

На правах рукописи



[553.82+553.22] (571.621)

**КУЛЬТЕНКО
СВЕТЛАНА ЮРЬЕВНА**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КОРУНДОВ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ СУТАРА И ОСОБЕННОСТИ ИХ ГЕНЕЗИСА
(ЕАО, РОССИЯ)**

специальность 25.00.04 –петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Владивосток
2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Дальневосточном геологическом институте Дальневосточного отделения РАН.

Научный руководитель: академик
Ханчук Александр Иванович

Официальные оппоненты: доктор геолого-минералогических наук,
профессор,
заведующий кафедрой петрографии
Чернышов Алексей Иванович
Томский государственный университет (ТГУ), Томск

доктор геолого-минералогических наук,
зам. директора по науке, заведующий лабораторией
геохимии окружающей среды и физико-химического
моделирования
Чудненко Константин Вадимович
Институт геохимии им. А.П. Виноградова (ИГХ СО
РАН), Иркутск

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН), г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «10» декабря 2018 г., в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 005.006.01 при Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН по адресу: 690022 г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159, Дальневосточный геологический институт.

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 690022 г. Владивосток, пр-т 100 лет Владивостоку, 159, Дальневосточный геологический институт, учёному секретарю диссертационного совета Д 005.006.01
E-mail: elenavalper@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ДВО РАН и на сайте <http://www.fegi.ru>

Автореферат разослан « » октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,

кандидат геолого-минералогических наук



Е.В. Перевозникова

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Ювелирные камни являются объектом международной торговли, а для некоторых стран главным источником валютных поступлений. Природные рубины и сапфиры являются драгоценными камнями первого класса, по стоимости не уступающими алмазу и изумруду. В государственном балансе России числятся только три месторождения ограночного рубина и сапфира – Положиха, Корнилов Лог, Вербаный Лог (Средний Урал), а на месторождении Незаметнинском (Приморский край) прогнозные ресурсы корунда превышают 1 т кристаллосырья [Буканов, 2008]. Необеспеченность сырьем ювелирной отрасли в нашей стране приводит к импорту сапфиров с зарубежного рынка, хотя потенциал отечественных месторождений и проявлений корунда далеко не исчерпан.

С развитием технологий обогащения и облагораживания появилась возможность пересмотреть некоторые проявления камнесамоцветного сырья и отнести их к разряду рентабельных. В этих условиях становятся актуальными вопросы сырьевой базы и перспектив ее развития за счет продолжения работ на освоенных проявлениях.

Автором для исследования выбрано месторождение золота Сутара с корундовой минерализацией, на котором, кроме корундов из россыпи, известны марундиты – редкий тип корундовых пород с содержанием корунда до 70 – 90%. Первые сведения о наличии корунда в районе Сутары были получены еще в 1937 году, однако проведенные работы в основном были посвящены выяснению происхождения золоторудной минерализации, тогда как проблема генезиса корунда практически не рассматривалась.

Наши исследования направлены на определение физико-химических условий образования корундов, а также выявление геологических формаций, с которыми пространственно и генетически может быть связан корундовый объект.

Цель работы – комплексное изучение корундов месторождения Сутара для выявления особенностей их генезиса и анализа физико-химических условий корундообразования.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

1. анализ-обобщение литературных данных о генетических типах месторождений корундов;
2. детальное петрографическое, геохимическое и минералогическое изучение пород месторождения;
3. минералогические, термобарогеохимические и Рамановские исследования марундитов и корундов из россыпи и определение физико-химических параметров процесса их образования;
4. количественное моделирование процесса корундообразования на месторождении Сутара с помощью программного комплекса "Селектор".

Объект исследования. Объектом исследования выбрано месторождение золота Сутара с корундовой минерализацией, расположенное в Еврейской Автономной Области.

Фактический материал и методы исследования. В основу работы положены материалы, полученные автором за период 2007-2017 гг. в ходе полевых работ и научно-исследовательских работ по проектам Лаборатории рудно-магматических систем ДВГИ ДВО РАН по темам: 1) грант ДВО РАН № 11-III-B-08-177 "Петрогенезис проявлений корунда (месторождение Сутара, ЕАО)" (2011-2012 гг.);

2) грант ДВО РАН № 12-III-B-08-151 "Петрология корундовых метасоматитов месторождения Сутара (ЕАО)" (2012-2013 гг.); 3) грант ДВО РАН № 13-III-B-08-176 "Пегматиты месторождения Сутара: происхождение, геодинамические условия становления материнских турмалиновых гранитов и роль в образовании корундовых руд (марундитов)" (2013-2014 гг.); 4) грант РФФИ № 13-05-90736 мол_рф_нр "Флюидный режим формирования турмалиновых гранитов и пегматитов месторождения Сутара (ЕАО, Дальний Восток России)" (2013-2014 гг.); 5) грант ДВО РАН № 14-III-B-08-172 "Комплексное геохимическое исследование сопряженных процессов метаморфизма, гранитизации и пегматитообразования для решения вопроса о механизме формирования месторождения корунда Сутара (Дальний Восток России)" (2014-2015 гг.); 6) грант РФФИ №5-05-00809 А "Анализ минеральных парагенезисов в метаморфических и метасоматических горных породах методом минимизации термодинамических потенциалов на ПК Селектор" (2015-2017 гг.).

В ходе полевых работ выполнялись геологические маршруты с отбором образцов горных пород и шлихов для выполнения различных видов лабораторных исследований. Петрографические характеристики даны для 300 шлифов и аншлифов. Диссертантом изготовлено 70 двусторонне полированных пластин из корундов и марундитов. Шлифы и пластинки изучались в Центре коллективного пользования (ЦКП) Приморского центра локального элементного и изотопного анализа (ПЦЛЭИА) ДВГИ ДВО РАН на оптическом поляризационном микроскопе для геологических исследований NIKON E 600 POL.

В горных породах содержания петрогенных элементов определены методом ИСП АЭС на спектрометре ICAP 6500 Duo в Лаборатории аналитической химии ЦКП (ПЦЛЭИА) ДВГИ ДВО РАН, аналитики В.Н. Каминская, Г.А. Горбач, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало (25 образцов). Определение содержания H_2O , ППП, SiO_2 выполнено методом гравиметрии - аналитики В.Н. Каминская, Л.И. Алексеева, Л.А.Авдевина. Содержания элементов-примесей и редкоземельных элементов определены методом ИСП-МС на спектрометре Agilent 7500с в Лаборатории аналитической химии ЦКП (ПЦЛЭИА) ДВГИ ДВО РАН, аналитики: к.г.-м.н. М.Г. Блохин; Л.С. Левчук, Д.С. Остапенко (25 образцов). Пробоподготовка к инструментальному определению - сплавление с метаборатом лития ($LiBO_2$). Аналитики Л.С.Левчук, Ю.М. Иванова, А.А. Вельдемар. Ответственный исполнитель н.с. Н. В. Зарубина.

Химический состав корундов из россыпи определён несколькими методами. Применялась оригинальная методика, включающая определение основного компонента корундов – алюминия методом ИСП АЭС на спектрометре ICAP6500 Duo, в комбинации с определением широкого спектра микроэлементов методом ИСП-МС на спектрометре Agilent 7500с в Лаборатории аналитической химии ЦКП (ПЦЛЭИА) ДВГИ ДВО РАН, с использованием двух режимов: стандартного и гелиевого (19 образцов). Анализ выполнили к.г.-м.н. М. Г. Блохин, Д.С. Остапенко, Г.И. Горбач, Е. А. Ткалина, Н. В. Хуркало; аналитики Л.С. Левчук, Ю.М. Иванова; методическая работа н. с. Н.В. Зарубина, Г.И. Горбач, М.Г. Блохин. Ответственный исполнитель н.с. Зарубина Н. В..

Исследование химического состава породообразующих и аксессуарных минералов гранитоидов, метаморфических пород, минеральных фаз в корундах и марундитах выполнено методом рентгеноспектрального микроанализа на

четырёхканальном микроанализаторе JXA – 8100 в Лаборатории рентгеновских методов, ЦКП ДВГИ ДВО РАН, аналитик Н.И. Екимова (330 анализов минералов).

Термометрические исследования флюидных включений выполнены диссертантом методом термобарогеохимии на оптическом поляризационном микроскопе NIKON E – 600 POL с термостоликом Lincam TS 1500 (для нагрева) и криостоликом Lincam THMSG 600 (для охлаждения), ЦКП ДВГИ ДВО РАН, (70 флюидных включений).

Исследования спектров комбинационного рассеяния света во флюидных и минеральных включениях проводились диссертантом методом КР-спектроскопии с помощью КР-спектрометров Horiba LabRam HR 800 в ИГМ СО РАН (г.Новосибирск) и ЦКП ДВГИ ДВО РАН (г.Владивосток) (140 включений).

Обработка полученных геологических и геохимических данных проводилась диссертантом с использованием программ Mathematica, Selektor, CorelDraw.

Научная новизна. Впервые выполнено петрографическое и минералогическое изучение марундитов и корундов из россыпи месторождения Сутара, определены их минеральный и химический состав. Впервые получены данные о составе первичных включений в корундах из марундитов и корундах из россыпи месторождения Сутара. Впервые методом физико-химического моделирования определена температура образования диаспора в первичных включениях корундов из россыпи и корундов из марундитов месторождения Сутара. На основе данных о геохимическом и минеральном составе магматических, метаморфических и метасоматических пород исследуемого района, а также марундитов и корундов из россыпи, разработана физико-химическая модель образования корундосодержащих пород, позволившая определить температуру и условия химизма среды (флюидов и пород), благоприятные для кристаллизации корунда месторождения Сутара (программный комплекс «Селектор»).

Практическая значимость. Разработанная на Программном комплексе Селектор модель охватывает основные особенности образования корундов, а полученные результаты компьютерного моделирования могут быть использованы на практическом отношении. Результаты, полученные автором, а также предложенные методические подходы, могут быть использованы на других геологических объектах для решения вопросов, касающихся генезиса корунда и локального прогноза камнесамоцветного сырья не только в Дальневосточном, но и в других регионах. Приуроченность корундовой минерализации к высокоглиноземистым гранитам, секущим карбонатные породы, открывает дальнейшие перспективы для нахождения аналогичных корундовых проявлений в районах с подобным геологическим строением (например, Малый Хинган).

Основные защищаемые положения:

1. Источником россыпного ореола корундовой минерализации месторождения Сутара являются корундсодержащие метасоматические зоны, сформированные в результате постмагматического реакционного преобразования ордовикских высокоглиноземистых гранитов биробиджанского комплекса на контакте с вмещающими раннекембрийскими карбонатными породами хинганской серии. Реакционное взаимодействие гранитов и мраморов реализовалось, судя по составу первичных включений в корундах ($\text{CO}_2 + \text{CH}_4 +$ дочерняя фаза-диаспор), при участии существенно углекислотного относительно маловодного флюида.

