цветных камней Таджикистана. Душанбе: Дониш, 1987. С. 34-38.

*Добрецов Н.А.* Фации метаморфизма / Н.А. Добрецов, В.В.

Ревердатто, В.С. Соболев, Н.В. Соболев, В.Е. Хлестов. М.: Недра, 1970, 432 с.

*Добыча драгоценных металлов // Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. М.: Бюро НТД. 2017. 143 с.*

*Еременко В. А. Технология оперативного мониторинга напряженно-деформированного состояния разрабатываемого массива горных пород / В. А. Еременко, Е. Н. Есина, Е. Н. Семенякин // Горный журнал. 2015. № 8. С. 42,47.*

*Заварицкий А.Н. Перидотитовый массив Рай-Из на Полярном Урале / А.Н. Заварицкий. М.; Л.: Госнаучтехиздат, 1932. 221 с.*

*Ишлинский А.Ю. Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев. М.: Физматлит, 2001. 45 с.*

*Калюжний В. А. Флюїдні включення і середовище кристалізації кварцу (“мармароського діаманту”) з району Воловець-Нижні Ворота (Закарпаття) / В. А. Калюжний, С. Б. Ломов. – Мінерал. зб. Львів. ун-ту. 1991. № 45, вип. 2. С. 76-81.*

*Кашинцев Г. Л. Петрогенезис ультраосновного массива Рай-Из на Полярном Урале: автореф. дис. ... канд. г.-м. наук / Кашинцев Георгий Леонидович. – М., 1972.*

*Кашинцев А.А. Корунд. История исследования и освоения месторождений корунда-наждака на Южном Урале. Озерск, Рудники Урала, 2006. 94 с.*

*Киевленко Е. Я. Геология месторождений драгоценных камней / Е. Я. Киевленко, Н. Н. Сенкевич, А. П. Гаврилов. М.: Недра, 1982. 43 с.*

*Киевленко Е. Я. Геология самоцветов / Е. Я. Киевленко. М., // Эконост 2001.*

*Киевленко Е. Я. Декоративные коллекционные минералы / Е. Я. Киевленко, В. И. Чупров, Е. Е. Драмшева. М.: Недра, 1987. 223 с.*

*Киевленко Е.Я.* Поиски и оценка месторождений драгоценных и поделочных камней. М.: Недра, 1980. 160 с.

*Кириченко Г.С.* Формирование закладочного массива при слоевой системе разработки с закладкой / Г.С. Кириченко, Л.В. Малетин Л.В., Е.Г. Гришин В.Е. Видергауз // В кн.: Теория и практика разработки рудных и нерудных месторождений. М.: ИПКОН АН СССР, 1986. С. 137-146.

*Кисин А.Ю.* Месторождения рубинов в мраморах ( на примере Урала) / А.Ю. Кисин. Свердловск, // УрО АН СССР, 1991. С. 30-32.

*Мельников Е.П., Васильев А.В., Викторов М.А.* Нетрадиционная генетическая типизация месторождений и свойства благородных корундов // Вестник геммологии. 2002. № 2. С. 7–18.

*Меньшиков Ю. П.* Корундовая минерализация в Хибинском щелочном массиве / Ю. П. Меньшиков // Доклады АН СССР. 1978. Т. 243, №5. С. 1247-1249.

*Мизес Р.* Теория пластичности / Р. Мизес. Сб. пер. М.:// Москва: Гос. изд- во иностр. лит. (« Печатный двор»), 1948. С. 57-69.

*Назарчик А. Ф.* Исследование неравномерности промышленного оруденения жильных месторождений и его влияние на эффективность разработки / А. Ф. Назарчик, А. М. Фрейдин, В. И. Емельянов. Магадан: Изд- во ВНИИ-1, 1976. 143 с.

*Назарчик А. Ф.* Разработка жильных месторождений / А.Ф. Назарчик, И.А. Олейников, Г.И. Богданов. М.: Недра, 1977. 240 с.

*Одариченко Э.Г.* Генезис корунда по термобарогеохимическим данным ( месторождение Незаметнинское, Приморский край) / Э.Г. Одариченко, Ф.Г. Рейф, Б.Л. Залищак, В.А. Пахомова // Вестник ДВО РАН. 2004. № 5.

*Одариченко Э.Г.* Физико- химические условия образования корундов Незаметнинского месторождения по термобарогеохимическим данным и проблема их генезиса // автореф. канд. дисс. Владивосток: 2004. 24 с.

