

На правах рукописи

СОКОЛОВА Екатерина Николаевна

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГРАНИТНЫХ РАСПЛАВОВ
РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ДАЙКОВЫХ ПОЯСОВ
ЮЖНОГО АЛТАЯ И ВОСТОЧНОГО КАЗАХСТАНА**

25.00.04 – «петрология, вулканология»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»

Научный руководитель:

Смирнов Сергей Захарович кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник ФБГУН Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН.

Официальные оппоненты:

Перетяжко Игорь Сергеевич, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ФБГУН Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (г. Иркутск).

Поцелуев Анатолий Алексеевич, доктор геолого-минералогических наук, заведующий кафедрой общей геологии и землеустройства, профессор ФГБОУ ВПО Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (г. Москва).

Защита состоится 27 мая 2014 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 003.067.03, созданного на базе ФБГУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, в конференц-зале. Адрес: 630090, г. Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, д. 3.

Факс: (383)3332792, e-mail: turkina@igm.nsc.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФБГУН Института геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН (адрес сайта <http://www.igm.nsc.ru> в разделе «Образование»).

Автореферат разослан 2 апреля 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор геол.-мин. наук

О.М. Туркина

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы: Вопросы генезиса редкометалльных пород рассматриваются со времени их первых находок, и дискуссии активно продолжаются до настоящего времени. Редкометалльные гранитоиды являются продуктами заключительного этапа эволюции длительно развивающихся очагов гранитоидного магматизма. Содержания редких элементов (Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Be) в этих породах могут быть в десятки и более раз выше, чем в обычных гранитах, и достигать уровня промышленных редкометалльных пегматитов (Коваленко, 1977; Дергачев, 1988). Вместе с тем, по данным многочисленных исследователей (Коваленко, Коваленко, 1976; Таусон, 1977; Козлов, 1985; Рейф, 1990 и др.), редкометалльные гранитоиды в большинстве случаев локализуются в пределах рудных полей месторождений Sn, W, Mo и других редких металлов. Таким образом, редкометалльные породы являются индикаторами наличия оруденения и сами представляют потенциальные источники сырья, что, наряду с необычным составом, определяет устойчивый интерес к их изучению.

Важным этапом в решении вопросов генезиса редкометалльных гранитов стала находка их субвулканических аналогов – онгонитов, что показало возможность существования собственных редкометалльных расплавов (Коваленко, Коваленко, 1976). Обнаружение расплавных включений в минералах редкометалльных гранитов послужило неоспоримым доказательством их магматической природы (Царева и др., 1991; Наумов и др., 1982, 1990). В настоящее время использование методов термобарогеохимии получило широкое развитие для изучения генезиса самых разнообразных пород (Коваленко и др., 1998; Thomas et al., 2000; Перетяжко, Савина, 2010). Исследование включений в минералах редкометалльных гранитоидов позволяет установить особенности процессов кристаллизации, происходивших в глубинных магматических камерах, и тем самым реконструировать историю развития магматических очагов, которые, как считается, являются важнейшими составными частями рудно-магматических систем (Гоневчук, 2002; Chappel, Nine, 2006; Поцелуев и др., 2008). Изучение физико-химических параметров кристаллизации редкометалльных магм позволяет внести существенный вклад в решение фундаментальных вопросов петрогенезиса и практических вопросов рудообразования.

В качестве **объектов исследования** в работе выбраны дайковые пояса, сложенные редкометалльными породами - онгонитами и эльванами. Восточно-Калгутинский дайковый пояс на Южном Алтае является частью рудно-магматической системы, включающей крупное Mo-W месторождение. Чечекский и Ахмировский дайковые пояса в Восточном Казахстане не имеют очевидной связи с оруденением.

Цель работы: определение условий кристаллизации и эволюции магм, сформировавших Восточно-Калгутинский (Южный Алтай), Чечекский и Ахмировский (Восточный Казахстан) редкометалльные дайковые пояса, и установление их рудогенерирующего потенциала.

Основные задачи:

1. Определение минералого-геохимических особенностей дайковых пород.
2. Установление особенностей химизма расплавов и сопутствующих флюидов по включениям в минералах.
3. Разработка метода гомогенизации включений водонасыщенных гранитных расплавов с контролем их герметичности. Определение температуры и давления кристаллизации и эволюции магм по включениям минералообразующих сред.
4. Выявление признаков, определяющих рудный потенциал магм изучаемых дайковых поясов.

Фактический материал, методы исследований и личный вклад

автора: Основу рабочей коллекции составляют образцы, отобранные в ходе экспедиций 2009, 2011 и 2013 гг. с участием автора, и в 2007, 2012 г. С.З. Смирновым, А.Г. Владимировым, И.Ю. Анниковой, С.В. Хромых; также использован материал из авторских коллекций В.Б. Дергачева и С.А. Выставного, А.В. Титова. Всего в ходе работы просмотрено 80 шлифов и пластинок; в 80 валовых пробах определены концентрации петрогенных и редких элементов; методами рентгеноспектрального микроанализа, вторично-ионной масс-спектрометрии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией получено и обработано более 1500 анализов минералов и 230 анализов расплавных включений (РВ); получено 80 катодолюминесцентных изображений вкрапленников кварца; проведено 20 прогревов РВ при атмосферном давлении и 38 прогревов в автоклаве, проведена криотермометрия 130 флюидных включений (ФВ), сняты спектры комбинационного рассеяния для 100 ФВ и РВ. Определения концентраций F, V, Li, рудных элементов в породах были сделаны в Аналитическом центре ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Ионно-зондовые анализы минералов и расплавных включений выполнены в Ярославском филиале ФТИАН РАН (г. Ярославль). Остальные исследования проведены с использованием оборудования ИГМ СО РАН и НГУ (г. Новосибирск).

Защищаемые положения:

1. Минеральный состав пород изученных дайковых поясов определяется геохимической спецификой сформировавших их водонасыщенных редкометалльных магм. Материнские магмы онгонитов Восточного Казахстана были обогащены фтором и оловом, что привело к образованию топаза, высокофтористых литиевых слюд и касситерита. Магмы Восточно-Калгутинского дайкового пояса были обогащены фосфором и

вольфрамом, что обусловило широкое распространение апатита в ассоциации с монтебразитом и гердеритом, кристаллизацию низкофтористого литиевого мусковита и появление вольфрамитов.

2. Разнообразие составов даек в пределах поясов и отдельных тел связано с химической неоднородностью магм в камерах, где происходила кристаллизация вкрапленников. Неоднородность состава даек Чечекского пояса обусловлена внедрением последовательных дифференциатов одной и той же магмы, а даек Восточно-Калгутинского пояса – как кристаллизационной дифференциацией магмы, так и ее взаимодействием с водными флюидами.

3. Кристаллизация вкрапленников редкометалльных дайковых пород поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана происходила в глубинных магматических камерах в присутствии водного флюида. Кристаллизация расплавов при формировании дайковых поясов Восточного Казахстана протекала при температуре 560-605 °С и давлении 3,6-5,3 кбар, а Восточно-Калгутинского пояса – при температуре 565-620 °С и давлении 4,5–6 кбар.