2. Разработана модель образования марундитов и корундовых плагиоклазитов на основе равновесно-динамического подхода, реализованного на базе

программного комплекса Селектор. Установлено, что марундиты и корундовые плагиоклазиты образовались в результате десиликации алюмосиликатных пород на контакте с карбонатными породами при участии флюида, содержащего хлор. Оптимальные условия корундообразования определяются интервалом температур 500-600°C и величиной рН, равному 5-9. Образование высоких содержаний корунда, вероятно, происходило при инфильтрации хлоридного флюида в массу уже сформированных метасоматических корундсодержащих пород.

3. Впервые обнаруженный на месторождении Сутара диаспор образовался в первичных включениях корундов в результате реакции захваченного существенно углекислого флюида с минералом-хозяином при температуре 305°C. Эта реакция при известном составе флюида и величине давления служит геотермометром.

Соответствие результатов работы научным специальностям. Результаты работы соответствуют пунктам 1 (магматическая геология), 2 (магматическая петрология) и 7 (метасоматизм) паспорта специальности 25.00.04.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации изложены в 23 работах, в том числе в 5 статьях в рецензируемых российских и зарубежных журналах (из них 3 статьи в журналах из списка ВАК). Основные положения работы докладывались и обсуждались на международной конференции "Asian current research on fluid inclusion (ACROFI-III)", Novosibirsk, 2010; на X Международной конференции "Новые идеи в науках о Земле", РГГРУ, 2011; на I Дальневосточной междисциплинарной молодежной конференции «Современные методы научных исследований», ДВО РАН, ДВФУ, Владивосток, 2011; на IX Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской научной сессии, посвященной 60-летию Геологического института КНЦ РАН, Апатиты, 2012; на IV Всероссийской конференции молодых ученых «Современные проблемы геологии, геохимии и экологии Дальнего востока России», Владивосток, 2012; на Второй и Третьей научных молодежных школах с международным участием "Новое в познании процессов рудообразования", Москва, ИГЕМ РАН, 2012, 2013; на 11th International Conference on Raman Spectroscopy and its Applications to Geological, Planetary and Archeological Sciences" Washington University, St. Louis, USA, 2014, на Всероссийской конференции с международным участием "Месторождения камнесамоцветного и нерудного сырья различных геодинамических обстановок", Екатеринбург, ИГиГ УрО РАН, 2015; на Конкурсе научных работ молодых ученых и специалистов ДВГИ ДВО РАН, 2015. Получен диплом за лучший доклад Второй научной молодежной школы с международным участием "Новое в познании процессов рудообразования" ИГЕМ РАН (Москва, 2012).

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения, имеет общий объем 169 страниц, содержит 76 рисунков, 46 таблицы и 1 приложение. В списке литературы 133 источника.

Благодарности. Диссертация выполнена в лаборатории рудно-магматических систем ДВГИ ДВО РАН. Научные задачи исследования и основные подходы к их решению были определены совместно с научным руководителем академиком А.И. Ханчуком, к.г.-м.н. В.А. Пахомовой и д.г.-м.н. О.В. Авченко. Исследование минеральных и флюидных включений в марундитах и россыпных корундах месторождения Сутара проведено благодаря содействию к.г.-м.н. В.А. Пахомовой (ДВГИ ДВО РАН) и д.г.-м.н. С.З. Смирнова (ИГМ СО РАН). Физико-химическое моделирование выполнено на ПК Селектор под руководством д.г.-м.н. О.В. Авченко. Всем перечисленным учёным автор выражает свою искреннюю

благодарность за всестороннюю помощь и поддержку на всех этапах работы. Кроме того, автор признателен за терпение, проявленное в процессе многократных консультаций и критические замечания, высказанные во время предварительного обсуждения разделов диссертации [д.г.-м.н. В.И. Гвоздеву], к.г.-м.н. А.В. Гребенникову, д.г.-м.н. Ю.А. Мартынову, [к.г.-м.н. В.К. Попову], д.г.-м.н. В.В. Раткину, д.г.-м.н. Г.А. Валуй, д.г.-м.н. В.Г. Гоневчуку, д.г.-м.н. И.А. Тарарину, к.г.-м.н. С.О. Максимову. Автор считает приятным долгом выразить искреннюю благодарность членам коллектива лаборатории рудно-магматических систем м.н.с Д.Г. Федосееву, к.г.-м.н. О.А. Елисейевой, к.г.-м.н. Ю.А. Степновой, к.г.-м.н. В.Б. Тишкиной, м.н.с. А.А. Орехову за помощь при проведении полевых работ, дружескую поддержку и внимание. За содействие в проведении анализов на микрозонде и рентгеновской аппаратуре автор выражает глубокую благодарность к.г.-м.н. А.А. Карабцову, Н.И. Екимовой, к.г.-м.н. Е.А. Ноздрачёву, а также сотрудникам лаборатории аналитической химии Н.В. Зарубиной, Д.С. Остапенко, Т.К. Бабовой, В.И. Сеченской, Л.И. Азаровой, С. А. Муратовой. Особая благодарность выражается супругу Сергею и всем родным и друзьям, оказавшим поддержку на всех стадиях подготовки работы.

ГЛАВА 1. Генетические типы месторождений корунда (литературный обзор)

Известно, что для образования корунда необходимым условием является высокое содержание глинозема при дефиците кремнезема. Мировые месторождения корунда сосредоточены в странах Юго-Восточной Азии и Африки (Табл. 1.1) [Hughes, 1997; Shor R. at all, 2009; Gubelin E.J et al., 2008; Shigley et al., 2010]. Корунд встречается как в коренных месторождениях, так и во вторичных (россыпных), образованных за счет разрушения этих пород. Коренные источники корундовых россыпей можно разделить на четыре генетических класса: магматические, пегматитовые, метаморфогенные и метасоматические (Табл. 1.2)

Среди магматических месторождений корунда [Геншафт, 1987; Guo, 1996; Oakes, 1996; Sutherland, 2001,2002; Amour & Linner, 1999; Изох А.Э., Смирнов С.З, 2010;] выделяют сапфирсодержащие щелочные базальты (Австралия) [Stephenson, 1976], Таиланд [Хамлоет, 2014], Камбоджа, Лаос, Мадагаскар, сапфирсодержащие щелочные основные лампрофиры (США) [Bronslow & Komorowski, 1988; O`Reilly & Griffin, 1996; Zwaan et al., 2015; Cade at al., 2006; Schulze, 2003], сиениты (Приморский край) [Одариченко Э.Г., 2004].

К пегматитовым месторождениям корунда принадлежат десилицированные сиенитовые и миаскитовые пегматиты Кольского полуострова, Урала, Канады, Бирмы и Шри-Ланки [Буканов, Липовский, 1980].

Метаморфогенные – месторождения, образовавшиеся в результате прогрессивного метаморфизма высокоглиноземистых осадочных пород, известны в докембрийских кианит-силлиманитовых плагиогнейсах (Карелия, Приазовье, США, Шри Ланка, Финляндия, Мадагаскар) [Буканов, Липовский, 1980], а также в мраморах (Вьетнам, Мьянмар, Центральный Памир) [Барнов Н.Г., 2010].

Метасоматические месторождения представлены магнезиальными скарнами, связанными с гранитами (Памир, Мьянма, Афганистан) [Lyer, 1953]; алюмосиликатными эндоскарнами, локализующимися в эндоконтактах сиенитовых массивов с вмещающими их мраморами (Шри Ланка) [Silva & Siriwardena, 1988; Cooray, 1994; Sajeev et al., 2004]; вторичными кварцитами (Центральный Казахстан) [Жариков, 1998]; плагиоклазитами, слюдитами, марундитами, образованными за

счет алюмосиликатных пород в процессе биметасоматической десиликации (Индия, Танзания, США, Полярный Урал, Памир) [Фишман, 2006; Щербакова, 1976; Simonet et al., 2008; Избродин, 2003; Baba S. 1999; Schwarz, 2008; Литвиненко, 2006].

ГЛАВА 2. Геологический очерк района месторождения Сутара

Объект диссертационного исследования - месторождение золота Сутара, в административном плане относится к Облученскому району Еврейской Автономной Области (ЕАО). Район исследований расположен в юго-западной части Малохинганского террейна, входящего в состав Буреинского супертеррейна [Геодинамика, 2006].

По данным А.Ф. Васькина в пределах рудного района развиты архейские гнейсы, нижнекембрийские терригенные и карбонатные породы хинганской серии, ордовикские и карбоновые гранитоиды, терригенные и вулканогенные образования мелового возраста, олигоцен-миоценовые, плиоцен-четвертичные рыхлые отложения [Васькин, 1999] (рис. 1).

Ранними исследованиями [Ициксон, 1943, Шапошников, 1945] на Сутарской площади выявлены две разновидности корундовой минерализации – корундовые плагиоклазиты и марундиты, приуроченные к офикальцит-серпентиновым метасоматическим зонам на контакте лейкогранитов и карбонатных пород.

ГЛАВА 3. Петрография и геохимия магматических и метасоматических пород месторождения сутара

Нами в пределах Сутарской площади отобраны и изучены граниты, гранодиориты, гранитогнейсы, гнейсы и мраморы. Гранитоиды в разной степени изменены. Гнейсы расположены в северной части исследуемого района и прорываются гранитоидами ордовика. По данным А.Ф. Васькина [Васькин, 1999] породы метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации, на что указывает парагенезис: олигоклаз-андезин + кварц + биотит ± мусковит ± калишпат ± гранат.

Гнейсы амурской серии состоят из кварца 30%, олигоклаза (An 25) 20%, мусковита 20%, хлорита 20%, биотита 3-5%. Среди акцессорных минералов присутствуют ильменит, монацит, циркон, апатит.

Гнейсы гранатовые амурской серии состоят из кварца (25-30%), андезина (An 38) (25-30%), биотита и хлорита (20-30%), граната (10-15%). Примеси: кпш, ильменит, монацит, циркон, апатит, сфен (титанит), ортит, пирротин и халькопирит.

Гранитогнейсы биробиджанского комплекса. состоят из кварца (30%), олигоклаза (An 28) (30-40%), микроклина (20%), биотита (10%), хлорита (5-10%), мусковита (5-10%), граната, кианита, графита. Среди акцессорных минералов присутствуют рутил, шпинель, ильменит, монацит, ксенотим, циркон, апатит.

Гранодиориты тырмо-буреинского комплекса слагают Сутарский массив оказывают интенсивное контактовое воздействие на породы хинганской серии. Гранодиориты состоят из кварца (до 20%), микроклина (20-25%), альбитизированного плагиоклаза (An 4-13) (25-35%), граната (5-10%), мусковита (5-10%), цоизита (3-5%), хлорита (3-5%). Среди акцессорных минералов присутствуют апатит, монацит, циркон и ортит.