*Озеров К. Н.* К генезису месторождения корунда и андалузита Семиз- Бугу ( Каз. ССР) и вмещающих его вторичных кварцитов // Проблемы советской геологии. 1933. 2, № 8.

*Пахомова В.А.* Типизация месторождений корунда Сихоэ- Алиня на основе данных термобарогеохимии и петрологии / В.А. Пахомова. Б.Л. Залищак, В.Б. Тишкина, Э.Г. Одариченко, М.А. Ушкова // Мат- лы XIII конференции по термобарогеохимии совместно с IV симпозиумом APIFIS. Владивосток, 2008. С. 120-123.

*Петров В.П.* Петрографические проблемы формирования месторождений драгоценных и поделочных камней / В.П. Петров. М.: Наука, 1980. С. 10–18.

*Плякин А.М., Михайленко Ю.В.* Основы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых. Оконтуривание рудных тел, метод. указания / А. М. Плякин, Ю. В. Михайленко. Ухта: УГТУ, 2012. 18 с.

*Проблемы разработки месторождений твердых, полезных ископаемых.* М.: ИПКОН АН СССР, 1978. Вып I. С. 215-245.

*Ревнивцев В. И.* Селективное разрушение минералов. / В. И. Ревнивцев, Г. В. Гапонов, Л. П. Загоратский. М.: Недра, 1988. 430 с.

*Российский металлогенический словарь.* СПб.: Изд- во ВСЕГЕИ, 2003. 320 с.

*Россовский Л.Н., Коноваленко С.И., Ананьев С.А.* Условия образования рубина в мраморах // Геология рудных месторождений. 1982, № 2. С. 57–66.

*Русаков М.П.* Материалы к описанию корундовых месторождений Ильменских гор // Материалы по общей и прикладной геологии. 1927. № 71. С. 72.

*Сорокина Е. С.* Некоторые особенности онтогении корунда и качество рубина месторождения Снежное, Таджикистан ( Восточный Памир) // Записки РМО. 2012. 141. В. 6. С. 100-108.

*Судовикова Е.Н.* Слюда из андалузито- корундовых пород месторождения Семиз-Бугу // ЗВМО. 1963. Ч. 92. Вып. 2. С. 239-242.

*Татаринов А.В., Беляевский В.И., Юргенсон Г.А. и др.* Корундовая минерализация Западного Прибайкалья // Прикладная минералогия Восточной Сибири. Иркутск: Изд-во ИГУ, 1992. С. 28-38.

*Теория крепости горных пород и научный метод профессора М. М. Протодьяконова: Учеб.-метод. пособие.* Составители В. В. Ржевский, Б. Н. Кутузов, В. К. Рубцов. М.: М-во высш. и сред. спец. образования СССР. Моск. горный ин-т., 1974. 39 с.

*Терехов Е.Н.* Геолого-структурные закономерности размещения корундовой минерализации в северно-западном Беломорье / Е.Н. Терехов, В.И. Левицкий // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1991. № 6. С. 3-13.

*Терехов Е. Н.* Тектоническое положение и генезис месторождений ювелирного корунда Высокой Азии / Е. Н. Терехов, А. П. Акимов // Литосфера. 2013. №5. С. 122-140.

*Федотов П. К.* Теория и практика дезинтеграции руды в слое частиц: дис. ... докт. техн. наук / П. К. Федотов; науч. рук. Б.А. Байбородин; ИГТУ – Иркутск, 2014. 311 с.

*Хайрутдинов М.М.* Выбор закладочного материала при условии снижения затрат и сохранения нормативных характеристик / М.М. Хайрутдинов, В.Н.Хайрутдинова, С.Ю. Соболев. М.: Горный информационно-аналитический бюллетень. 2001. № 8. С. 243-246.

*Ханчук А.И.* Генезис и геммология сапфиров месторождения Незаметное (Приморский край) / А.И. Ханчук, Б.Л. Залищак, В.А. Пахомова, Э.Г.Одариченко, В.И. Сапин // Тихоокеан. геология. 2002. № 1. С. 89-95.

*Хачатрян Г. К.* Методика анализа породообразующих и акцессорных минералов рудных месторождений с использованием ИК-Фурье микроскопа / Г. К. Хачатрян, Г.К Кряжев // Руда и металлы. 2010. № 5. С. 64-73.

*Хомяков В.И.* Зарубежный опыт закладки на рудниках / В.И.Хомяков. М.: Недра, 1984. 225 с.

*Хопунов Э. А.* Селективное разрушение минерального и техногенного сырья / Э.А. Хопунов. Екатеринбург: УИПЦ, 2013. 429 с.