Научная новизна:

1. Впервые установлено, что формирование вкрапленников редкометалльных дайковых пород Южного Алтая и Восточного Казахстана происходило из расплавов с высокими содержаниями редких литофильных элементов.

2. Применение новой методики прогрева расплавных включений под давлением тяжелой воды D₂O с последующим контролем герметичности включений и корректировки температуры гомогенизации с учетом давления позволили получить более точные значения температуры кристаллизации по сравнению с данными предшествующих исследований.

3. Проведенные впервые детальные исследования флюидных включений в минералах Чечекского, Ахмировского и Восточно-Калгутинского дайковых поясов позволили определить особенности состава и свойств магматогенного флюида в процессе кристаллизации редкометалльных магм.

4. Впервые доказана значительная роль флюидно-магматического взаимодействия в формировании разнообразия составов расплавов и пород Восточно-Калгутинского дайкового пояса.

5. В породах Восточно-Калгутинского пояса аналитическими методами достоверно определен монтебразит LiAl[PO₄](OH,F), а также впервые обнаружен гердерит CaBe[PO₄](F,OH), не известный ранее в субвулканических редкометалльных породах.

Практическая значимость работы: Разработанная методика работы с насыщенными водой расплавными включениями может быть использована исследователями, работающими с гранитоидными системами. Редкометалльные граниты характеризуются богатыми содержаниями рудных элементов (Li, Be, Cs, Nb, Ta и др.), сравнимыми с промышленными редкометалльными пегматитами.

Изучение распределения этих элементов в породообразующих и аксессуарных минералах имеет важное значение в случае возможного использования таких пород в качестве руды редких металлов. Совместное рассмотрение двух проявлений редкометалльных гранитоидов, одно из которых входит в состав рудно-магматической системы, а другое не связано с гидротермальной минерализацией, позволило сделать вывод об условиях, препятствовавших формированию магматогенного рудообразующего флюида. Полученные данные о закономерностях эволюции и флюидном режиме редкометалльных гранитоидных магм могут быть использованы при обосновании научной базы для прогнозирования и поиска редкометалльных месторождений. Часть выводов, полученных в ходе работы, используется в чтении курса «Термобарогеохимия» на Геолого-геофизическом факультете НГУ.

Апробация работы и публикации: Результаты исследований по теме диссертации изложены в 21 работе, из них 3 статьи опубликованы в рецензируемых российских журналах. Основные результаты представлены на Сибирской конференции молодых ученых по наукам о Земле (Новосибирск, 2008 и 2012); ACROFI-III (Новосибирск, 2010); ECROFI-XXI (Леобен, Австрия, 2011); XV Всероссийской конференции по термобарогеохимии (Москва, 2012); "Науки о Земле. Современное состояние" (Шира, респ. Хакасия, 2013); Гольдшмидтовской конференции (Флоренция, Италия, 2013) и др.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения общим объемом 182 страницы. В ней содержится 72 рисунка и 21 таблица. Список литературы включает 191 наименование.

Благодарности: Автор благодарит С.З. Смирнова за научное руководство, огромную поддержку и внимание на всех этапах выполнения работы. Коллектив лаборатории №436 Термобарогеохимии под руководством А.А. Томиленко оказал неоценимую помощь в освоении научного подхода и методов исследования. Искреннюю признательность выражаю сотрудникам лаб. 211 И.Ю. Анниковой, С.В. Хромых, А.Г. Владимирову, Н.Н. Круку, П.Д. Котлеру за сотрудничество, консультации и ценные советы. Отдельная благодарность В.Г. Томасу за проведение термометрических экспериментов, Е.И. Астреиной за плодотворную совместную работу и помощь в получении материалов по флюидным включениям. Основная часть аналитических данных была получена в лабораториях ИГМ СО РАН при непосредственной помощи Н.С. Карманова, Л.Н. Пospelовой, Е.Н. Нигматулиной, А.Т. Титова, М.В. Хлестова, И.Н. Куприянова, Е.И. Петрушина, а также С.Г. Симакина и Е.В. Потапова в ФТИАН РАН (г. Ярославль). Кроме того, автор признателен О.М. Туркиной, А.Э. Изоху, В.А. Симонову за критические замечания по содержанию и оформлению диссертации. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 12-05-31290, РФФИ № 10-05-00913, междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН № 123, а также НИЛ СПМ ТГУ № 2012-1.2.1-12-000-2008-8340.

ГЛАВА 1. Классификация и условия образования редкометалльных гранитоидов (по литературным данным)

В этой главе изложены принципы номенклатуры редкометалльных гранитоидов, проведен обзор моделей их образования, в том числе объектов в составе рудно-магматических систем.

В общем случае к редкометалльным (РМ) гранитоидам относят породы с концентрациями редких литофильных элементов (Li, Rb, Cs, Nb, Ta), в 1,5-4 и более раз превышающими кларковый уровень гранитов, резко пониженными Sr и Ba, и обычно низкими RЗЭ и Zr (*Таусон, 1961; Коваленко, 1977; Козлов, 1985; Дергачев, 1992; Петрография..., 2001*). Редкометалльные граниты являются разновидностью высокоглиноземистых гранитов умереннощелочного ряда, где полевые шпаты представлены микроклином и альбитом, отличительными особенностями являются наличие мусковита и возможное присутствие топаза. Их субвулканические аналоги выделяются в виды онгонит и онгориолит (*Петрография..., 2001; Петрографический..., 2009*). В современной русскоязычной литературе среди редкометалльных субвулканических пород формально принято выделять эльваны с $K_2O > Na_2O$ и онгониты, где $Na_2O > K_2O$ (*Дергачев, 1992; Владимиров и др., 2007*).

Наиболее распространенные в настоящее время представления о происхождении сводятся к тому, что редкометалльные расплавы являются поздними дифференциатами гранитных магм, которые обособляются при кристаллизации остаточных магматических очагов (*Таусон, 1977; Коваленко и др., 1999; Попов и др., 1998*). Важная роль отводится дополнительным факторам, к которым относятся эманационная дифференциация (с участием воды, фтора и, в некоторых случаях, фосфора) и влияние трансмагматических флюидов (*Козлов, Свядковская, 1977; Таусон, 1977; Наумов и др., 1982; Коваль, 1985; Рейф, 1990; London, 1992; Антипин и др., 1999; Thomas et al., 2000; Williamson et al., 2010; Chappel, Hine, 2006*). Как считается, многочисленные проявления литий-фтористых РМ гранитоидов в Центральной Азии, куда можно отнести и исследуемые объекты, явились результатом активного внутриплитного магматизма в позднем палеозое–мезозое (*Коваленко и др., 1999; Антипин и др., 2002; Добрецов и др., 2010; Ярмолюк, Кузьмин, 2012*). Судя по проведенному обзору, в каждом конкретном случае механизм формирования РМ расплавов и становления пород уникален, с чем связано большое разнообразие РМ гранитоидов.

Необычность составов дайковых пород Восточно-Калгутинского пояса и слабая изученность Чечекского и Ахмировского дайковых поясов потребовали более детального комплексного исследования условий их формирования.