Доломитовые мраморы хинганской серии кимканской толщи вместе с алевролитами, глинистыми углеродистыми сланцами и известняками слагают

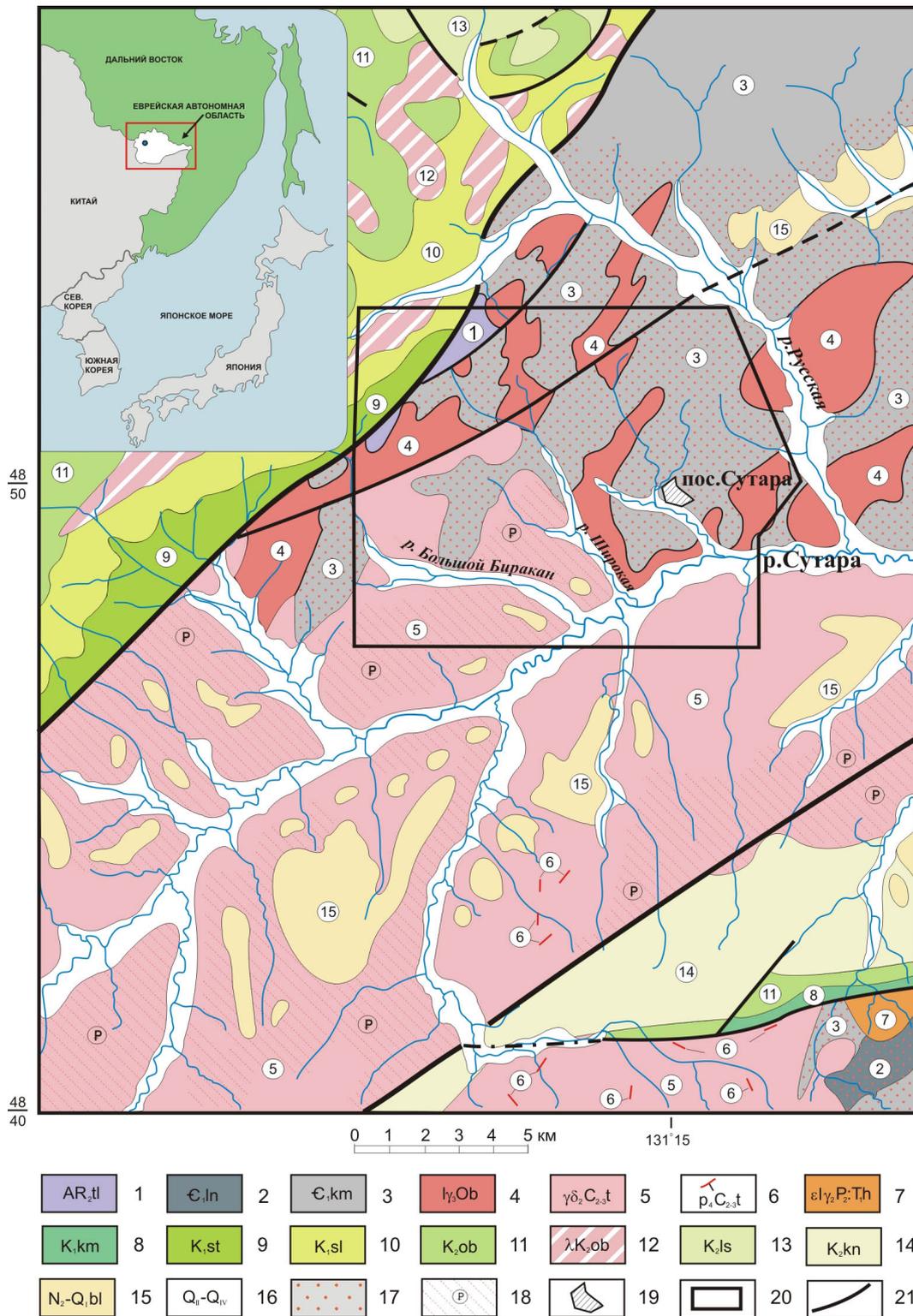


Рис. 1. Геологическая карта района исследований на основе Государственной геологической карты по А.Ф. Васькин, 1999 (с дополнениями автора).

1 - плагиогнейсы, гнейсы двуслюдяные и биотитовые (AR₂tl), 2 – известняки, доломиты с прослоями глинистых и углеродистых сланцев (Є.ln); 3 – алевролиты, глинистые углеродистые сланцы, известняки (Є.km); 4 – лейкограниты турмалинсодержащие, дайки пегматитов (ly₃Ob); 5 – гранодиориты, граниты (γδ₂C₂₋₃t); 6 – дайки пегматитов (p₄C₂₋₃t); 7 – субщелочные лейкограниты (εlγ₂P₂:T₁h); 8 – песчаники, алевролиты и аргиллиты (K₁km); 9 – лавы, лавобрекчии (K₁st); 10 – лавы и туфы риолитов, риодацитов (K₁sl); 11 – игнимбриты риолитов и трахириолитов (K₂ob); 12 – субвулканические образования (λK₂ob); 13 – лавы и туфы риолитов и трахириолитов (K₂ls); 14 – песчаники, туфопесчаники и туфоалевролиты (K₂kn); 15 – пески, глины (N₂-Q₁bl); 16 – аллювиальные пески, суглинки (aQ_{II}); 17 – контактовые роговики; 18 – кора выветривания; 19 – поселок Сугара; 20 – район исследования; 21 – тектонические нарушения.

центральную и северо-восточную части района исследования. Доломитовые мраморы состоят из доломита (60-70%), кальцита (15-20%), флогопита (5-10%), сепиолита (5-10%), клинохлора (5-10%). Присутствуют единичные зерна пирита и апатита. Появление доломитовых мраморов стало результатом мраморизации карбонатных пород. в результате регионального метаморфизма кимканской толщи.

Принимая во внимание описание Ициксоном и Шапошниковым коренные выходы марундитов и корундовых плагиоклазитов на контакте гранитов с карбонатными породами [Ициксон, 1943; Шапошников, 1944], более детально нами были исследованы граниты месторождения Сутара.

Калиевые субщелочные граниты биробиджанского комплекса состоят из кварца 25-35%, калишпата 30-40%, мусковита 10%, альбита (An 0) 5%, биотита 1-5 %. Акцессорные минералы: апатит, циркон, ксенотим, пирротин, рутил, уранинит. Плагиоклаз представлен только альбитом в количестве не более 3-5 %. На диаграмме Штрекайзена [Streckeisen, 1976] такие граниты попадают в поле щелочнополевошпатовых гранитов (alkali feldspar granite), что согласно Классификации магматических пород и словарю терминов [Le Maitre et al., 1989] является специальным термином для разновидности гранита, в которой плагиоклаза меньше 10 % от суммы полевого шпата].

Химический состав гранитов Биробиджанского комплекса (мас.%)						Таблица 1
Порода	1			2	3	4
Образец	БС-278	БС-267	БС-271	БС- 284/2	БС-286	БС- 184
SiO ₂	72,98	75,00	75,62	74,16	76,08	66,51
TiO ₂	0,06	0,03	0,01	0,01	0,28	0,01
Al ₂ O ₃	15,65	14,42	14,05	14,7	13,34	20,14
Fe ₂ O ₃	0,21	0,18	0,08	-	-	-
FeO	0,47	0,36	0,25	-	-	-
Fe ₂ O ₃ _tot	-	-	-	1,67	3,55	0,39
MnO	0,004	0,026	0,01	0,46	0,03	0,12
MgO	0,15	0,08	0,04	0,04	1,18	0,43
CaO	0,12	0,19	0,25	1,36	0,4	3,31
Na ₂ O	2,98	2,48	2,64	5,23	1,05	7,16
K ₂ O	7,09	6,95	6,61	1,88	1,16	0,59
P ₂ O ₅	0,05	0,11	0,1	0,03	0,02	0,02
H ₂ O ⁻	0,0	0,0	0,04	<ПО	0,1	0,1
ппп	0,5	0,72	0,4	0,16	1,29	1,04
Total	100,26	100,55	100,1	99,7	98,47	99,82
al ¹	13,25	17,41	27,70	12,59	2,54	15,07
f ¹	12,33	8,50	5,10	11,57	54,99	13,23
Ka	0,80	0,80	0,82	0,72	0,22	0,62
A/CNK	1,22	1,21	1,18	1,12	3,59	1,09
ASI	1,23	1,22	1,19	1,12	3,62	1,09
Al/(Na+K)	1,24	1,24	1,22	1,38	4,47	1,62
Fe*	0,83	0,87	0,89	0,98	0,75	0,47

Примечание: "-" элемент отсутствует, <ПО – ниже предела обнаружения. 1 - калиевые субщелочные граниты; 2 - гранатовый гранит; 3 - турмалинсодержащий гранит; 4 - альбитизированный гранит.

Для калиевых субщелочных гранитов характерны содержания SiO_2 72,9-75,6 мас.%) при преобладании K_2O над Na_2O ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 2,38-2,8$). Породы имеют высокое суммарное содержание щелочей - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 9,25 - 10,07$ мас.% при низких значениях $\text{CaO} = 0,12 - 0,25$ мас.% (табл. 1). При недостатке в составе породы кальция ($\text{CaO} < 1\%$), образование только микропертитов в калиевом полевоом шпате закономерно – весь Na входит в состав КПШ и не образует плагиоклаза. Для изучаемых пород характерно низкое содержание фемических компонентов: $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO} = 0,62 - 1,92$ мас.%; $\text{TiO}_2 = 0,01 - 0,06$ мас.%. Содержание глинозема (A/CNK) > 1 , что соответствует высокоглиноземистым породам. На классификационных диаграммах [Frost et al., 2001; Шкодзинский, 1992, Pecerillo and Taylor, 1976] составы гранитов попадают в поля железистых высококалиевых высокоглиноземистых щелочных и известково-щелочных (породы попадают в поле шошонитовой серии) гранитоидов. Возможно, на поздней магматической стадии был подток калиевых растворов, который обусловил появление тел высококалиевого характера.

Гранатовые граниты биробиджанского комплекса по своему внешнему виду представляют собой породу светло-серого цвета, состоят из кварца 25-30%, микроклина 25-40%, плагиоклаза ($\text{An} 0-13$) 25-30% и граната 10-30%. Для гранатовых гранитов характерно содержание SiO_2 74,1 мас.%, (табл. 1) при преобладании Na_2O над K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 2,78$) и низкое содержание фемических компонентов: $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO} = 1,71$ мас.%; $\text{TiO}_2 - 0,01$ мас.%. Породы имеют относительно среднее суммарное содержание щелочей - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 7,11$ мас.% при значении $\text{CaO} - 1,36$ мас. %. Содержание глинозема ниже, чем в субщелочных гранитах ($A/\text{CNK} = 1,12 \text{ mol}$), что соответствует высокоглиноземистым породам. Гранатовые граниты соответствуют умереннокалиевым гранитоидам. На классификационных диаграммах [Pecerillo and Taylor, 1976, Frost et al., 2001; Шкодзинский, 1992] состав гранатового гранита попадает в поля железистых умеренно- и высокоглиноземистых известково-щелочных гранитоидов.