*Щербакова С.В.* Геохимия и минералогия метасоматитов с рубином (массив Рай-Из, Полярный Урал) / С.В. Щербакова, А.Н. Сутурин // Геохимические поиски самоцветов. Новосибирск: Наука, 1990. С. 167-198.

*Щербакова С.В.* О двух типах рубиновой минерализации в ультраосновном массиве Рай-Из на Полярном Урале // Труды ВСЕГЕИ. 1976. Т. 210. С. 111-119.

*Altherr, R.* Corundum- and kyanite-bearing anatexites from the Precambrian of Tanzania / R. Altherr, M. Okrusch, H. Bank // Lithos. – 1982. – Vol. 15, № 3. – P. 191-197.

*Andersen, B. W.* The constancy of quartz and other minerals / B. W. Andersen, G. J. Payne // Gemmologist. - 1940. - № 9. - 93 p.

*Arem, J.E.* Color Encyclopedia of gemstones. – New York: Van Wastrand Reinhold Co, 1977. - 149 p.

*Balmer, W.A.; Hauzenberger, C.A.; Fritz, H.; Sutthirat, C.* Marble-hosted ruby deposits of the Morogoro region, Tanzania. J. Afr. Earth. Sci. 2017, 134, 626–643. [CrossRef]

*Barr, S. M.* Petrochemistry and origin of megacrysts in Upper Cenozoic basalts, Thailand / S. M. Barr, J. Dostal // J. Southeast Asian Earth Sci. - 1986. - 1(2). - P. 107-116.

*Barry, J.F.; Turner, M.J.; Schloss, J.M.; Glenn, D.R.; Song, Y.; Lukin, M.D.; Park, H.; Walsworth, R.L.* Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond // PNAS. 2016, 113(49)

*Bingen, B.; Jacobs, J.; Viola, G.; Henderson, I.H.C.; Sker, III.; Boyd, R.; Thomas, R.J.; Solli, A.; Key, R.M.; Daudi, E.X.F.* Geochronology of the Precambrian crust in the Mozambique belt in NE Mozambique, and implications for Gondwana assembly. Precambrian Res. 2009, 170, 231–255. [CrossRef]

*Bodnar, R. J.* Interpretation of Microthermometric Data for H<sub>2</sub>O-NaCl Fluid Inclusions. In: De Vivo, B. and Frezzotti, M.L., Eds., Fluid Inclusions in Minerals:

Methods and Application / R. J. Bodnar, M. O. Vityk. - Pontignsno-Siena. - 1994. - 117-130.

*Bowersox, G. W. Gemstones of Afghanistan / G. W. Bowersox, B. E. Chamberlin. – USA, Tucson: Geoscience Press, 1995. – 180 p.*

*Brandt, F. & Haus, R. New concepts for lithium minerals processing // Minerals Engineering. 2010, 23(8). 659-661*

*Brown, J. C. Sapphires of India and Kashmir / J. C. Brown // The Gemmologist. – 1956. – Vol. 25, № 229. – P. 97-100.*

*Brownlaw, A. H. Geology and origin of the Yogo sapphire deposit, Montana / A. H. Brownlaw, J-C. Komorowsky // Economic Geology. -1988 - 83(4). - P. 875-880.*

*Cairncross, B., Dixon, R. Minerals of South Africa /B. Cairncross, R. Dixon // Geological Society of South Africa. – Johannesburg, 1995. - 296 p.*

*Clabaugh, S. E. Corundum deposits of Montana / S. E. Clabaugh // USGS: Geological Survey Bulletin. – 1952. – Vol. 983. – P. 1-100.*

*Coenraads, R.R. Surface Features of Natural Rubies and Sapphires Associated with Volcanic Provinces // Journal of Gemmology. 1992. V. 23. P. 151 - 160.*

*Daw Than Than Nu. A Comparative Study of the origin of Ruby and Sapphire in the Mogok. Pyinlon and Mong Hsu areas / Daw Than Than Nu. – June 2003. – P. 52,101.*

*Dzikowski, T.J.; Cempirek, J.; Groat, L.A.; Dipple, G.M.; Giuliani, G. Origin of gem corundum in calcite marble: The Revelstoke occurrence in the Canadian Cordillera of British Columbia. Lithos 2014, 198–199, 281–297. [CrossRef]*

*Fagan, A.J. The Ruby and Pink Sapphire Deposits of SW Greenland: Geological Setting, Genesis, and Exploration Techniques. Ph.D. Thesis, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2018.*

*Fanka, A.; Sutthirat, C. Petrochemistry, mineral chemistry, and pressure-temperature model of corundum-bearing amphibolite from Montepuez, Mozambique. Arab. J. Sci. Eng. 2018, 43, 3751–3767. [CrossRef]*

*Forsthoff, W.* Optical sorting of coarse materials // ZKG International. - 2000. - V. 53. - № 6. - P. 331-339.