ГЛАВА 2. Материалы и методы исследования

Методика работы включает в себя согласованный анализ состава дайковых пород, минералов и данных по термометрии и составу включений минералообразующих сред в порфириновых вкрапленниках кварца. При работе с расплавленными (РВ) и флюидными (ФВ) включениями учтены методические рекомендации (Чупин, Косухин, 1982; Наумов, 1979; Рёддер, 1987; Рейф, 1990; Bodnar, Student, 2006). Сопоставление состава пород и захваченных РВ позволило проследить характер эволюции состава расплавов от времени кристаллизации вкрапленников до затвердевания дайковых пород. Состав отдельных минеральных фаз дал представление о распределении элементов между минералами и расплавом в процессе кристаллизации и о минеральной форме нахождения отдельных элементов в породе.

С помощью оптического и электронного сканирующего микроскопов проведены минералого-петрографические исследования, которые включали описание шлифов, поиск и определение минералов, отбор и идентификацию включений. Валовое содержание петрогенных, редких и рудных элементов в породах определено методами РФА, ICP-MS, АЭА, пламенной фотометрии. Основным методом определения химического состава минералов и стекол РВ был рентгеноспектральный микроанализ; содержание редких и рассеянных элементов и H_2O было определено методом вторично-ионной масс-спектрометрии и LA ICP-MS. Определение состава газовой фазы расплавленных и флюидных включений проводилось методом рамановской спектроскопии. С целью оценки солевого состава и плотности захваченного флюида проводилась криотермометрия ФВ.

В работе значительное внимание уделялось подходу к прогревам водосодержащих включений кислых расплавов. Чтобы избежать декрепитации РВ в экспериментах по гомогенизации, прогревы проводились в автоклаве под давлением тяжелой воды D_2O 1-3 кбар с последующей проверкой герметичности РВ методами ИК- и КР-спектроскопии в соответствии с методикой, разработанной сотрудниками ИГМ с участием автора (Смирнов и др., 2003; Смирнов и др., 2011). Установлено, что обмен водой между включениями и средой заполнения автоклава происходит лишь при наличии механических нарушений минерала-хозяина. В связи с этим логично, что РВ, которые были прогреты в зернах, за редким исключением, не содержат D_2O , в отличие от тех, что были прогреты в тонких полированных пластинках. При повышении давления термометрических экспериментов от 1 атм до 3 кбар наблюдалось систематическое снижение температуры гомогенизации самых мелких РВ. Для получения истинной температуры захвата к температуре гомогенизации вводилась поправка на давление (см. Гл.5).

ГЛАВА 3. Чечекский и Ахмировский дайковые пояса (Восточный Казахстан)

Дайки Чечекского и Ахмировского поясов располагаются в северо-западной части Калба-Нарымского батолита на территории Восточного Казахстана (Дьячков, 1972; Лопатников и др., 1982; Дергачев, 1993). Полученная датировка Ar-Ar методом по литиевым слюдам составляет $285,7 \pm 3$ млн лет (Хромых и др., 2014) и относит эти породы к основному этапу формирования Калбинского батолита.

Дайки сложены типичными онгонитами. Главные минералы: кварц, полевые шпаты, слюда, встречается топаз. Основные акцессорные минералы: флюорит, апатит, касситерит, танталит-колумбит. Важной особенностью изучаемых пород является высокая концентрация редких литофильных элементов (Li, Rb, Cs, Be, Ta) и фтора (до 1,5 мас.%). На основании детального исследования петрохимии и согласно данным предшествующих исследований (Дергачев, 1993) в Чечекском дайковом поясе выделено две группы пород: редкометалльные (РМ) и ультраредкометалльные (УРМ) (Рис. 1).

Группа РМ пород Чечекского пояса отличается меньшим содержанием редких щелочей (Li+Rb+Cs 500-1000 ppm), Sn (до 50 ppm), F (до 0,45 мас.%), P_2O_5 (до 0,1 мас.%) и более высокими суммами РЗЭ (40-100 ppm). Слюды в них представлены фенгит-мусковитом. Калиевый полевой шпат (КПШ) содержит примесь BaO до 0,1 мас.%, имеет наименьшие концентрации R и Rb.

УРМ породы характеризуются наибольшей концентрацией F (до 1,4 мас.%) и P_2O_5 (до 0,35 мас.%), высоким содержанием редких щелочей (до 2500 ppm), Sn (до 250 ppm) и низкими суммами РЗЭ (3-15 ppm). Слюды в этих породах зональные с мусковитом в центре, кайма образована литиевым мусковитом или лепидолитом. Содержание лития в слюдах рассчитано через содержание фтора (Tischendorf, 1997) и подтверждено методом вторично-ионной масс-спектропии. КПШ отличается максимальным содержанием примеси P_2O_5 0,05-0,2 мас.% при умеренном содержании Rb_2O (0,1-0,25 мас.%).

Онгониты Ахмировского пояса отличаются от Чечекских самым высоким содержанием редких щелочей (до 4000 ppm), Sn (до 340 ppm) и одновременно сумм РЗЭ (110-180 ppm), высокой концентрацией F (до 1,3 мас.%), при этом содержание P_2O_5 низкое (до 0,05 мас.%). Составы слюд изменяются от железистого лепидолита до протолитионита. Для КПШ отмечается максимальная концентрация примеси Rb_2O (0,15-0,55 мас.%) при содержании R на уровне предела обнаружения.

Итак, особенности составов даек отражаются в составе породообразующих минералов, чем подтверждается деление пород Чечекского пояса на две контрастные по составу группы. Полевые наблюдения подтверждают, что УРМ дайки моложе, чем РМ. Породы

Ахмировского пояса отличны от пород Чечекского пояса химическим составом и особенностями минералогии.

Результаты исследования расплавных и флюидных включений.

Во вкрапленниках кварца пород Чечекского и Ахмировского дайковых поясов изучены расплавные (РВ) и флюидные включения (ФВ). Исследование кварца методом катодолуминесценции показало, что первичные ФВ не изменяют интенсивность катодолуминесценции и не нарушают зональную структуру вкрапленников. Первичные ФВ, сингенетичные с РВ, очень редки и их размер не превышает 5-10 мкм. При комнатной температуре они состоят из слабосоленого водного раствора (3-8 мас.% $\text{NaCl}_{\text{экв}}$) и газового пузырька. По данным рамановской спектроскопии, в газовых пузырьках ФВ был обнаружен метан с примесями углекислого газа и азота. В составе газовой фазы в РВ, наряду с H_2O , также фиксируется метан. Это подтверждает, что метан является одним из летучих компонентов, присутствовавших в процессе магматической кристаллизации. Температура гомогенизации ФВ в жидкость составляет 220-300°C. РВ раскристаллизованные, содержат флюидное обособление. Дочерние минералы представлены мусковитом, альбитом, калишпатом, а также апатитом и флюоритом, имеются единичные находки монацита, касситерита, топаза, криолита $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$. Гомогенизация РВ в автоклаве под давлением 3 кбар происходила в силикатный расплав при температуре 570-610°C.