Состав граната отвечает альмандин-спессартиновому гранату, содержащему 9.7-11.8 мас.% спессартина. Альмандиновый гранат характерен для поздней, завершающей фазы гранитообразования. Неравномерное (групповое) распределение граната в породе, скорее всего, отражает теневую структуру, т.е. существование на этом участке высокоглиноземистого ксенолита, преобразованного в гранитном веществе. Петрографическое изучение породы подтверждает отсутствие наложенных метасоматических процессов.

Турмалиносодержащие граниты биробиджанского комплекса состоят из микроклина 30%, альбита ($\text{An} 0$) 15-20%, турмалина 20-25%, кварца 25-30%, мусковита 1-3 %. Акцессорные минералы – апатит, монацит. Для турмалиносодержащих гранитов, относительно калиевых субщелочных гранитов, характерно более высокое содержание SiO_2 76,1 мас.%, при слабом преобладании K_2O над Na_2O ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} = 1,10$) и более высокое содержание фемических компонентов: $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO} = 4,73$ мас.%; $\text{TiO}_2 - 0,28$ мас.%. Породы имеют более низкое суммарное содержание щелочей - $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} = 2,21$ мас.% при значении $\text{CaO} - 0,40$ мас. %. (табл. 1). Содержание глинозема выше, чем в субщелочных гранитах ($A/\text{CNK} = 3,59 \text{ mol}$), что соответствует крайне высокоглиноземистым породам.

В отличие от калиевых субщелочных гранитов, турмалиносодержащие граниты соответствуют низкокалиевым гранитоидам (порода попадает в поле толеитовой

серии). На классификационных диаграммах [Peccerillo and Taylor, 1976, Frost et al., 2001; Шкодзинский, 1992] состав турмалинсодержащего гранита попадает в поля магнезиальных крайневысокоглиноземистых известковистых гранитоидов. Плагиоклаз представлен альбитом, что закономерно при недостатке в составе породы кальция ($\text{CaO} < 0,45\%$). Низкое содержание щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 2,21$ мас.%), а также отсутствие признаков наложенных процессов (грейзенизации) указывает на то, что осуществлялся очень сильный вынос катионов Ca, Na, K (кислотный вынос) еще на позднемагматической стадии. Образование большого количества турмалина могло происходить за счет гранитизации первичных глиноземистых субстратов.

Альбитизированный гранит тырмо-буреинского комплекса состоит из кварца 20-25%, микроклина 20-25%, альбитизированного плагиоклаза (An 4-13) 25-35%, граната 5-10%, мусковита 5-10%, цоизита 3-5%, хлорита 3-5%. Среди акцессорных минералов присутствуют апатит, монацит, циркон и ортит. Для альбитизированных гранитов характерно низкое содержание $\text{SiO}_2 = 66,5$ мас.%, самое высокое содержание $\text{Al}_2\text{O}_3 = 20,1$ мас.% (табл. 1), при преобладании Na_2O над K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 12,1$) и относительно невысокое содержание феррических компонентов: $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO} = 0,82$ мас.%; $\text{TiO}_2 = 0,01$ мас.%. Породы имеют суммарное содержание щелочей ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) равное 7,7 мас.% при высоком значении $\text{CaO} = 3,31$ мас.%. Содержание глинозема (A/CNK) > 1 , что соответствует высокоглиноземистым породам. Содержание K_2O в альбитизированных гранитах 0,59 мас.%, что соответствует низкокалиевым гранитоидам (порода попадает в поле толеитовой серии). На классификационных диаграммах [Peccerillo and Taylor, 1976, Frost et al., 2001; Шкодзинский, 1992] состав альбитизированного гранита попадает в поля магнезиальных высокоглиноземистых щелочно-известковых гранитоидов. На классификационной диаграмме « SiO_2 – сумма щелочей», гранит попадает в поле гранодиоритов, однако химический и петрографический состав (наличие вторичного альбита с цоизитом) указывает на наличие наложенного процесса (альбитизации), приведшего к выносу кремнезема.

На дискриминантных геохимических диаграммах Пирса [Pearce et al., 1984], почти все исследуемые граниты попадают в поля VAG — островодужных и VAG+syn-COLG — островодужных+коллизийных. Только гранатовые граниты попадают в поле WPG — внутриплитных и ORG — океанских хребтов. На диаграмме « $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{CaO} - \text{Zr-Nb-Ce-Y}$ » [Whalen, et al., 1987], составы калиевых убщелочных и гранатовых гранитов ложатся в поле гранитов А-типа, кроме одного образца, который попал в область фракционированных гранитов, а турмалинсодержащие граниты и альбитизированные граниты располагаются в поле орогенных гранитов.

Согласно диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - \text{Fe}_2\text{O}_3 \times 5 - (\text{CaO} + \text{MgO}) \times 5$, [Гребенников, 2014], разделяющей гранитоиды на (I+S) и A1, A2 типы. Почти все составы гранитов попадают на границу поля I&S типа с полем A2-типа, возникшего в результате дифференциации щелочно-базальтовых магм, обусловленных значительным контаминирующим взаимодействием мантийных расплавов с кислым материалом континентальной коры. Турмалинсодержащий гранит и альбитизированный гранит лежат в поле I&S типа.

Судя по геохимическим данным ($A/\text{CNK} > 1,1$ mol.%), можно предположить, что обогащение гранитов биробиджанского комплекса алюминием произошло при захвате ксенолитов высокоглиноземистых сланцев хинганской серии и гнейсов

амурской серии. Высокоглиноземистые ассоциации (гранат + турмалин + мусковит) могут быть связаны с кислотным (фтор-хлористым) характером флюидных систем, которые сопровождали образование гранитов. Источником хлора, на наш взгляд, являются глубинные мафические расплавы, которые привели к гранитообразованию.

ГЛАВА 4. Корунды месторождения Сутара

В ходе полевых работ в пределах Сутарской площади в делювиальных и аллювиальных отложениях атором отобраны образцы марундитов, а также кристаллы корундов и их обломки. Коренных проявлений марундитов и корундовых плагиоклазитов не обнаружено. В результате проведенных исследований установлено, что на исследуемой территории расположено несколько точек корундовой минерализации в виде марундитов и корундов из россыпи (рис. 2).

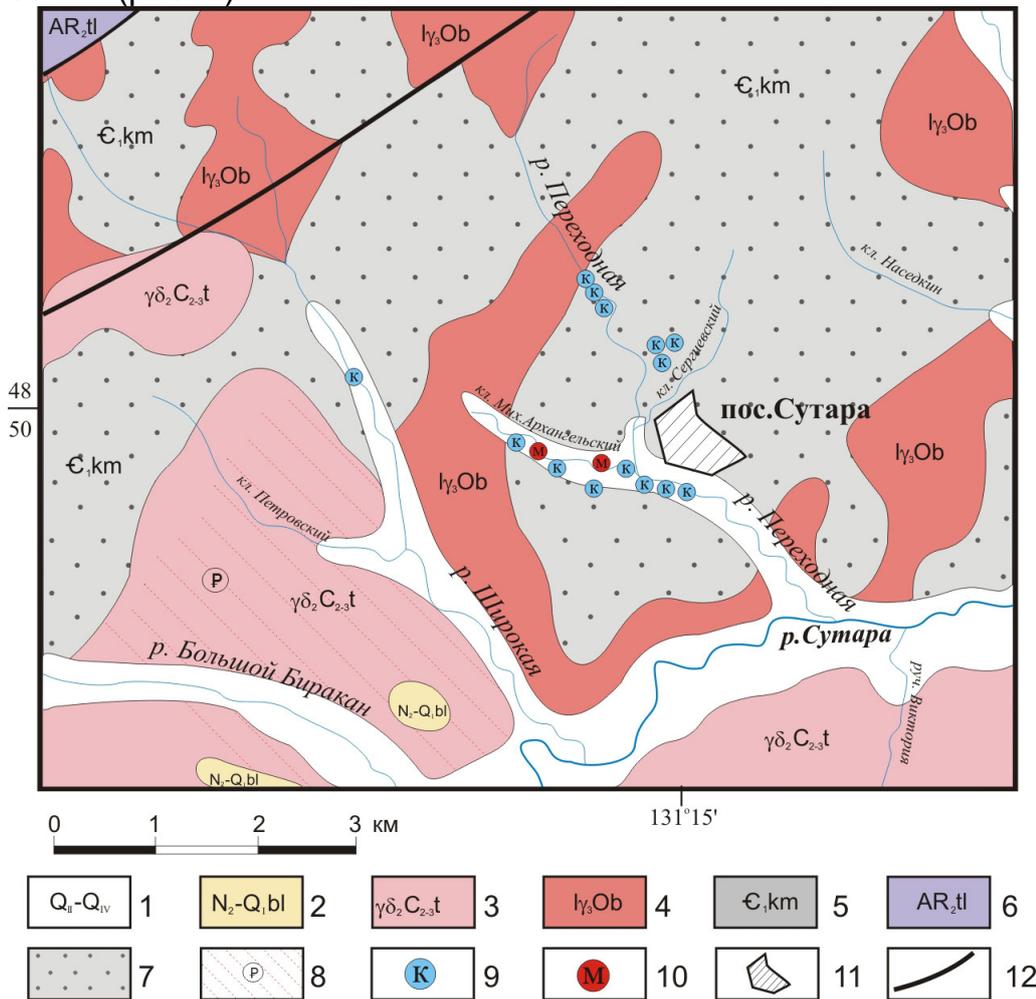


Рис. 2 Геологическая карта района исследований на основе Государственной геологической карты с изменениями и дополнениями [по А.Ф. Васькин, 1999 г., М.Г. Золотов, 1959]

1 - неоплейстоценовые аллювиальные пески, галечники, глины; 2 - плиоцен-неоплейстоценовые пески, глины; 3 - средне-позднекарбоновые гранодиориты, граниты; 4 - ордовикские лейкограниты двуслюдяные турмалинсодержащие; 5 - раннекембрийские алевролиты, глинистые сланцы, часто углеродистые, известняки; 6 - позднеархейские плагиогнейсы, гнейсы двуслюдяные и биотитовые; 7 - контактовые роговики; 8 - кора выветривания; 9 - корунд в шлихах, аллювии и делювии; 10 - находки марундитов; 11 - поселок Сутара, 12 - тектонические нарушения.

В результате микротермометрических опытов и Раман-спектроскопии установлено, что первичные флюидные включения в корундах из марундитов состоят из смеси углекислоты, метана, и дочерней фазы диаспора, в отличие от известных месторождений Вьетнама и Шри Ланки, где в корундах флюид первичных включений представлен почти чистой углекислотой [Giuliani et al., 2003; Maesschalck et al, 1989]. Температура плавления кристаллов метана -117.7°C , температура плавления последнего кристалла CO_2 -57.5°C . Мольное отношение углекислоты и метана составляет 0.99 и 0.01 соответственно. Волновое число линии для CO_2 составляет 1284cm^{-1} и 1387cm^{-1} , для CH_4 - 2911cm^{-1} . Плотность углекислоты – $0.1\text{-}0.2\text{ г/см}^3$.