*Garde, A.; Marker, M.* Corundum crystals with blue-red color zoning near Kangerdluarssuk, Sukkertoppen district, West Greenland. *Rep. Gronl. Geol. Unders.* 1988, 140, 46–49.

*Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Fallick A.E., Phang Trong T., Hoang Quang V., Pham Van L., Schwarz D.* Basalt petrology, zircon ages and sapphire genesis from Dak Nong, Southern Vietnam // *Miner. Mag.*, 2005, v. 69, № 1, p. 21–38.

*Garnier, V.* Les Gisements de Rubis Associes aux Marbres de l'Asie Centrale et du Sud-est: Genese et Caractérisation Isotopique. Ph.D. Thesis, University of Nancy, Nancy, France, 2003.

*Garnier, V.; Giuliani, G.; Maluski, H.; Ohnenstetter, D.; Phan, T.T.; Hoang, Q.V.; Pham, V.L.; Vu, V.T.; Schwarz, D.* Ar-Ar ages in phlogopites from marble-hosted ruby deposits in northern Vietnam: Evidence for Cenozoic ruby formation. *Chem. Geol.* 2002, 188, 33–49. [CrossRef]

*Garnier, V.; Giuliani, G.; Ohnenstetter, D.; Fallick, A.E.; Dubessy, J.; Banks, D.; Hoang, Q.V.; Lhomme, T.; Maluski, H.; Picher, A.; et al.* Marble-hosted ruby deposits from central and southeast Asia: Towards a new genetic model. *Ore Geol. Rev.* 2008, 34, 169–191. [CrossRef]

*Garnier, V.; Maluski, H.; Giuliani, G.; Ohnenstetter, D.; Schwarz, D.* Ar-Ar and U-Pb ages of marble hosted ruby deposits from central and south East Asia. *Can. J. Earth Sci.* 2006, 43, 1–23. [CrossRef]

*Garnier, V.; Ohnenstetter, D.; Giuliani, G.; Maluski, H.; Deloule, E.; Phan, T.T.; Pham, V.L.; Hoang, Q.V.* Age and significance of ruby-bearing marbles from the Red River shear zone, northern Vietnam. *Can. Mineral.* 2004, 43, 1315–1329. [CrossRef]

*Giuliani G., Groat L., Fallick A., Pignatelli I. and Pardieu V.* Ruby Deposits: A Review and Geological Classification // *Mineralogy and Geochemistry of Ruby.* Minerals 2020, 10, 597,11-93

*Giuliani, G.; Caumon, G.; Rakotosamizanany, S.; Ohnenstetter, D.; Rakotondrazafy, A.F.M.* Classification chimique des corindons par analyse factorielle discriminante: Application a la typologie des gisements de rubis et saphirs. *Rev. Ass. Fr. Gemmol. AFG* 2014, 188, 14–22.

*Giuliani, G.; Fallick, A.E.; Rakotondrazafy, A.F.M.; Ohnenstetter, D.; Andriamamonjy, A.; Rakotosamizanany, S.; Ralantoarison, T.; Razanatseho, M.M.; Dunaigre, C.; Schwarz, D.* Oxygen isotope systematics of gem corundum deposits in Madagascar: Relevance for their geological origin. *Mineral. Depos.* 2007, 42, 251–270. [CrossRef]

*Giuliani, G.; Ohnenstetter, D.; Fallick, A.E.; Groat, L.; Fagan, J.* The geology and genesis of gem corundum deposits. In *Geology of Gem Deposits*; Groat, L.A., Ed.; Mineralogical Association of Canada: Tucson, AZ, USA, 2014; Short Course Series; Volume 44, pp. 29–112.

*Giuliani, G.; Pivin, M.; Fallick, A.E.; Ohnenstetter, D.; Song, Y.; Demaiffe, D.* Geochemical and oxygen isotope signatures of mantle corundum megacrysts from the Mbuji-Mayi kimberlite, Democratic Republic of Congo, and the Changle alkali basalt, China. *C.R. Geosciences* 2015, 347, 24–34. [CrossRef]

*Goldstein, R. H.* Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals / R. H. Goldstein, T. J. Reynolds (CD-ROM – Import). - 30 Jun 1994.