Стекла гомогенных РВ характеризуются высокими содержаниями SiO_2 , варьирующими от 66 до 74 мас.%, и высокой глиноземистостью ($\text{A/CNK}=1,1-1,4$) (Табл. 1). Щелочность изменяется от нормальной до умеренной ($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}=7-9$ мас.%). На преобладает над К, т.е. расплавы, так же как и дайковые породы, имели онгонитовый состав. Для РВ свойственно повышенное содержание F (0,3-2 мас.%), а также редких элементов (Rb до 700 ppm, Cs до 115 ppm, Та до 10 ppm). Различия, установленные для РМ и УРМ дайковых пород Чечекского пояса, прослеживаются и в составе соответствующих РВ. Главным является то, что РВ в кварце УРМ пород имеют более высокую концентрацию Rb, Cs, Ве и более низкую – Ва, Sr относительно РМ. Кроме этого, УРМ расплавы по сравнению с РМ обогащены P_2O_5 , F и обеднены СаО. Содержание воды в расплавах составляло 5-8 мас.%. Составы стекол РВ в кварце Ахмировского пояса, выделяются в обособленную группу с повышенными концентрациями SiO_2 и пониженными – Al_2O_3 , P_2O_5 . На треугольной диаграмме гаплогранитной системы (ортоклаз-кварц-альбит) (Рис. 2) поле составов расплавов дайковых поясов Восточного Казахстана довольно компактно, близко к составам пород и соответствует направлению альбитового тренда эволюции литий-фтористых гранитных магм.

Принимая во внимание состав РВ и минералов, а также петрохимию дайковых пород, можно заключить, что кристаллизация вкрапленников Чечекского и Ахмировского поясов происходила из редкометалльных высокофтористых расплавов. Различия в составе пород Чечекского и Ахмировского поясов связаны с различиями в составе расплавов в момент кристаллизации вкрапленников.

ГЛАВА 4. Восточно-Калгутинский дайковый пояс (Южный Алтай)

Восточно-Калгутинский дайковый пояс входит в состав Калгутинской рудно-магматической системы, которая также включает массив биотитовых гранитов главной фазы, штоки лейкогранитов фаз дополнительных интрузий и Калгутинское Мо-W грейзеново-жильное месторождение (*Поцелуев и др., 2008*). Возраст биотитовых гранитов составляет от 215 ± 3 млн лет (*Анникова и др., 2006*) до $207,5 \pm 1,7$ млн лет (*Гусев и др., 2011*). Методом Ar-Ar датирования по вкрапленникам мусковита установлено, что формирование пояса происходило между $203,4 \pm 1,5$ и $184 \pm 2,1$ млн лет (*Анникова и др., 2006; собственные данные*).

Дайки сложены гранит- и фельзит-порфирами с размерами вкрапленников от 0,1-1 мм до 1-2 см. Главными минералами дайковых пород являются кварц, полевые шпаты и слюда. Слюда представлена мусковитом, отмечены единичные дайки с биотитом. Среди акцессорных минералов широко развит апатит, а также встречаются флюорит, магнетит, пирит, рутил, вольфрамит, танталит-колумбит, аналитически подтверждено наличие в дайках монтебразита $\text{LiAl}[\text{PO}_4](\text{OH}, \text{F})$ и впервые обнаружен гердерит $\text{CaBe}[\text{PO}_4](\text{F}, \text{OH})$. Традиционно принимается разделение пород Восточно-Калгутинского пояса на эльваны (калиевый ряд) и онгониты (натровый ряд) (*Дергачев, 1992; Владимиров и др., 2007*). По содержанию редких щелочей большая часть даек пояса относится к группе редкометалльных (РМ) пород. К протяженной дайке в осевой части пояса приурочены выходы ультраредкометалльных (УРМ) онгонитов и высокоредкометалльных (ВРМ) эльванов. Между мелкопорфировыми и афировыми УРМ онгонитам, и крупнопорфировыми ВРМ эльванами отмечены фациальные переходы. Уникальной особенностью пород Восточно-Калгутинского пояса является повышенное содержание фосфора в совокупности с пониженным по сравнению с обычными онгонитами содержанием фтора (**Рис. 1**). УРМ онгониты в наибольшей степени обеднены РЗЭ, в то время как ВРМ эльваны отличаются от всех пород Восточно-Калгутинского дайкового пояса максимальными суммами РЗЭ и повышенной концентрацией Sr.

Исследования составов породообразующих минералов показали, что РМ эльваны и онгониты отличаются по составу КРШ: в КРШ РМ эльванов содержание Rb_2O (до 0,2 мас.%) и P_2O_5 (до 0,1 мас.%) более низкие по

сравнению с РМ онгонитами (0,2-0,3 мас.% Rb₂O и 0,1-0,3 мас.% P₂O₅). Биотит из РМ эльванов имеет более низкие содержания Rb₂O и F, и повышенные MgO и TiO₂, по сравнению с РМ онгонитами. В остальном составы минералов в этих породах сходны. Отличительной чертой вкрапленников мусковита РМ пород является повышенное содержание MnO (0,7-1,3 мас.%). Различия между составами минералов ВРМ эльванов и УРМ онгонитов центральной дайки более отчетливые. ВРМ эльваны выделяются повышенным MgO (0,5-1,2 мас.%) и низким F (<1 мас.%) в мусковите, повышенным содержанием Са в плагиоклазе (до An₂₅). В УРМ онгонитах плагиоклаз наиболее близок к чистому альбиту; калишпат заметно выделяется повышенным содержанием P₂O₅ (0,3-0,7 мас.%) и Rb₂O (0,25-0,35 мас.%); мусковит – повышенным Rb₂O (0,3 мас.%), Cs (200 ppm) и низким Ti. Только в УРМ онгонитах, в силу специфики их состава, обнаружены фосфаты лития и бериллия – монтебразит и гердерит.

Результаты исследования расплавных и флюидных включений.

Вкрапленники кварца в дайковых породах Восточно-Калгутинского пояса содержат расплавные (РВ) и флюидные (ФВ) включения, которые послужили объектом исследования. В работе уделено внимание только первичным ФВ, сингенетичным с расплавными, так как они отражают параметры магматического этапа кристаллизации. Первичные включения магматогенного флюида при комнатной температуре двухфазовые газожидкие, температура их гомогенизации в жидкость 140-200°C. Жидкость во ФВ представлена слабосоленым раствором (3-12 мас.% NaCl_{экв}).

РВ состоят из агрегата дочерних полевых шпатов, мусковита и апатита, редко присутствуют монацит, колумбит и триплит. Во всех РВ присутствует флюидное обособление. Гомогенизация РВ в автоклаве под давлением 1-3 кбар во вкрапленниках РМ пород происходила при 640-660°C, а в кварце ВРМ и УРМ пород центральной дайки при 570-600°C.