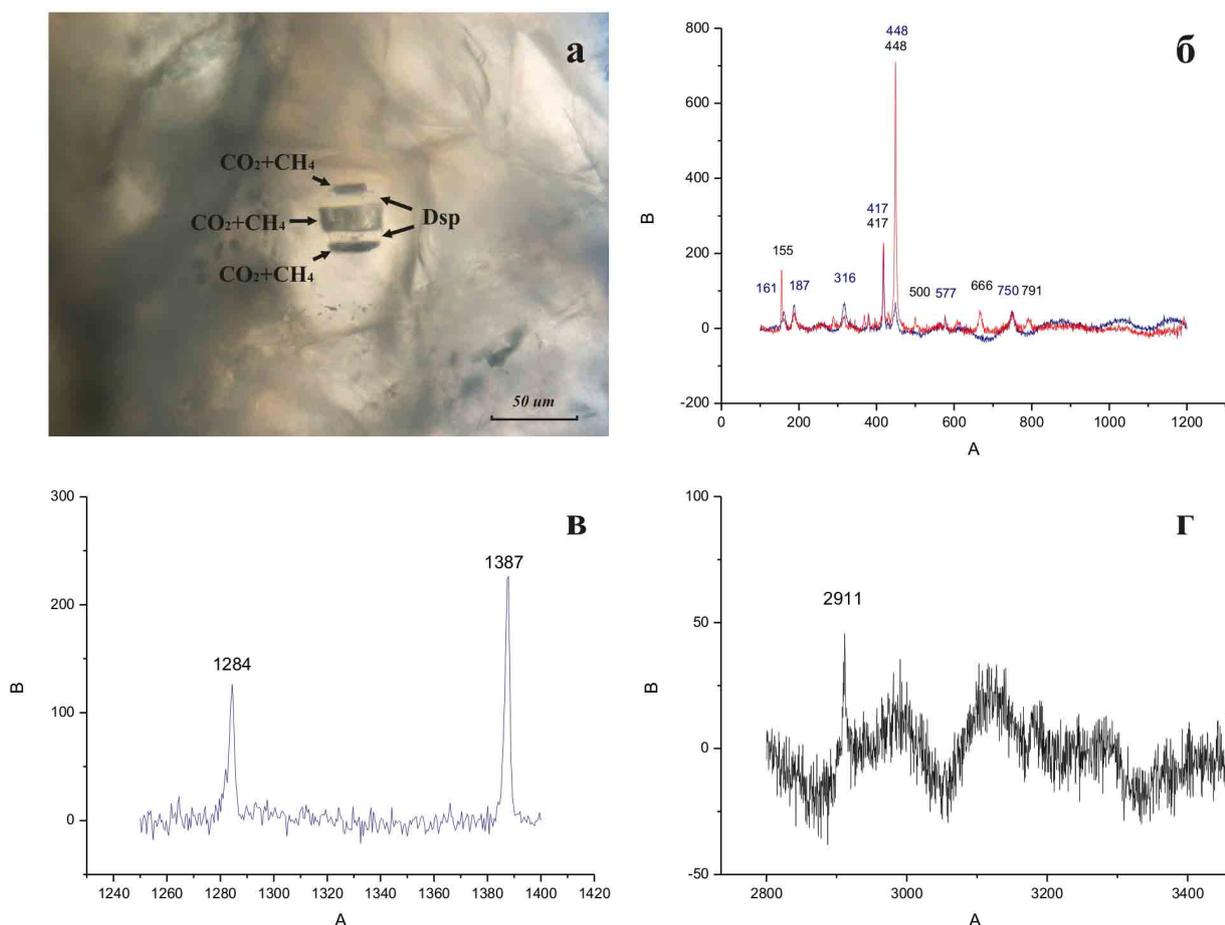


Рис. 3 Состав первичного флюидного включения в корунде из марундита. а – первичное включение. Dsp - диаспор, CO_2+CH_4 - смесь углекислоты и метана; б – диаспор; в – углекислота; г – метан.

Волновое число линии для CO_2 смещено в низкочастотную область, так, как это бывает у CO_2 , находящейся под высоким давлением. Но данные по криометрии опровергли это предположение. Смещение волнового числа линии в данном случае может говорить о том, что в углекислоте растворены некие компоненты, за счет которых происходит смещение. Диаспор присутствует во вторичной минерализации и в виде дочернего минерала первичных включений, однако отсутствует в первичной минерализации. Это говорит о том, что когда включение было захвачено, оно содержало глинозем и небольшое количество воды, в результате чего образовался диаспор. Вода присутствует в виде тонкой пленки на стенках включений. Анализ корундов методом газовой хромато-масс-

спектрометрии подтвердил очень низкое содержание воды в образцах. Почти вся вода в первичных включениях входит в состав диаспора. Так как весь диаспор находится в углекислотной среде, то для того, чтобы вернуть систему в исходное состояние, нужно провести термическую диссоциацию раствора при очень высоких температурах.

При изучении первичных включений подразумевается, что включения после захвата не меняют своих химических и физических свойств, поскольку это закрытая система и минерал-хозяин герметизирует эту порцию флюида. При этом фазовые преобразования, которые прошли во включении, являются обратимыми. Но существуют еще и перитектические взаимоотношения, при которых реакция необратима. Поскольку вода в диаспоре не кристаллогидратная, которую можно удалить, а конституционная (завязанная в структуру), то при нагревании первичных включений до высоких температур происходит не растворение диаспора, а разрушение включения. Таким образом, гомогенизация включений (обратная реакция) невозможна. Это говорит о том, что флюид был маловодный.

4.2. Корунды из россыпи

Корунд в аллювиальных и делювиальных отложениях встречается в форме дипирамидальных и ромбоэдрических кристаллов размером до 3 см и их обломков фиолетово-синего, серовато-синего, синего, пурпурного, голубовато-белого, темно-серого цвета, с характерной зональной и пятнистой окраской [Buravleva et al, 2016]. Кристаллы корундов имеют коротко-призматические и иногда гексагональные таблитчатые формы, представляющие собой комбинацию гексагональной призмы $a \{11\bar{2}0\}$ и базального пинакоида $c \{0001\}$. Большинство образцов дипирамидальных кристаллов имеют грани u и v . Мы наблюдали грань c в сочетании с гранями r и s . В коротко-призматических кристаллах, базальный пинакоид c и гексагональная призма a доминируют, с небольшими r и s гранями. Почти все корунды характеризуются полисинтетическим двойникованием, наблюдаемым под микроскопом. В корундах из россыпи минеральные включения представлены рутилом, монацитом, цирконом, ксенотимом, биотитом, мусковитом, маргаритом, хлоритом, плагиоклазом, ильменитом, пиритом и шпинелью.

Как и в случае с корундами из марундитов, корунды из россыпи содержат первичные флюидные включения, состоящие из смеси углекислоты, метана и дочерней кристаллической фазы диаспора. Температура плавления кристаллов метана -116.9°C , температура плавления последнего кристалла CO_2 -57°C .

Мольное отношение углекислоты и метана составляет 0.99 и 0.01 соответственно. Волновое число линии для CO_2 составляет 1284cm^{-1} и 1387cm^{-1} , для CH_4 - 2914cm^{-1} . Плотность углекислоты – $0.1\text{-}0.2\text{ г/см}^3$. Аналитическими методами вода не обнаружена, но она может присутствовать в виде тонкой пленки на стенках включений. Диаспор присутствует в качестве дочерних фаз, но не встречается в качестве минеральных включений в корунде, что указывает на относительную маловодность флюида. Анализ россыпных корундов и корундов из марундитов методом газовой хромато-масс-спектрометрии, выполненный в Институте геологии и минералогии СО РАН, также подтвердил очень низкое содержание воды в образцах. На основании изучения минеральных и первичных флюидных включений в корундах из россыпи можно сделать вывод о том, что в образовании корундов участвовал существенно углекислотный, относительно маловодный флюид.

Исследование элементного состава корундов из россыпи также подтверждает не магматическую природу корундов. На основании результатов ИСП-МС анализа построена диаграмма распределения элементов $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$, wt % (рис. 4), разделяющая корунды на магматические и метаморфические, на которой аллювиальные корунды Сутары образуют область в поле метаморфического происхождения. На тройной Fe-Mg-Ti диаграмме, разделяющей корунды по содержанию микроэлементов на магматические и метаморфические, корунды из россыпи месторождения Сутара образуют область в поле метаморфического происхождения (рис. 5). Концентрация Mg, Ti и Fe в Сутарских синих аллювиальных корундах указывает на не магматическое происхождение. Высокие содержания Mg обнаружены только в метаморфических (метасоматических) сапфирах. Высокое содержание магния в них зависит от высокого содержания магния в карбонатных породах.

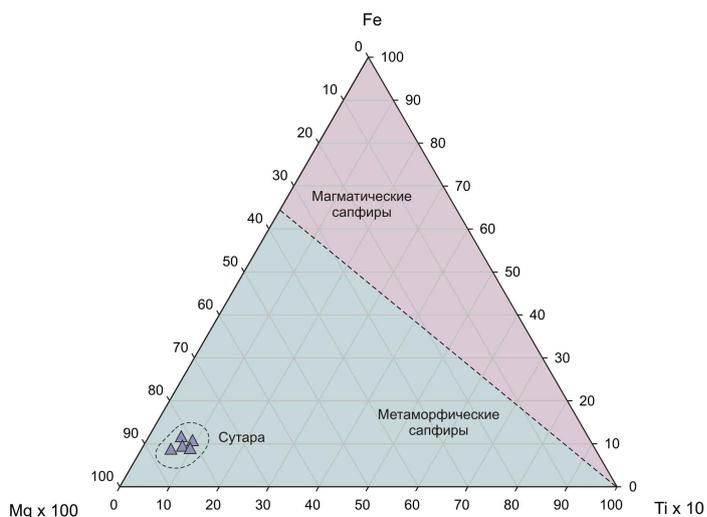
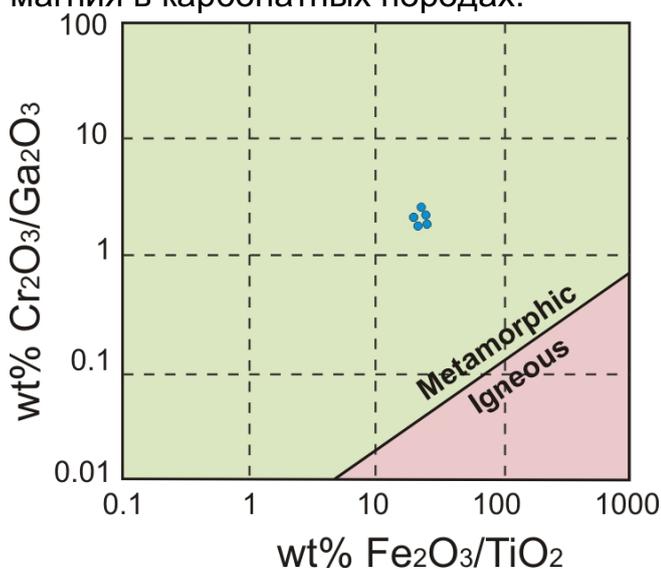


Рис. 4. Распределение соотношений элементов-примесей и РЗЭ в корундах по [Kitawaki Hiroshi., 2004]

Рис. 5. Распределение Mg, Fe, Ti (в г/т) в корундах по [Peucat et al., 2007].