*Graham, I.; Sutherland, L.; Khin, Z.; Nechaev, V.; Khanchuk, A.* Advances in our understanding of the gem corundum deposits of the West Pacific continental margins intraplate basaltic fields. *Ore Geol. Rev* 2008, 34, 200–215. [CrossRef]

*Grew, E. S.* Kornerupine at the Sar-e-Sang, Afganistan, whiteschist locality: implications for tourmaline-kornerupine distribution in metamorphic rocks / E. S. Grew // *American mineralogist*/ - 1988. - v.73. - P. 345-357.

*Gübelin E. J. and J. I. Koivula J. I., 1986.* Photoatlas of Inclusions in Gemstones. ABC Edition, Zurich, pp. 532

*Gübelin, E.* Die Lagerstätten der Rubine and Sapphire Thailand / E. Gubelin // *Zell-schrift der Deutschen Gesellschaft für Edelsteinkunde.* – 1965. – №53. – S. 27-29.

*Gübelin, E. J.* Die Edelsteinvorkommen Pakistans: Rubine aus dem Hunzatal / *E. J. Gübelin* // *Lapis*. – 1982. – Vol. 7, № 5. – S. 19-31.

*Guo, J., O'Reilly, S.Y., Griffin, W.L.* Corundum from basaltic terrains: a mineral inclusion approach to the enigma // *Contr. Miner. Petrol.*, 1996, v. 122, p. 368—386.

*Hall, R. L.* Corundum in the Northern and Eastern Transvaal / *R. L. Hall* // Union of South Africa, Department of Mines and Industries, Memoir. - 1920. - 15 p.

*Harding, R. R.* A description of ruby from Nepal / *R. R. Harding, K. Scarratt* // *Journal of Gemmology*. - 1986. - V. 20, № 1. - P. 3-10.

*Hintze, J.* (2010): Safari ndjema - Afrikanisches Tagebuch (II): Rubin in Zoisit - ein Klassiker aus Longido in Tansania. *Lapis* 35 (12), 15-19 (in German).

*Hong-sen X., Wei-guo Z., Wei H., Wen-ge Z., Jie G., Ji-an X.* Discovery of corundum in alkali basalt at high temperature and high pressure // *J. Physics, Condensed Matter*, 2002, v. 14, p. 11365—11368.

*Hughes R. W.* Ruby & Sapphire. RWH Publishing, 1997. - 512 pp.

*Hutchinson, M.T.; Nixon, P.H.; Harley, S.L.* Corundum inclusions in diamonds-discriminatory criteria and a corundum composition dataset. *Lithos* **2004**, 77, 273–286. [CrossRef]

*Iyer, L. A. N.* The geology and gemstones of the Mogok stone tract, Burma / *L. A. N. Iyer* // *Memoirs of the Geology Survey of India*. – 1953. – Vol. 82. – P. 7-100.

*Jons, N.; Schenk, V.* Relics of the Mozambique Ocean in the central East African Orogen: Evidence from the Vohibory Block of Southern Madagascar. *J. Metam. Geol.* 2008, 26, 17–28. [CrossRef]

*Keulen, N.; Thomsen, T.B.; Schumacher, J.C.; Poulsen, M.D.; Kalvig, P.; Vennemann, T.; Salimi, R.* Formation, origin and geographic typing of corundum (ruby and pink sapphire) from the Fiskenasset complex, Greenland. *Lithos* **2020**, 36 –367. [CrossRef]

Key, R.M.; Ochieng, J.O. The growth of rubies in south-east Kenya. *J. Gemmol.* 1991, 22, 484–496. [CrossRef]

Khanchuk A., Zalishchak B., Pakhomova V., Odarichenko E., Sapin V. Genesis and gemmology of sapphire from the Nezametnoye deposit, Primorye Region, Russia // *Austr. Gemmologist.* 2003. Vol. 21. P 329-335.

Khin, Z.; Sutherland, F.L.; Yui, T.F.; Meffre, S.; Thu, K. Vanadium-rich ruby and sapphire within Mogok gemfield, Myanmar: Implications for gem color and genesis. *Mineral. Depos.* 2015, 50, 25–39. [CrossRef]

Khoi, N.N., Sutthirat, Ch., Tuan, D.A., Nam, N.N. Ruby and Sapphire from the Tan Huong-Truc Lau Area, Yen Bai Province, Northern Vietnam // *Gems Gemology.* 2011, 47(3), pp 182-195

Kissin, A.J. Ruby and sapphire from the southern Ural Mountains, Russia. *Gems Gemol.* 1994, 30, 243–252. [CrossRef]

Kissin, A.; Gottman, I.; Sustavov, S.; Murzin, V.; Kiseleva, D. The First Find of Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Eskolaite Associated with Marble-Hosted Ruby in the Southern Urals and the Problem of Al and Cr Sources // *Mineralogy and Geochemistry of Ruby.* *Minerals* 2020, 10, 597, 93 – 105

Knapp, H., Neubert, K., Schropp, Ch., Wotruba, H. Viable Applications of Sensor- Based Sorting for the Processing of Mineral Resources // *ChemBioEng Review.* - 2014. - V. 1 - P. 86-95.