Составы гомогенных стекол РВ отвечают кислым (SiO₂ 68-74 мас.%), высокоглиноземистым (А/СНК=1,1-1,4) расплавам с содержанием щелочей Na₂O+K₂O=5-8,5 мас.% (Табл. 1). Расплавам, «законсервированным» во включениях в кварце Восточно-Калгутинских даек, свойственно повышенное содержание P₂O₅ (до 0,7 мас.%) и редких литофильных элементов: Li до 200-3300 ppm, Rb до 600-1200 ppm, Cs 40-1400 ppm, Та до 20-190 ppm. Таким образом, уже в момент кристаллизации вкрапленников кварца расплав имел редкометалльную высокофосфористую специфику. Судя по недостатку аналитических сумм стекол РВ, содержание воды в расплаве составляло 6-7 мас.%.

Стекла РВ из кварца РМ эльванов и онгионитов имеют калиевую специфику, т.е. кварц рос из эльванового расплава. В центральной дайке, сложенной УРМ онгонитами и ВРМ эльванами, РВ характеризуются

онгонитовым K/Na отношением независимо от состава дайковой породы. На гаплогранитной диаграмме (Рис. 3) точки составов РВ имеют большой разброс в направлении кварцевой вершины, тогда как точки валовых составов пород дайкового пояса располагаются более компактно вблизи точки минимума котектических кривых при повышенном давлении воды.

По соотношениям других петрогенных и рассеянных элементов стекла РВ близки к валовому составу соответствующих дайковых пород. Составы РВ в кварце РМ эльванов и онгонитов сходны. Отличительной чертой РВ в кварце УРМ онгонитов и ВРМ эльванов центральной дайки являются повышенные концентрации Р и Sr. РВ в кварце УРМ онгонитов обеднены Fe, Mg и Ti, несколько обогащены F по сравнению с РВ других пород. По содержанию Cs, Rb, Та составы РВ образуют ряд от РМ эльванов и онгонитов к эльванам центральной дайки, максимальным содержанием этих элементов характеризуются РВ в кварце УРМ онгонитов. В этом ряду на фоне увеличения концентрации редких элементов наблюдается уменьшение Nb/Та и K/Rb отношений.

Итак, в Восточно-Калгутинском дайковом поясе по содержанию петрогенных компонентов (Al, Fe, Mg, Ti, P, F) и редких элементов составы расплавов, из которых образовались вкрапленники, согласуются с валовым составом соответствующих типов (РМ, ВРМ, УРМ) пород. Однако, K/Na отношение изменялось после захвата РВ до полной кристаллизации даек. Показано, что в расплавах концентрации редких литофильных элементов и фосфора увеличивались от РМ эльванов и онгонитов, к ВРМ эльванам и были максимальны в УРМ онгонитах центральной дайки. В составах минералов из данных типов пород также установлены различия. РМ эльваны и онгониты формировались из сходных расплавов и разделяются лишь по некоторым особенностям состава минералов-вкрапленников.

ГЛАВА 5. Сравнительная характеристика условий формирования редкометалльных дайковых поясов и их связь с оруденением

Кристаллизация минералов из редкометалльных расплавов.

Характер сростаний порообразующих минералов, наблюдаемый в шлифах дайковых пород, позволяет утверждать, что кристаллизация вкрапленников происходила одновременно. Подтверждением одновременности кристаллизации кварца и КПШ является соответствие содержаний фосфора в стеклах РВ в кварце содержанию фосфора в расплаве, равновесном с КПШ, которое было рассчитано исходя из зависимости: $P_2O_5[m] = (0,7273 * P_2O_5[КПШ]) / (ASI - 0,7818)$ (London, 1992), где $P_2O_5[m]$ - содержание фосфора в расплаве, $P_2O_5[КПШ]$ - содержание фосфора в КПШ, ASI - индекс насыщенности расплава алюминием. Это соответствие означает, что в каждом из дайковых поясов КПШ и кварц формировались из расплавов

с одинаковым содержанием фосфора, т.е. совместно. Из петрографических наблюдений и выполненных расчетов следует, что данные о составе и P-T параметрах кристаллизации, полученные по включениям в кварце, относятся к расплавам, из которых формировались все вкрапленники.

Общие характеристики геохимии, минералогии дайковых пород и состава расплавов. В каждом из дайковых поясов породы характеризуются различными наборами главных и акцессорных минералов. Для редкометалльных пород Восточно-Калгутинского пояса с высоким содержанием Р и умеренным содержанием F характерно наличие литиевого мусковита, монтебразита, гердерита, вольфрамита, танталит-колумбита и обилие апатита. Редкометалльно-фтористая специфика даек Чечекского и Ахмировского поясов выражается в появлении литиевых слюд рядов мусковит-лепидолит и протолитионит-железистый лепидолит, топаза, касситерита, танталит-колумбита.

Исследования РВ позволили выявить основные характеристики состава расплавов в момент кристаллизации вкрапленников. Дайковые пояса Южного Алтая и Восточного Казахстана образовались из высокоглиноземистых, нормально - умереннощелочных, кислых расплавов с 66-74 мас.% SiO_2 и содержанием воды 5-8 мас.%. Расплавы, формировавшие Чечекский и Ахмировский пояса, имели онгонитовый состав, характеризовались высоким содержанием фтора и редких элементов (Li, Rb, Cs, Be, В, Sn, Nb и Ta). При формировании Восточно-Калгутинского пояса расплавы, так же как и породы, были обогащены фосфором и редкими элементами (Rb, Cs, Be, В, W, Nb и Ta).

Таким образом, составы РВ хорошо согласуются с геохимическими характеристиками и наборами минералов соответствующих дайковых поясов, что позволяет сформулировать первое защищаемое положение.

Неоднородность состава пород дайковых поясов. На основании данных по составу РВ и минералов Чечекского дайкового пояса (Гл. 3) сделан вывод, что различия между РМ и УРМ породами обусловлены вариациями составов расплавов в магматическом очаге. Дайки Ахмировского пояса, несмотря на пространственную близость и приуроченность к тем же геологическим структурам, формировались из расплавов, отличных от Чечекских.

Сопоставление данных по минеральному составу и химизму РВ в кварце пород Восточно-Калгутинского пояса (Гл. 4) показало, что в его образовании принимали участие редкометалльные магмы различного состава. РМ эльваны и РМ онгониты формировались из близких по составу расплавов. Образование центральной дайки, состоящей из УРМ онгонитов и ВРМ эльванов, связано с внедрением гетерогенной онгонит-эльвановой магмы с высоким содержанием редких металлов и фосфора.

Таким образом, контрастные различия в составе как РВ, так и минералов-вкрапленников в выделенных типах пород позволяют сделать вывод, что гетерогенность состава дайковых поясов обусловлена эволюцией магматических очагов, а не наложенными процессами.

Роль **кристаллизационной дифференциации расплавов** в формировании многообразия составов редкометалльных пород Чечекского и Восточно-Калгутинского поясов была прослежена путем анализа некоторых индикаторных соотношений элементов (*Косалс, 1984; Christiansen et al., 1984; Коваленко и др., 1999; Гоневчук, 2002; Lukkari, 2002*).

В составах пород и РВ Чечекского пояса по мере увеличения редкометалльности (Li+Rb+Cs) от РМ к УРМ породам и их расплавам происходит снижение K/Rb, Nb/Ta и суммы РЗЭ, и возрастание Rb/Sr. Из этого следует, что РМ и УРМ онгониты являются последовательными дифференциатами магмы одного и того же очага. Дифференциация происходила с накоплением редких щелочей, F, P, Ta, Nb, Sn. Состав каждого из выделенных типов даек определялся преимущественно составом расплава.