Таким образом, в результате изучения корундов из марундитов и россыпи установлено, что они, вероятно, имеют однотипный метасоматический генезис. Внедрение высокоглиноземистых лейкогранитов в карбонатные породы привело к формированию флюида, состоящего из смеси углекислоты, метана, воды и щелочноземельных элементов, что создало геохимически благоприятную среду для десиликации алюмосиликатных пород и формированию метасоматических зон с корундовой минерализацией.

ГЛАВА 5. Количественная физико-химическая модель образования марундитов, корундовых плагиоклазитов и мономинеральных корундов

5.1 Программный комплекс «Селектор»

Марундиты на месторождении Сутара образуют линзовидные тела, приуроченные обычно к контактовой части жилы алюмосиликатных пород с карбонатными породами [Pakhomova et al, 2009, Буравлева С.Ю. 2009, 2013, 2014]. Поэтому можно считать, что причиной кристаллизации корунда является десиликация алюмосиликатных пород, возникающая вследствие диффузионного

биметасоматоза, происходящего на контакте алюмосиликатных и карбонатных пород в результате циркуляции вдоль контакта горячих постмагматических растворов. Теория биметасоматоза хорошо разработана Д.С. Коржинским и его последователями, которые показали, что суть процесса биметасоматоза сводится к диффузии определенных компонентов из алюмосиликатных пород в карбонатные породы и в обратном направлении. Причиной диффузии является разность потенциалов породообразующих компонентов в реагирующих породах. Но наряду с имеющейся теорией биметасоматоза, его количественная сторона, до сих пор, изучена совершенно недостаточно, что послужило для нас поводом создания физико-химической модели образования корундосодержащих пород, способной обосновать температуру и условия химизма среды (флюидов и пород), благоприятных для кристаллизации корунда.

Программный комплекс (ПК) «Селектор», создан в ИГХ СО РАН (г. Иркутск) под руководством проф. И.К. Карпова. Работа комплекса основана на принципе минимизации термодинамических потенциалов, и он представляет пример мощного многоцелевого компьютерного инструмента для физико-химического моделирования минеральных ассоциаций, флюидов, газов и растворов в широком диапазоне P-T условий. В отличие от подобных зарубежных программ, в ПК «Селектор», на основе двойственного решения, реализован численный способ нахождения химических потенциалов компонентов модельных систем, что играет большую роль в количественной оценке окислительного потенциала, кислотности-щелочности (также как глиноземистости, железистости, кремнеземистости и т.д.) растворов, минералов и горных пород.

5.2 Структура модели

Модель образования марундитов, корундовых плагиоклазитов и корундов месторождения Сутара — это первый опыт построения количественной модели, описывающей явление биметасоматоза. Модель представляет собой два резервуара, в один из которых помещается химический состав алюмосиликатной породы, а в другой карбонатной. Мы использовали химические составы гранитов и доломитового мрамора, отобранных нами в районе месторождения Сутара. Суть модели состоит в том, что определенная порция хлоридного флюида направляется вначале в алюмосиликатную породу, где раствор приходит в химическое равновесие с данной породой. Затем флюид переходит в карбонатную породу и после реакции с ней, направляется вновь в алюмосиликатную породу. Один круговорот (шаг) флюида обозначается словом Time. Таким образом, шаг за шагом флюид, приходя в химическое равновесие с контактирующими породами, способен переносить растворимые компоненты породы в противоположных направлениях, создавая при этом метасоматическую зональность. Расчеты показали, что в зависимости от величины Time по альбитизированному граниту формируется ряд метасоматических зон - андалузит-кварцевая зона с плагиоклазом и небольшим количеством кордиерита; корунд-маргаритовая зона с небольшим количеством гроссуляра и флогопита; корунд-гроссуляровая зона с флогопитом (табл. 2).

Таблица 2

Минеральный состав (вес.%) реагирующего с мрамором альбитизированного гранита в зависимости от величины Time.

Зона	Андалузит-кварцевая		Корунд-маргаритовая		Корунд-гроссуляровая								
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	50	80	90	
T=550°C													
Pl	32(An ₅₈)	56(An ₅₈)	15(An ₄₇)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Qz	43	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mrg	-	-	62	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grs	-	-	1	12	40	45	48	50	51	52	60	63	
Crn	-	-	15	22	48	46	43	41	39	36	29	28	
Amp	-	-	-	-	5	-	-	-	-	6	-	-	
Crd	4	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
And	21	33	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bt	-	-	5	6	7	9	9	9	9	5	10	-	
Chl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
pH	5.2	5.2	7.5	7.7	7.7	7.5	7.4	7.3	7.2	7	6.7	6.9	

Примечание: Pl – плагиоклаз, Qz – кварц, Mrg – маргарит, Grs – гроссуляр, Crn – корунд, Amp – амфибол, Crd – кордиерит, And – андалузит, Bt – биотит, Chl – хлорит.

5.3 Двойственное решение

Количественная модель биметасоматоза наглядно показывает выравнивание величин химических потенциалов определенных компонентов. В программном комплексе «Селектор» вычисление величин химических потенциалов осуществляется на основе так называемого принципа двойственности, который позволяет пересчитать потенциалы зависимых компонентов на потенциалы независимых компонентов. Исходя из рассчитанных потенциалов независимых компонентов, мы можем количественно вычислить потенциал любого компонента или соединения, а также оценить щелочность, кремнеземистость или глиноземистость модельной системы. Этот способ оценки химизма среды представляет собой новый мощный подход к оценке химизма среды сложных минеральных ассоциаций, флюида или раствора.

5.4 О выравнивании химических потенциалов компонентов в зоне биметасоматоза.

Количественная модель биметасоматоза наглядно показывает выравнивание величин химических потенциалов SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, K₂O, Na₂O, H₂O, CO₂, с ходом возрастания величины Time, которое происходит под действием послемагматических растворов на контакте алюмосиликатных и карбонатных пород (табл. 3). SiO₂ двигается из гранита в мрамор, а CaO, MgO из мрамора в обратном направлении, поскольку движение компонента возможно только в сторону падения величины химического потенциала. По степени скорости приближения разности потенциалов к нулю ряд подвижности компонентов, исходя из нашей модели, выглядит таким образом: H₂O, CO₂, SiO₂, K₂O, Na₂O, CaO, MgO,

Выравнивание величин химических потенциалов H₂O, CO₂, SiO₂, K₂O, Na₂O, CaO, MgO, Al₂O₃.

Таблица 3

Потенциал компонента	μH ₂ O			μCO ₂			μSiO ₂			μK ₂ O		
	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ
Time												
1	-67827	-67840	13	119832	116252	3580	-211390	-223605	12215	-207869	-198821	9048
8	-67857	-67852	5	115280	115247	33	-211406	-218331	6925	-207203	-200154	7049
15	-67858	-67853	5	115107	115103	4	-214462	-215743	1281	-193622	-192827	795
40	-67858	-67853	5	115074	115074	0	-215743	-216085	342	-193908	-193286	622
80	-67858	-67853	5	115036	115036	0	-215817	-215654	163	-195338	-194780	558
90	-67858	-67854	4	115037	115038	1	-215817	-215802	15	-195904	-195450	454
100	-67857	-67857	0	115036	115037	1	-215816	-215804	12	-196585	-196141	444

Потенциал компонента	μNa ₂ O			μCaO			μMgO			μAl ₂ O ₃		
	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ	BC-184	мрамор	Δμ
Time												
1	-185433	-176359	9074	-178661	-167984	10677	-151057	-141916	9141	-388899	-401435	12536
8	-184767	-177712	7055	-178126	-168988	9138	-150953	-142717	8236	-389073	-403672	14599
15	-169956	-169161	795	-173310	-169130	4180	-150021	-147782	2239	-388416	-392919	4503
40	-172042	-171424	618	-170750	-169161	1589	-148965	-147057	1908	-388416	-391820	3404
80	-173556	-172998	558	-170598	-169913	685	-148926	-147181	1745	-388416	-390864	2448
90	-174150	-173696	454	-170599	-169819	780	-148927	-146983	1944	-388416	-390712	2296
100	-174857	-174413	444	-170598	-169867	731	-148926	-146930	1996	-388415	-390561	2146

Al₂O₃. Этот ряд подвижности оказывается довольно близким ряду подвижности компонентов при метасоматозе, полученным Д.С. Коржинским. Наша модель оказалась способной описать диффузионное перемещение компонентов.

5.5 Особенности минералогического состава взаимодействующих пород

В результате расчета взаимодействия альбитизированного гранита с доломитовым мрамором при температурах входящего флюида в 500-600°C в модели наблюдается метасоматическая зональность. Число сосуществующих минералов в зонах изменяется от четырех до двух, не считая апатита и рутила (табл.4). Содержание корунда достигает 48 вес.%. Образуются парагенезисы корунда с маргаритом, хлоритом и гроссуляром. Характерно, что в корундовых плагиоклазах образуется основной плагиоклаз, близкий по составу к анортиту. Такие особенности минералогического состава метасоматических зон близки природным корундовым плагиоклазам. Корунд появляется в минеральных ассоциациях только после полного исчезновения кварца. Наиболее оптимальный диапазон температур образования корунда при метасоматозе с участием послемагматического флюида определяется интервалом 500-600°C (табл.4, 5). Корунд появляется в минеральных ассоциациях при величине рН флюида от 5.1 до 9.

Таблица 4

Пример расчета взаимодействия альбитизированного гранита с доломитовым мрамором.

T°C	500				550				600			
	6	20	42	80	5	20	40	80	10	30	50	80
Pg	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pl	-	-	-	-	56 (An ₅₆)	-	-	-	54 (An ₉₀)	-	-	-
Qz	21	-	-	-	4	-	-	-	-	-	-	-
Chl	2	-	5	7	-	-	-	-	-	-	-	-
Mrg	49	82	73	17	-	-	-	-	-	-	-	-
Grs	-	3	13	47	-	40	51	60	4	49	53	60
Crn	-	9	9	29	-	48	39	29	35	41	35	30
Amp	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	9	-
Crd	-	-	-	-	7	-	-	-	-	-	-	-
And	-	-	-	-	33	-	-	-	-	-	-	-
Bt	-	6	-	-	-	7	9	10	6	9	3	10
pH	5.2	7.2	7.0	6.8	5.3	7.7	7.2	6.7	8	7.5	7.2	6.9
lgf _{HCl}	-2.2	-4.3	-4.1	-3.9	-1.8	-4.2	-3.7	-3.2	-4	-3.5	-3.2	-2.9

Примечание: Pg - парагонит, Pl - плагиоклаз, Qz - кварц, Chl - хлорит, Mrg - маргарит, Grs - гроссуляр, Crn - корунд, Amp - амфибол, Crd - кордиерит, And - андалузит, Bt - биотит.