Krebs, M. Y., Hardman, M.F., Pearson, D. G., Yan Luo, Fagan, A.J. and Sarkar, C. An Evaluation of the Potential for Determination of the Geographic Origin of Ruby and Sapphire Using an Expanded Trace Element Suite Plus Sr–Pb Isotope Compositions // *Mineralogy and Geochemistry of Ruby.* *Minerals* 2020, 10, 597, 125-161

Kroner, A. Late Precambrian plate tectonics and orogeny: A need to redefine the term Pan-African. In *African Geology*; Klerkx, J., Michot, J., Eds.; Tervuren, Musée Royal de l’Afrique Centrale: Tervuren, Belgium, 1984; pp. 23–28.

Krzemnicki, M. S., Hanni, H. A., et al. Investigations on sapphires from an alkali basalt, South West Rwanda. *J. Gemmol.*, 1996, 25(2): 90-106.

*Landriault D.* Paste backfill mix design for Canadian underground hard rock mining. Nova Scotia, 1995. - p. 28.

*Le Goff, E.; Deschamps, Y.; Guerrot, C.* Tectonic implications of new single zircon Pb-Pb evaporation data in the Lossogonoi and Longido ruby-districts, Mozambican metamorphic Belt of north-eastern Tanzania. *Comptes Rendus Geosci.* 2010, 342, 36–45. [CrossRef]

*Litvinenko, A.K.; Sorokina, E.S.; Høger, T.; Kostitsyn, Z.A.; Botcharnikov, R.E.; Somsikova, T.; Romashova, T.V.; Hofmeister, W.* Petrogenesis of the Snezhnoe ruby deposit, Central Pamir. *Minerals* 2020, 10, 478. [CrossRef]

*Louchnikov, V. N.* Ground Support liners for underground mines: energy absorption capacities and costs / V. N. Louchnikov, V. A. Eremenko, M. P. Sandy // *Eurasian Mining*. – 2014. – № 91. – P. 54-62.

*Maung, Th.* Summary of the geological history of Myanmar / Thein Maung. – Unpublished paper, 2013. – 8 p.

*Meert, J.G.* A synopsis of events related to the assembly of eastern Gondwana // *Tectonophysics*, 2003, vol. 362, pp. 1–40.

*Mercier, A.; Debat, P.; Saul, J.M.* Exotic origin of the ruby deposits of the Mangari area in SE Kenya. *Ore Geol. Rev.* **1999**, 14, 83–104. [CrossRef]

*Mises R.* Mathematical Theory of Probability and Statistics / ed. H.Geiringer, 1-st edition. Academic Press, 1964. - 708 p.

*Nam, N.V.; Minh, N.T.; Thuyet, and Nguy Tuyet Nhung, T.N.T.; Khoi, N.N.;Sutthirat, C.; Tuan, D.A.* Ruby and sapphire from the Than-Huong–Truc Lau area, Yen Bai province, Northern Vietnam // *Gems & Gemology*. 2011 182-195

*NguyenDinh N., Bawono A,A. Yang E., Lechner B.* Using Corundum to Improve Skid Resistance of Pavement Made of Engineered Cementitious Composite // *Transportation Research Board 97th Annual Meeting* - :Washington DC, United States: 2018. 12 p.

*Okrusch, M.; Bunch, T.E.; Bank, H.* Paragenesis and petrogenesis of a corundum-bearing marble at Hunza (Kashmir). *Mineral. Depos.* 1976, 11, 278–297. [CrossRef]

*Palke, A.C.; Wong, J.; Verdel, C.; Avila, J.N.* A common origin for Thai/Cambodian rubies and blue and violet sapphires from Yogo Gulch, Montana, U.S.A. *Am. Mineral.* 2018, 103, 469–479.