Составы пород и РВ Восточно-Калгутинского пояса также образуют тренд в направлении снижения K/Rb и Nb/Ta, предполагающий последовательность дифференциации расплавов: РМ эльваны → РМ онгониты и ВРМ эльваны → УРМ онгониты. Кристаллизацию РМ онгонитов из эльвановых расплавов также можно объяснить дифференциацией, которая происходила по альбитовому тренду (*Коваленко, Коваленко, 1976; Антипин и др., 1999*). В то же время в рамках только кристаллизационной дифференциации гранитных расплавов нельзя объяснить возрастание Sr в материнских расплавах УРМ онгонитов и ВРМ эльванов центральной дайки одновременно с накоплением Rb. При том, что в породах Восточно-Калгутинского пояса важнейшим концентратом Sr является апатит, расплав при кристаллизационной дифференциации должен еще в большей степени обедняться стронцием. Это предполагает дополнительный привнос Sr в магматический очаг.

Для состава расплавов, формировавших породы Восточно-Калгутинского пояса, характерен необычный тренд, направленный в сторону кварцевой вершины гаплогранитного треугольника (**Рис. 3, 4**). Причиной такой эволюции могло быть **взаимодействие расплава с водными флюидами**. Присутствие свободного флюида в момент кристаллизации вкрапленников доказывается наличием флюидных включений, сингенетичных с расплавными. С использованием коэффициентов распределения K и Na между таким флюидом и расплавом (*Bai, Koster van Groos, 1999*) рассчитано, что количества флюидной фазы, которое могло выделиться при вскипании магмы (до 10 мас.%), не достаточно для наблюдаемого изменения состава расплава (**Рис. 4**, точки 1, 2). Для его

смещения в ожидаемом направлении необходимо либо сопоставимое с массой расплава количество более концентрированного (1,4m) водного раствора HCl (**Рис. 4**, точка 5), либо превышающее массу расплава количество более разбавленного (0,1m) раствора HCl (**Рис. 4**, точка 4). В обоих случаях относительная доля SiO₂ в расплаве возрастает в связи с убыванием доли щелочей, а соотношение Na:K смещается в пользу калия, поскольку флюид обогащается в большей степени натрием. Подобный механизм можно рассматривать в рамках модели метамагматизма, которая используется для объяснения разнообразия состава пегматитов (*Загорский, Перетяжко, 1992; Антипин и др., 2002*) и других кислых пород (*Henley, 1974; Charoy, 1986*).

На основе выводов о неоднородности составов дайковых поясов и сформировавших их расплавов было сформулировано второе защищаемое положение.

Оценка **давления** при кристаллизации вкрапленников в очагах редкометалльных магм была проведена по пересечению изохор ФВ (*Potter, Brown, 1977; Pedder, 1987*) и изотрем РВ. Для Восточно-Калгутинского пояса давление флюида оценено в 4,5-6 кбар. Для Чечекского и Ахмировского дайковых поясов оценки давления, проведенные аналогичным методом, составили 3,5-4,5 кбар. Учет наличия метана во флюиде (*Mao et al., 2011*) приводит к небольшому увеличению давления до 3,6-5,3 кбар. Полученные оценки высокого давления качественно подтверждаются образованием парагенезиса мусковит+кварц из расплава (*Wyllie and Tuttle, 1961; Коваленко, 1979; Behrman, 1988; Johannes, Holtz, 1996*) и оценкой избыточного давления внутри вакуолей РВ при внедрении даек по методу (*Tait, 1992*).

Температура кристаллизации расплавов была определена исходя из полученной в экспериментах под давлением температуры гомогенизации расплавных включений с учетом оценок давления их захвата (**Рис. 5**). Показано, что с ростом давления воды в экспериментах температура гомогенизации снижается. Графически оценено, что температура в момент кристаллизации вкрапленников кварца даек Чечекского и Ахмировского поясов составляла 560-605°C, Восточно-Калгутинского – 580-620°C.

Наиболее низкое содержание Ti в мусковите УРМ онгонитов Восточно-Калгутинского пояса и Чечекского поясов указывает на более низкую температуру их образования по сравнению с РМ и ВРМ разновидностями пород (*Forbes, Flower, 1974; Ушакова, 1980; London, Burt, 1982*). Кроме того, в УРМ онгонитах Восточно-Калгутинского пояса составы альбита и ортоклаза, наиболее близкие к чистым миналам, подтверждают низкую температуру образования вкрапленников в них.

Проведенные расчеты Р-Т параметров и обобщение типоморфных особенностей минералов позволяют сформулировать третье защищаемое положение.

Связь образования редкометалльных дайковых поясов с оруденением. Проведенные в данной работе исследования показали, что для редкометалльных дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана выполняются формальные условия потенциальной рудоносности гранитов (Таусон, 1977; Козлов, 1985; Рейф, 1982, 1990): повышенная редкометалльность и, соответственно, присутствие аксессуарных рудных минералов в магматических породах, высокое флюидное давление и признаки вскипания флюида на ранних стадиях кристаллизации. Кроме того, набор легкоподвижных компонентов в магмах (метан и фтор для даек Восточного Казахстана и фосфор для даек Южного Алтая) отвечают магмам с высокой рудогенеирующей способностью и определяют рудную специализацию.

Калгутинская рудно-магматическая система характеризуется сложной эволюцией. Длительность процессов кристаллизации, сопряженных с флюидно-магматическим взаимодействием, кроме образования месторождения, по-видимому, обеспечили и большее разнообразие составов дайковых пород Восточно-Калгутинского пояса. Отсутствие гидротермальной минерализации в связи с Чечекским и Ахмировским дайковыми поясами связано с краткой эволюцией расплава и сохранением рудных элементов внутри магматических тел.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. В работе предложена методика гомогенизации крупных включений насыщенных водой расплавов путем прогрева в автоклаве под давлением воды с последующей проверкой герметичности. Установлено, что использование зерен в большинстве случаев позволяет избежать перенаполнения включений водой (в отличие от прогревов в пластинках).
2. Установлено, что образование дайковых пород поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана обусловлено кристаллизацией редкометалльных расплавов, богатых фтором, фосфором и водой.
3. Отражением редкометалльной специфики магм Восточно-Калгутинского пояса, богатых фосфором, с умеренным содержанием фтора, является обилие апатита и появление фосфатов Li и Be (монтебразита и гердерита), наличие вольфрамитов и танталит-колумбитов. Разнообразие составов дайковых пород этого пояса связано как с кристаллизационной дифференциацией, так и с флюидно-магматическим взаимодействием в глубинных камерах при температуре 565–620⁰С и флюидном давлении 4,5–6 кбар.
4. Дайки Чечекского и Ахмировского поясов Восточного Казахстана образовались из различных по составу очагов редкометалльной магмы. Редкометалльно-фтористая специфика магм Чечекского и Ахмировского

поясов выражается в наличии литиевых слюд и топаза, касситерита, танталит-колумбита. Различия даек Чечекского пояса по уровню редкометалльности объясняются кристаллизационной дифференциацией расплавов, которая происходила в глубинных камерах при температуре 560-605°C и флюидном давлении 3,6-5,3 кбар.