Таблица 5.

Пример расчета взаимодействия гранатового гранита с доломитовым мрамором.

T°C	500				550				600			
Time	5	20	50	80	5	30	50	80	5	30	60	80
Pg	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pl	-	-	12(An ₈₈)	49(An ₉₆)	17(An ₈₁)	-	8(An ₈₄)	44(An ₉₇)	24(An ₈₅)	60(An ₈₇)	74(An ₉₄)	29(An ₉₅)
Qz	52	-	-	-	42	-	-	-	-	-	-	-
Mrg	19	60	78	49	-	75	86	56	26	-	-	69
Grs	-	-	2	2	1	-	-	-	1	3	2	2
Crn	-	-	-	-	-	-	-	-	-	36	23	-
Crd	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
And	18	19	-	-	35	12	-	-	48	-	-	-
Ms	11	21	8	-	5	12	5	-	-	-	-	-
pH	5	5	5.3	5.6	5.2	5.4	5.5	5.5	5.2	5.5	5.6	5.8
Ig _{fHCl}	-2.1	-2.1	-2.3	-2.6	-1.7	-	-2	-1.9	-1.2	-1.4	-1.6	-1.7
						1.9						

Примечание: Индексы минералов даются в таблице 4

5.6 Основные факторы, контролирующие образование корунда в десилицированных породах

Как показали проведенные модельные расчеты, главные факторы, контролирующие образование корунда вследствие диффузионного биметасоматоза на контакте алюмосиликатных и карбонатных пород – это температура, величина кислотности-щелочности воздействующего флюида и величина глиноземистости пород.

Моделирование, проведенное автором, хорошо подтверждает возможность образования корунда в широком диапазоне температур, поскольку парагенезисы с корундом возникают в нашей модели в интервале температур от 450° до 850°C. Наиболее оптимальный диапазон температур образования корунда при метасоматозе с участием послемагматического флюида определяется интервалом 500-600°C

Увеличение щелочности входящего флюида достигалось добавлением небольшого количества щелочей в исходный флюид. При величине pH флюида равной 4.3 – 5.1 корунд в минеральных ассоциациях отсутствует, но он появляется в подщелоченных флюидах с величиной pH выше 5.1. Корунд образуется, главным образом, во флюидах с щелочностью, величина pH которых отвечает интервалу 5-10 при температурах 500-850°C.

Корунд – оксид глинозема, поэтому величина потенциала глинозема породы несомненно должна иметь большое значение в условиях образования корунда. В пегматите нам не удалось получить корунды при изменении щелочности и температуры, поскольку эта порода имеет изначально низкий потенциал глинозема сравнительно с другими породами. Пользуясь методологией двойственного решения, мы рассчитали и сравнили величину потенциала Al_2O_3 ($\mu_{Al_2O_3}$) при данном составе флюида и P-T условиях в разных породах (табл.6).

Таблица 6

Величина потенциала компонента Al_2O_3 (кал/моль) при температуре 500°C.

Порода	Пегматит	Субщелочной гранит	Гранатовый гранит	Высокоглиноземистый гранит	Альбитизир. гранит
№ обр.	БС-170	БС-267	БС-284/2	БС-269	БС-184
$\mu_{Al_2O_3}$	-391250	-391136	-391088	-390504	-389635

Как видно из таблицы 6, пегматит действительно имеет наиболее низкий потенциал глинозема (наиболее высокую оценку потенциала глинозема по абсолютной величине), что осложняет образование корунда при его взаимодействии с мрамором.

5.7 Об образовании высоких содержаний корундов

Максимально высокое содержание корунда в нашей модели достигало 48 вес. %. Появление высоких содержаний корунда можно объяснить, допуская наложение инфильтрационных процессов на уже образовавшиеся марундиты или корундовые плагиоклазиты. С течением времени движущая сила встречной диффузии компонентов должна неизбежно уменьшаться по мере выравнивания разности химических потенциалов между реагирующими породами. Это может привести к сквозному просачиванию флюида через сформированные метасоматиты, что приведет к выносу породообразующих компонентов из метасоматитов во флюид, обогащению их глиноземом и увеличению валового содержания корунда. Определяющую роль в таком механизме обогащения играет величина отношения масса флюида/масса породы - $W/R = M_{\text{fluid}}/M_{\text{rock}}$, описывающая последовательное прохождение флюида через породу. Мы построили модель инфильтрации флюида через уже сформированные марундиты (табл.7). Все входные термодинамические данные по компонентам флюида, газам и твердым фазам были взяты такими же, как и в вышеописанной модели диффузионного биметасоматоза. Первичная порода, через которую проходил направленный поток флюида, состояла из корунда, граната, маргарита и биотита.

Минеральный состав марундита.

Табл. 7

T=500°C							
P=2500 бар							
W/R (гр.)	0.15	7.3	30	79	171	302	840
Bt	5.6	1.2	-	-	-	-	-
Grt	1.6	1.4	-	-	-	-	-
Amp	-	4.6	6	6	6	7	4
Zo	4.8	-	-	-	-	-	-
Mrg	78	82	82	76	65	50	-
Crn	10	10.3	12	18	28	43	96
pH	7.1	6.2	5.8	5.6	5.5	5.5	5.3

Примечание: Bt – биотит, Grt –гранат, Amp – амфибол, Zo – цоизит, Mrg – маргарит, Crn – корунд.

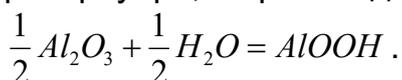
Последовательное возрастание отношения W/R привело к исчезновению из парагенезиса биотита, граната и маргарита и увеличению содержания корунда почти до 100%. Таким образом, инфильтрационная модель, наложенная на модель диффузионного биметасоматоза, объясняет образование высоких содержаний корунда.

5.8 Условия образования диаспора в первичных включениях по данным физико-химического моделирования

Диаспор в качестве дочерней фазы первичных флюидных включений известен на многих месторождениях и проявлениях корунда [Schmetzer & Medenbach, 1988; Maesschalck & Oen, 1989; Giuliani et al., 2003]. На основе экспериментальных и расчетных данных построены РТ-диаграммы системы диаспор-корунд-вода (AlO(OH)-Al₂O₃-H₂O) [Haas, 1972; Perkins et al., 1979], позволяющие установить параметры кристаллизации твердых фаз. Однако, результаты этих экспериментов невозможно экстраполировать на природные обстановки, поскольку природные флюиды обогащены углекислотой, метаном и другими компонентами, что вызывает смещение равновесия диаспор-корунд в низкотемпературную область. На примере диаспора, впервые обнаруженного нами в первичных включениях корундов месторождения Сутара [Buravleva et al., 2016] определены вероятные условия образования диаспора во включениях на основе физико-химического моделирования системы AlO(OH)-Al₂O₃-H₂O-CO₂-CH₄.

Для выяснения термодинамических характеристик процесса образования диаспора в первичных включениях корунда были построены две модели. При моделировании газового флюида применялась идеальная смесь реальных газов. Согласно принятой модели рассчитывается фугитивность реальных газов, но взаимодействие газов между собой не учитывается. Эта модель газового флюида вполне рациональна в области не слишком высоких давлений и она обычна в петрологических и экспериментальных работах [Чудненко, 2010].

Первая задача. Система диаспор-корунд-вода. Модель состояла из двух резервуаров. В первый резервуар помещается вода, которая в процессе моделирования переходила во второй резервуар, где находился Al₂O₃. Во втором резервуаре, при заданных температуре и давлении, проходила реакция:



Положение линий равновесия диаспор-корунд по расчетным данным показано пунктирными линиями (рис. 6), причем сопоставление расчетных температур с экспериментальными по [Haas, 1972] (сплошная красная линия) при заданном давлении показывает хорошую сходимость (рис. 6, табл. 8). Расчеты также показывают (табл. 8), что комплексы алюминия присутствуют в водном растворе в исчезающе малых количествах. Таким образом, в области давлений 1000 -7500 бар в чистом водном флюиде реакция диаспор-корунд проходит при температурах 370-460°C.

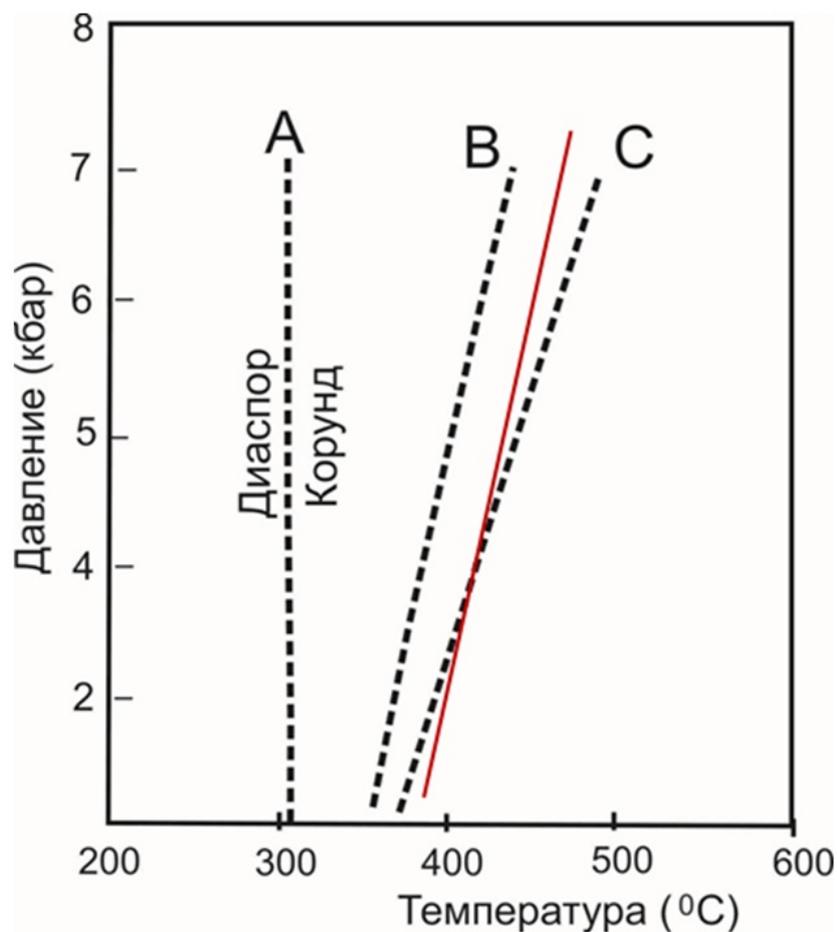


Рис. 6. Т-Р диаграмма равновесия диаспор-корунд. Пунктирные линии А, В, С - расчетные данные в газовой смеси. Сплошная красная линия - экспериментальные данные в системе $AlO[OH]-Al_2O_3-H_2O$. А – существенно углекислый флюид, В – углекисло-водный флюид, С- существенно водный флюид.