*Paquette, J.L.; Nadelec, A.; Moine, B.; Rakotondrazafy, A.F.M.* U-Pb single zircon Pb-evaporation and Sm-Nd isotopic study of a granulite domain in SE Madagascar. *J. Geol.* 1994, 102, 523–538. [CrossRef]

*Pardieu, V. & Senoble.* Jean Baptiste An update on Ruby and Sapphire mining in South East Asia and East Africa. -2005. Available at: [www.fieldgemology.com](http://www.fieldgemology.com)

*Pauling, L., Hendrics, S.B.* The crystal structures of hematite and corundum // *Journ. Am. Chem. Soc.* - 1925. - 47. - 781 p.

*Peretti, A.; Mullis, J.; Mouawad, F.* The role of fluoride in the formation of color zoning in rubies from Mong Hsu (Myanmar, Burma). *J. Gemmol.* 1996, 25, 3–19. [CrossRef]

*Peucat, J.J.; Ruffault, P.; Fritsch, E.; Bouhnik-Le Coz, M.; Simonet, C.; Lasnier, B.* Ga/Mg ratios as a new geochemical tool to differentiate magmatic from metamorphic blue sapphires. *Lithos* 2007, 98, 261–274.[CrossRef]

*Pieper, F.; Pfaff, G.; Maier, H.; Kruggel-Emden and other* Numerical modelling of an optical belt sorter using a DEM–CFD approach coupled with particle tracking and comparison with experiments // *Powder Technology.* 2018. - V. 340. - P. 181-193.

*Pignatelli, I.; Giuliani, G.; Morlot, C.; Pham, V.L.* The texture and chemical composition of trapiche ruby from Khoan Thong, Luc Yen mining district, northern Vietnam. *J. Gemmol.* 2019, 36, 726–745. [CrossRef]

*Polat A., Schersten A., Appel P.W.U., Frei R.* New age (ca. 2970 Ma), mantle source composition and geodynamic constraints on the Archean Fiskensæset anorthosite complex, SW Greenland // *Chemical Geology.* 2010, 277 (1). 1-20

*Principais depositos minerals do Brasil.* Vol. IV, par. A, Brasilia, 1991

*Raghu, K.C.; Mohanana, S.; Tripathya, S.K.; Ramamurthya, Y.; Venugopalana, T.; Suresh, N.* Prediction of process input interactions of Floatex Density Separator performance for separating medium density particles / International Journal of Mineral Processing- 2011. - P. 136-141.

*Rakotondrazafy, A.F.M., Giuliani, G; Ohnenstetter, D.; Fallick, A.E.* Gem corundum deposits of Madagascar: a review // Ore Geology reviews/ 2008, 34-(1)/ 134-154

*Roedder, E.* Fluid Inclusions. Systematics of Fluid Inclusions in Diagenetic Minerals / Reviews in Mineralogy / E. Roedder // Mineralogical Society of America. - 1984. - Vol. 12. - 644 p.

*Rosengren, K.* Avoca mining method / K. Rosengren: Presentation at Broken Hill Zinc-lead mine, NSW, Australia, May 2014. – 2014. – 212 p.

*Saul J.M.* A Geologist Speculates: On Gemstones, Origins of Gas and Oil, Moonlike Impact Scars on the Earth, the Emergence of Animals and Cancer / Second edition, online version, ©John M. Saul, 2015. 160 p.

*Schwarz, D.; Pardieu, V.; Saul, J.M.; Schmetzer, K.; Laurs, B.M.; Giuliani, G.; Klemm, L.; Malsy, A.K.; Hauzenberger, C.; Du Toit, G.; et al.* Ruby and sapphires from Winza (Central Tanzania). Gems Gemol. 2008, 44, 322–347. [CrossRef]

*Silva, K.K.M.W.* Geology and the origin of the corundum-bearing skarn at Bakamuna, Sri Lanka / K.K.M.W. Silva, C.H.E.R. Siriwardena // Mineralium Deposita. - 1988. - Vol. 23, Iss. 3. - P. 186–190.

*Simonet, C.* Geology of Sapphire and Ruby Deposits - The example of the John Saul Ruby Mine, Mangare area, Southern Kenya / C. Simonet // PhD Thesis, University of Nantes, 2000.

*Simonet, C.* Geologie des Gisements de Saphir et de Rubis. L'exemple de la John Saul Mine, Mangari, Kenya.Ph.D. Thesis, Universitř de Nantes, Nantes, France, 2000.