5. Отсутствие гидротермальной минерализации, генетически связанной с Чечекским дайковым поясом, объясняется краткой эволюцией магмы и рассеянием рудных элементов внутри магматических тел.

Основные публикации по теме диссертации:

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. Смирнов С.З., Томас В.Г., **Соколова Е.Н.**, Куприянов И.Н. Гомогенизация включений водонасыщенных силикатных расплавов в условиях противодавления парами D₂O при 650°C и 3 кбар. // Геология и геофизика, том 52, №5, 2011, с.690-703.

2. **Соколова Е.Н.**, Смирнов С.З., Астрелина Е.И., Анникова И.Ю., Владимиров А.Г., Котлер П.Д. Состав, флюидный режим и генезис онгонит-эльвановых магм Калгутинской рудно-магматической системы (Горный Алтай) // Геология и геофизика, том 52, №11, 2011, с. 1748-1775

3. Владимиров А.Г., Фан Лыу Ань, Крук Н.Н., Смирнов С.З., Анникова И.Ю., Павлова Г.Г., Куйбида М.Л., Мороз Е.Н., **Соколова Е.Н.**, Астрелина Е.И. Петрология оловоносных гранит-лейкогранитов массива Пиа Оак, Северный Вьетнам // Петрология, 2012, том 20, № 5, с.1-24.

Основные тезисы и материалы конференций:

1. **Sokolova E.N.**, Astrelina E.I., Smirnov S.Z., Annikova I.Yu., Vladimirov A.G., Kotler P.D. Crystallization conditions of rare-metal rocks of the East Kalgutinsky dike belt (Southern Altay, Russia) // ACROFI III and TBG XIV Abstracts Volume, Novosibirsk. 2010. P.222-223.

2. **Sokolova E.**, Smirnov S., Annikova I. Compositions of magmatic melts at formation of chemically heterogeneous rare-metal felsic dike in the East Kalguty dike belt (Gorny Altai, Russia) // European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI-XXI) Montanuniversitet Leoben, Austria, 9–11 August, 2011. Abstracts, p. 174-175.

3. **Sokolova E.N.**, Smirnov S.Z., Khromykh S.V. Composition and crystallization conditions of rare-metal dyke rocks in Eastern Kazakhstan // The 6-th international Siberian Early Career GeoScientists Conference: Proceedings of the Conference (9-23 June 2012, Novosibirsk, Russia). IGM, IPPG SB RAS & NSU: Novosibirsk. 2012. p.85-86.

4. **Sokolova E.N.**, Smirnov S.Z., Khromykh S.V. Fluid regime of crystallization and ore potential of rare-metal felsic dyke rocks in Kalba-Naryn complex (Eastern Kazakhstan) // Asian Current Research on Fluid Inclusions (ACROFI-IV), 10-12 August 2012, Brisbane, Australia, p. 74-75.

5. **Соколова Е.Н.**, Смирнов С.З., Астрелина Е.И., Анникова И.Ю. Условия кристаллизации редкометалльных пород дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана // XV Всероссийская конференция по термобарогеохимии. 18- 20 сентября 2012. ИГЕМ РАН, Москва, с.137-138.

6. **Соколова Е.Н.**, Смирнов С.З., Хромых С.В., Котлер П.Д. Рудный потенциал редкометалльных гранитоидов поздних интрузивных фаз на примере дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана // Тезисы всероссийской молодежной научно-практической конференции "Науки о Земле. Современное состояние", 2013 г., геологический полигон «Шира», республика Хакасия, с.61-63.
7. **Sokolova E.**, Smirnov S.Z. Crystallization of P-Rich Minerals from the High Phosphorus Rare-Metal Magma of East-Kalguty Dyke Belt (S. Altay, Russia) // Goldschmidt abstracts-2013, Mineralogical Magazine, 77(5), p. 2232.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Средние составы гомогенных стекол расплавных включений

	Восточно-Калгутинский дайковый пояс				Ахмиров- ский д.п.	Чечекский д.п.	
	PM эльв.	PM онг.	BPM эльв.	URM онг.		PM	URM
N	6	7	10	6	4	10	14
SiO ₂	71,48	71,11	69,51	69,27	73,08	69,87	68,73
TiO ₂	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,03
Al ₂ O ₃	13,11	12,96	13,15	13,11	11,98	13,42	13,45
FeO	0,57	0,60	0,30	0,24	0,38	0,56	0,39
MnO	0,08	0,18	0,14	0,07	0,08	0,07	0,12
MgO	0,13	0,11	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03
CaO	0,14	0,12	0,19	0,06	0,19	0,42	0,16
Na ₂ O	3,74	2,98	4,01	4,48	3,97	4,26	4,28
K ₂ O	3,95	3,53	3,45	2,95	3,76	3,70	3,33
Cs ₂ O	0,01	0,02	0,03	0,12	0,06	0,03	0,04
Rb ₂ O	н.а.	0,04	0,20	0,19	0,12	0,14	0,16
P ₂ O ₅	0,17	0,26	0,30	0,41	0,05	0,09	0,26
F	0,38	0,34	0,34	0,65	0,44	0,60	1,34
сумма	93,81	92,21	91,62	91,56	94,02	93,13	92,24
Na ₂ O/K ₂ O	0,94	0,84	1,17	1,54	1,06	1,16	1,30
A/CNK	1,28	1,39	1,26	1,24	1,10	1,15	1,25
n	2	0	5	4	0		
Li	н.а.	н.а.	267	1259	н.а.	50	256
Be	н.а.	н.а.	29	192	н.а.	11	49
B	н.а.	н.а.	218	471	н.а.	195	222
Rb	173	н.а.	457	1006	н.а.	218	461
Sr	4	н.а.	10	15	н.а.	2	0
Zr	8	н.а.	8	н.а.	н.а.	14	6
Nb	17	н.а.	43	70	н.а.	11	23
Mo	н.а.	н.а.	2	3	н.а.	н.а.	н.а.
Cs	25	н.а.	145	1094	н.а.	43	88
Ba	29	н.а.	7,5	20,5	н.а.	1,8	0,4
REE	4,6	н.а.	8,1	2,1	н.а.	15,5	2,2
Ta	1,5	н.а.	10	80	н.а.	2,5	7,4
W	н.а.	н.а.	9,56	39	н.а.	н.а.	н.а.
K/Rb	199	н.а.	69,2	29,9	н.а.	159	60
Nb/Ta	14,6	н.а.	4,96	0,98	н.а.	5,12	3,24
Rb/Sr	107	н.а.	60	394	н.а.	119	1165

Примечание: Приведены средние значения из выборки анализов, приведенных в диссертации. Содержание петрогенных компонентов и фтора – в мас.%, остальных – в г/т. N - количество анализов на петрогенные элементы, n - количество анализов на редкие элементы; н.а. - компонент не анализировался.