Сопоставление температур равновесия диаспор/корунд Табл. 8

Р, бар	T ^{°C} , расчет	T ^{°C} , эксп	Al(OH)+2	AlO+	Al+3	AlO ₂ -	рН
		[Haas, 1972].					
1	2	3	4	5	6	7	8
7500	460	460	$8 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-5}$	4.2
2400	395	405	$5 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-18}$	$10 \cdot 10^{-6}$	4.8
1000	370	375	$9 \cdot 10^{-14}$	$1 \cdot 10^{-10}$	---	$5 \cdot 10^{-6}$	5.1

Примечание: Сопоставление расчетных температур равновесия диаспор/корунд с экспериментальными по [Haas, 1972] в чистом водном флюиде при заданном давлении (графы 2, 3), расчетные молярности некоторых компонентов и величина рН. Во всех опытах в равновесии присутствуют следы графита.

Вторая задача. Система $AlO[OH]-Al_2O_3-H_2O-CO_2-CH_4$. Эта модель, также как и первая, состояла из двух резервуаров. В первый резервуар помещались CO_2 , H_2O и небольшое количество углерода. Эта смесь переходила во второй резервуар, где находился Al_2O_3 . Небольшое количество углерода подбиралось таким, чтобы во втором резервуаре образовалась углекислотно - метановая газовая смесь в

мольном соотношении, близком к полученным нами при исследовании включений. Использовались три варианта состава газовой смеси. В варианте «А» отношение H_2O/CO_2 (по количеству молей) было равно 1/30; в составе «В» – 30/10, и в варианте «С» – 30/1. Таким образом, в варианте «А» задача решалась с существенно углекислотным флюидом, в варианте «В» – с углекисотно-водным и в варианте «С» – с существенно водным газовым флюидом (рис. 6). В существенно углекислом флюиде температура перехода корунд – диаспор практически не зависит от давления и составляет примерно 305°C (линия А). С увеличением концентрации воды во флюиде температура реакции корунд – диаспор возрастает и появляется зависимость от давления (линии В, С).

Очевидно, что кристаллы корунда на изучаемом месторождении при своем росте захватывали флюид, который сохранялся в образовавшихся включениях. В процессе постепенного снижения температуры, в закрытых включениях создавались условия для реакции захваченного флюида с внутренней поверхностью кристалла корунда, что и привело к образованию диаспора, согласно рассчитанной реакции. При этом сами кристаллы корунда оставались устойчивыми вследствие быстрого ухода флюида из корундовых жил. Поскольку положение равновесия диаспор/корунд в варианте расчета «А» не зависит от давления, а состав модельной газовой смеси практически совпадает с составом флюида, определяемым в первичных флюидных включениях по данным Рамановской спектроскопии, то можно полагать, что изучаемые дочерние фазы диаспора образовались при температуре не выше 305°C.

На основании вышеизложенного формулируются три защищаемых положения:

1. Источником россыпного ореола корундовой минерализации месторождения Сутара являются корундсодержащие метасоматические зоны, сформированные в результате постмагматического реакционного преобразования ордовикских высокоглиноземистых гранитов биробиджанского комплекса на контакте с вмещающими раннекембрийскими карбонатными породами хинганской серии. Реакционное взаимодействие гранитов и мраморов реализовалось, судя по составу первичных включений в корундах ($CO_2 + CH_4 +$ дочерняя фаза-диаспор), при участии существенно углекислотного относительно маловодного флюида.

2. Разработана модель образования марундитов и корундовых плагиоклазитов на основе равновесно-динамического подхода, реализованного на базе программного комплекса Селектор. Установлено, что марундиты и корундовые плагиоклазиты образовались в результате десицикации алюмосиликатных пород на контакте с карбонатными породами при участии флюида, содержащего хлор. Оптимальные условия корундообразования определяются интервалом температур 500-600°C и величиной рН, равному 5-9. Образование высоких содержаний корунда, вероятно, происходило при инфильтрации хлоридного флюида в массиве уже сформированных метасоматических корундсодержащих пород.

3. Впервые обнаруженный на месторождении Сутара диаспор образовался в первичных включениях корундов в результате реакции захваченного существенно углекислого флюида с минералом-хозяином при температуре 305°C. Эта реакция при известном составе флюида и величине давления служит геотермометром.

Заключение

1. На исследуемой территории все типы гранитов являются высоко- и весьма высокоглиноземистыми. Судя по геохимическим данным можно предположить, что обогащение гранитов алюминием произошло при внедрении гранитов биробиджанского комплекса в высокоглиноземистые сланцы хинганской серии и гнейсы амурской серии. В результате последующего внедрения ордовикских высокоглиноземистых гранитов биробиджанского комплекса в раннекембрийские карбонатные породы хинганской серии образовались метасоматические зоны, благоприятные для корундообразования.

2. Установлено, что корунды из марундитов и россыпи имеют идентичные первичные включения, что свидетельствует о близких условиях образования. Внедрение высокоглиноземистых гранитов в карбонатные породы привело к формированию флюида, состоящего из смеси углекислоты, метана, воды и щелочноземельных элементов, что создало геохимически благоприятную среду для десицикации алюмосиликатных пород и формированию метасоматических зон с корундовой минерализацией. В результате были образованы корундовые плагиоклазиты.

3. Дальнейшие метасоматические процессы привели к перекристаллизации и укрупнению кристаллов корунда, о чем говорят многочисленные вторичные газожидкие углекислотные включения.

4. На ПК Селектор, на основе равновесно-динамического подхода, выполнена количественная модель, наглядно демонстрирующая образование марундитов и корундовых плагиоклазитов в процессе реакционного взаимодействия высокоглиноземистых гранитов и мраморов, при участии флюида, содержащего хлор. Образование высоких содержаний корунда вероятно происходило при инфильтрации флюида, содержащего хлор на уже сформированные метасоматические корундсодержащие породы.

5. На ПК Селектор, на основе двойственного решения, рассчитаны величины химических потенциалов ряда компонентов, доказывающие перемещение кремния из гранитов в мрамора, а кальция и магния в обратном направлении. Установлен ряд подвижности компонентов, в первом приближении соответствующий ряду подвижности Д.С. Коржинского.

6. Выявлены основные факторы, контролирующие образование корунда в процессе биметасоматоза, к которым относятся температура, величина кислотности-щелочности флюида и величина глиноземистости пород. Установлено, что оптимальные условия образования корунда составляют 500-600°C при pH флюида 5-9.

7. Диаспор образовался в закрытых первичных включениях корунда в результате реакции захваченного флюида с внутренней поверхностью кристалла корунда. Температура образования диаспора в первичных включениях корунда составляет 305°C.

8. Наличие в изучаемом районе гранитов, обогащенных щелочами и глиноземом, совместно с мраморами, могут указывать на вероятность обнаружения в данной местности корундосодержащих пород, что позволяет более целенаправленно проводить поиски корунда.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах

1. Pakhomova V.A., **Buravleva S.Yu.**, Kurnosov A.L., Zalishchak B.L., Tishkina V.B., Fedoseev D.G., Zharchenko S.Yu., Mouzhevsky D.A., Ushkova M.A. Corundums and Marundites of the Sutara Deposit (The Russian Far East) The Journal of The Gemmological Association of Hong Kong, 2009, p. 47 – 49.

2. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А., Тишкина В.Б. Корунды месторождения Сутара: условия образования, обзор минеральных парагенезисов и происхождение // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2014, Том 3, стр 12-19. (ISSN 0016-7762)

3. **Буравлева С.Ю.** Особенности минерагении корунда на примере исследования месторождения Сутара (ЕАО) // Вестник ДВО РАН. 2014, Том 2, стр 68-72. (ISSN 0869-7698)

4. **Buravleva S.Y.**, Smirnov S.Z., Pakhomova V.A., Fedoseev D.G. Sapphires from the Sutara placer in the Russian Far East // Gems & Gemology. 2016, Volume 52, No. 3, p. 252-264.

5. **Буравлева С.Ю.** Авченко О.В., Пахомова В.А. Об условиях образования диаспора в первичных флюидных включениях в корунде месторождения Сутара (ЕАО, Дальний Восток России) // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2017, №3, С. 14-19.

Основные тезисы докладов на российских и международных конференциях

1. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А., Екимова Н.И., Федосеев Д.Г. Включения в корундах и марундитах месторождения Сутара (Дальний Восток) // Asian current research on fluid inclusion (ACROFI-III). Материалы конференции. - Новосибирск, ИГиМ СО РАН, 2010. - С 16-17.

2. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А. Включения в корундах месторождения Сутара // X Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». Материалы конференции. - Москва, РГГРУ, 2011. С 106

3. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А. Минералогия и условия образования корундовых метасоматитов месторождения Сутара // IX Всероссийская (с международным участием) Ферсмановская научная сессия. Материалы конференции. -ГИ КНЦ РАН, Апатиты, 2012. - С. 223-226.

4. **Буравлева С.Ю.** Минеральные ассоциации высокоглиноземистых пород района месторождения Сутара. // Современные проблемы геологии, геохимии и геоэкологии Дальнего Востока России. Материалы 4-й Всероссийской конференции молодых учёных. -Владивосток, 2012 г. -С. 53-56

5. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А. Условия образования корундовых метасоматитов месторождения Сутара // Вторая научная молодежная школа с международным участием "Новое в познании процессов рудообразования". Материалы конференции. - Москва, ИГЕМ РАН , 2012. -С 53-56

6. **Буравлева С.Ю.**, Пахомова В.А., Остапенко Д.С., Зарубина Н.В., Тишкина В.Б., Федосеев Д.Г. Распределение редких элементов в корунде различного происхождения. // Третья научная молодежная школа с международным участием «Новое в познании процессов рудообразования». Материалы конференции. - Москва, ИГЕМ РАН, 2013. -С. 66-69.

7. **Буравлева С.Ю.**, Федосеев Д.Г., Тишкина В.Б., Степнова Ю.А. Результаты исследования включений в корундах месторождения Сутара методами Рамановской спектроскопии // XVI Всероссийская конференция по термобарогеохимии. Материалы конференции. ИГХ СО РАН, Иркутск, 2014. -С16-17.

8. **Buravleva S. Y.**, Smirnov S.Z., Pakhomova V. A., Fedoseev D. G. Use of Raman spectrometry to determine the composition of primary inclusions in sapphires // 11th International Conference on Raman Spectroscopy and its Applications to Geological, Planetary and Archeological Sciences". Abstract volume. Washington University, St. Louis, USA, 2014. -P. 161

9. **Буравлева С.Ю.**, Россыпные корунды золоторудного месторождения Сутара (Дальний Восток России) // Всероссийская конференция с международным участием "Месторождения камнесамоцветного и нерудного сырья различных геодинамических обстановок" (XVI Чтения памяти академика А.Н. Заварицкого). Материалы конференции. ИГГ УрО РАН, Екатеринбург, 2015. - С. 11-14