*Simonet, C.; Fritsch, E.; Lasnier, B.* A classification of gem corundum deposits aimed towards gem exploration. *Ore Geol. Rev.* 2008, 34, 127–133. [CrossRef]

*Smirnov S.Z., Izokh A.E., Kovyazin S.V., Mashkovtsev R.I., Trang Trong H., Ngo Thi P., Kalinina V.V., Pospelova L.N.* Inclusions in Dak Nong placer sapphires, Central Vietnam: conditions of corundum crystallization in the continental crust // *J. Geol., Series B*, 2006, v. 28, p. 58—70.

*Solesbury, F.* Gem corundum pegmatites in NE Tanganyika / *F. Solesbury // Economic Geology.* - 1967. - V. 62, № 7. - P. 983-991.

*Sorokina, E.S.; Rošel, D.; Hager, T.; Mertz-Kraus, R.; Saul, J.M.* LA-ICP-MS U–Pb dating of rutile inclusions within corundum (ruby and sapphire): New constraints on the formation of corundum deposits along the Mozambique belt. *Mineral. Depos.* 2017, 52, 641–649. [CrossRef]

*Steven, P., Youkovich, S.* Ruby mines of North Carolina / *P. Steven, S. Youkovich // Rocks and Miner.* - 1985. - vol. 60, 2.

*Sutherland, F.L. & Schwarz, D.* Origin of gem corundums from basaltic fields. *Austr. Gemmol.* 2001, 21, 30–33.

*Sutherland, F.L.* An unusual ruby-sapphire-spinel assemblage from the Tertiary Barrington volcanic province, New South Wales / *F.L. Sutherland, R.R. Coenraads // Mineralogical Magazine.* – 1996. – Vol. 60. – P. 623-638.

*Sutherland, F.L.; Coenraads, R.R.; Abduriyim, A.; Meffre, S.; Hoskin, P.W.O.; Giuliani, G.; Beattie, R.; Wuhrer, R.; Sutherland, G.B.* Corundum (sapphire) and zircon relationships, Lava Plains gem fields, NE Australia: Integrated mineralogy, geochemistry, age determination, genesis and geographic typing. *Mineral. Mag.* 2015, 79, 545–581. [CrossRef]

*Sutherland, F.L.; Giuliani, G.; Fallick, A.E.; Garland, M.; Webb, G.B.* Sapphire-ruby characteristics, West Pailin, Cambodia: Clues to their origin based on trace element and O isotope analysis. *Austr. Gemmol.* 2009, 23, 373–432.

*Sutherland, F.L.; Khin, Z.; Meffre, F.; Thompson, J.; Goemann, K.; Kyaw, T.; Than, T.N.; Mhod, Z.M.; Harris, S.I.* Diversity in ruby chemistry and its

inclusions: Intra and inter-continental comparisons from Myanmar and Eastern Australia. *Minerals* 2019, 9, 28. [CrossRef]

*Sutherland, F.L.; Khin, Z.; Meffre, S.; Giuliani, G.; Fallick, A.E.; Webb, G.B.* Gem-corundum megacrysts from east Australian basalt fields: Trace elements, oxygen isotopes and origins. *Austr. J. Earth Sci.* 2009, 56, 1003–1022. [CrossRef]

*Sutherland, F.L.; Schwarz, D.; Jobbins, E.A.; Coenraads, R.R.; Webb, G.* Distinctive gem corundum suites from discrete basalt fields: A comparative study of Barrington, Australia, and West Pailin, Cambodia, gemfields. *J. Gemmol.* 1998, 26, 65–85. [CrossRef]

*Sutherland, L.; Graham, I.; Harris, S.; Khin, Z.; Meffre, S.; Coldham, T.; Coenraads, R.; Sutherland, G.* Rubis australasiens. *Rev. Ass. Fr. Gemmol. AFG* 2016, 197, 13–20.

*Tenthorey, E.A.; Ryan, J.G.; Snow, E.A.* Petrogenesis of sapphirine-bearing metatroctolites from the Buck Creek ultramafic body, southern Appalachians // *J. Metam. Geol.* 1996, 14, 103–114.

*Thomhson, S. R.* British Tertiary volcanic province / S. R. Thomhson // *Scott. J. Geol.* - 1982. - Vol. 18. - P. 49–107.

*Tzen-Fu Yui* Oxygen isotope studies on placer sapphire and ruby in the Chanthaburi-Trat alkali basaltic gemfield, Thailand / Tzen-Fu Yui, Chao-Ming Wu, P. Limtrakun, W. Sricharn // *Lithos.* – 2006. – Vol. 86. – P. 197-211.

*Wells, A. J.* Corundum from Ceylon / A. J. Wells // *Geological Magazine.* – 1956. – Vol. 93, № 1. – P. 25-31.