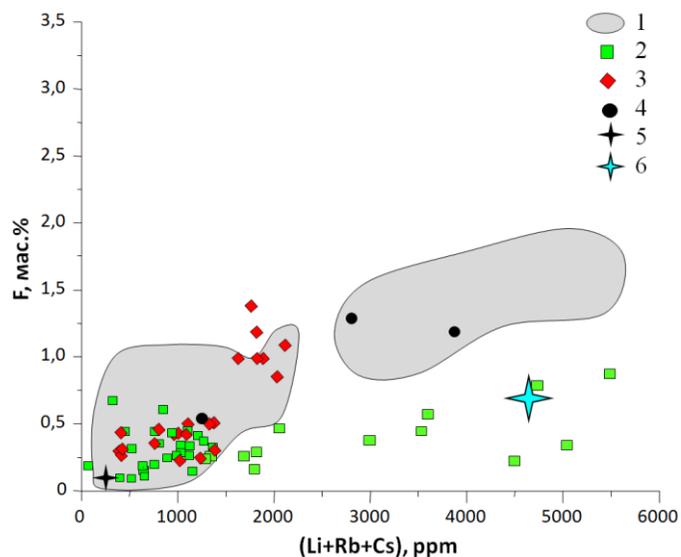


Рис. 1. Составы редкометалльных пород дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана
Условные обозначения: 1 – поля состава редкометалльных пород мира; 2 – дайковые породы Восточно-Калгутинского дайкового пояса; 3 – дайковые породы Чечекского пояса; 4 – дайковые породы Ахмировского пояса; 5 – кларк гранита (Виноградов, 1962); 6 – среднее содержание в РМ промышленных пегматитах (Загорский и др., 1997).

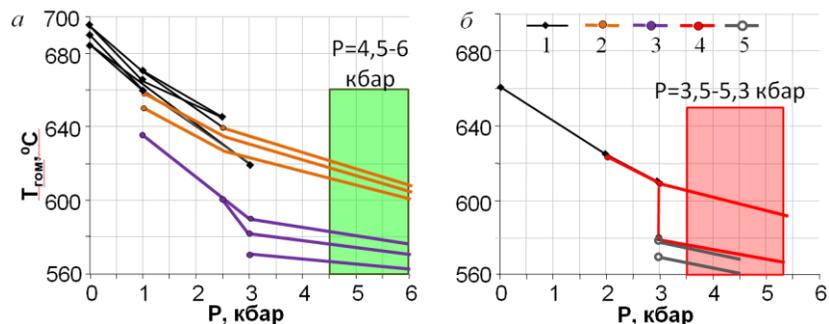


Рис. 5. Определение температуры кристаллизации вкрапленников с учетом температуры гомогенизации и давления захвата РВ. *а* – Восточно-Калгутинский дайковый пояс (ВКДп); *б* – дайковые пояса Восточного Казахстана. 1 - зависимость $T_{гом}$ от давления в эксперименте; 2 - РМ эльваны и онгониты ВКДп; 3 – ВРМ эльваны и УРМ онгониты ВКДп; 4 - онгониты Чечекского дп; 5 - онгониты Ахмировского д.п. Поля – диапазон оцененного давления.

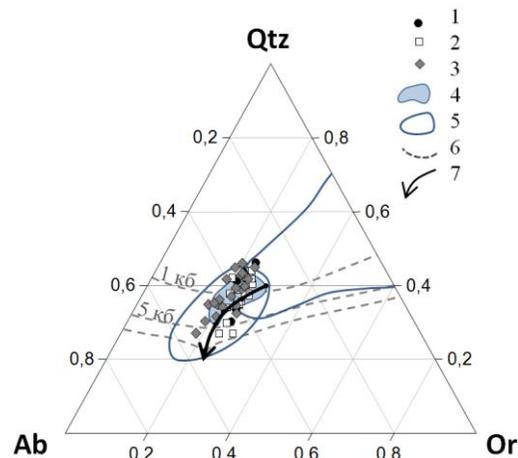


Рис. 2. Нормативные составы стекол расплавных включений и пород Чечекского и Ахмировского дайковых поясов: 1-3 - РВ Ахмировского (1) и Чечекского (2-РМ, 3-УРМ) поясов; 4 - валовые составы пород обоих поясов; 5 - поля составов эльванов и онгонитов (Коваленко, Коваленко, 1976; Антитин и др., 2002). 6 - котектические кривые при повышенном давлении H_2O ; 7 - смещение минимума котектик при повышенном давлении H_2O (от 1 до 10 кбар) по (Huang, Wyllie, 1975; Коваленко, 1977).

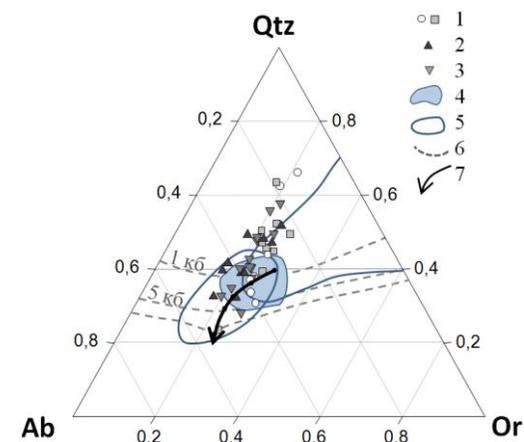


Рис. 3. Нормативные составы стекол расплавных включений и пород Восточно-Калгутинского дайкового пояса: 1-3 - РВ (1-РМ эльваны и онгониты, 2 - УРМ онгониты, 3 - ВРМ эльваны); 4 - валовые составы пород; 5,6,7 - см. рис.2.

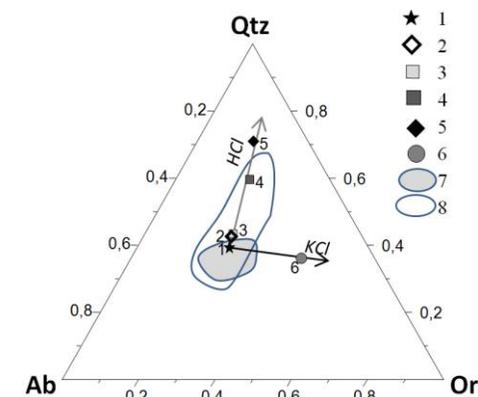


Рис. 4. Вариации состава габброгранитного расплава (1), обусловленные взаимодействием с флюидной фазой. 2-5 - см. табл. 2; 6 – 1,3 m раствор KCl (1:1); 7 – поле составов пород Восточно-Калгутинского пояса; 8 – поле составов РВ в кварце пород Восточно-Калгутинского пояса.

Таблица 2

Доля и состав флюидов, использованных для оценки их влияния на состав расплава

№ точки на рис.4	флюид: расплав	HCl во флюиде	Na ₂ O:K ₂ O
1	1:10	0,1m	1:1
2	1:10	1,4m	0,98:1
3	1:1	0,1m	0,95:1
4	5:1	0,1m	0,72:1
5	1:1	1,4m	0,61:1

Примечание: m - моляльность (количество вещества на 1000 г раствора)

