

ОТЗЫВ

официального оппонента на работу Е.Н. Соколовой «Физико-химические условия кристаллизации гранитных расплавов редкометалльных дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – петрология, вулканология

Работа Е.Н.Соколовой посвящена изучению условий кристаллизации субвулканических редкометалльных пород в нескольких районах Южного Алтая и Восточного Казахстана. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Приведу обзор работы в соответствии с ее структурой.

Во введении аргументируется актуальность работы, перечисляются объекты изучения, описаны цели и основные задачи, личный вклад автора. Фактический материал, используемый при исследованиях, весьма значителен. Здесь стоит отметить большое количество экспериментов с использованием трудоемкой автоклавной методики при изучении содержимого расплавных включений (РВ).

Защищается три основных положения. В первом положении минералогический состав пород дайковых поясов связывается с геохимическими особенностями сформировавших их водонасыщенных редкометалльных магм. Из второго положения следует, что разнообразие минерального состава даек в пределах поясов определяется химической неоднородностью магм в камерах, где происходила кристаллизация минералов-вкрапленников. В третьем положении приводятся конкретные *T-P* условия кристаллизации минералов в породах дайковых поясов Южного Алтая и Восточного Казахстана. В целом защищаемые положения сформулированы последовательно логично и соответствуют целям и задачам работы. Однако, использование в первом и втором положениях уточнений для гранитоидной магмы (водонасыщенной и химически неоднородной) представляется неудачным. Во-первых, следует говорить о редкометалльном расплаве, а не о магме (смеси расплава либо нескольких расплавов, вкрапленников и свободной флюидной фазы), а во-вторых, неясно, что такое химически неоднородная магма. Использование неопределенных терминов вызывает целый ряд вопросов, например, каковы вариации состава слагающих ее расплавов, имеются ли между ними постепенные либо резкие фазовые границы, с какими процессами связана такая неоднородность и т.д.

Выделяется пять пунктов, которые составляют научную новизну работы. Важными для последующих петрологических построений представляются данные об условиях кристаллизации вкрапленников минералов в гранитоидных расплавах, обогащенных редкими литофильными элементами, составе магматогенного флюида, значительной роли флюидно-магматического взаимодействия при формировании расплавов и пород Восточно-Калгутинского дайкового пояса, а также диагностике монтебразита и гердерита в них. Представляет также интерес использование методики прогрева РВ в автоклаве под внешним давлением тяжелой воды с контролем герметичности РВ и корректировкой температуры гомогенизации с учетом давления.

Практическая значимость работы заключается в использовании усовершенствованной методики гомогенизации РВ под внешним давлением. Результаты сравнительного изучения пород двух дайковых поясов, один из которых сопровождается редкометалльным оруденением, могут применяться для научного прогнозирования поиска месторождений редких металлов. Полученные данные используются автором при чтении лекционного курса «Термобарогеохимия» на Геолого-геофизическом факультете НГУ.

Результаты работ представлены в 21 публикации, большинство из которых являются трудами российских и международных научных конференций. Три статьи опубликованы в рецензируемых российских журналах.

В первой главе дается краткий литературный обзор по вопросам классификации, моделям и условиям образования редкометалльных гранитоидов. Достаточно полно рассмотрены проблемы номенклатуры редкометалльных пород, которые до настоящего времени окончательно не разработаны. Несовершенство современной классификации в полной мере отражается и в диссертационной работе. В частности, вслед за

русскоязычными авторами (Козлов, Сवादковская, 1977; Дергачев, 1992; Анникова, 2003; Антипин и др., 2002; Владимиров и др., 2007) среди дайковых пород Южного Алтая по формальному признаку (соотношению K_2O/Na_2O) выделяются онгониты и эльваны. Прежде всего, такая типизация не согласуется с рекомендациями Петрографического кодекса (Петрографический ..., 2009), по которому субвулканические аналоги редкометалльных плюмазитовых гранитов умеренно-щелочного ряда принадлежат к семействам трахириодацитов, трахириолитов и выделяются в виды онгонит и онгориолит, независимо от соотношения K и Na . Характерной (но не обязательной) особенностью этих пород является высокое содержание фтора и наличие топаза во вкрапленниках и матриксе. В известной монографии В.И.Коваленко и Н.И.Коваленко (1976) онгонитами называются как гранит-порфиры с преобладанием Na_2O над K_2O из района Онгон-Хайерхан в Монголии, так и массива Ары-Булак в Восточном Забайкалье, где все разновидности пород имеют калиевую специфику, содержат топаз во вкрапленниках и матриксе (Перетяжко, Савина, 2010). В многочисленных статьях породы массива Ары-Булак всегда называются онгонитами, хотя по формальному признаку (соотношению K_2O/Na_2O) они соответствуют эльванам. Стоит напомнить, что эльваны, впервые обнаруженные в провинции Корнуолл (Halls, 1994), являются обогащенными калием и бором фельзит-порфирами с аксессуарным турмалином. Ни одна из разновидностей описанных в диссертации пород не содержит значительных концентраций бора и поэтому не может называться эльваном. Кроме того, обогащенные бором эльваны (в терминологии первоисточника) и онгониты не встречаются совместно и являются наиболее дифференцированными производными разных магматических систем. Разделение описанных в диссертации пород лишь по формальному признаку на эльваны и онгониты приводит к тому, что в одном дайковом поясе, а, иногда, и одной дайке сосуществуют как онгониты, так и эльваны, что недопустимо. Наличие топаза в онгонитах является характерным, но не обязательным условием для выделения этих пород. Так, ранее, безтопазовые апатит-содержащие редкометалльные субвулканические породы Восточно-Калгутинского дайкового пояса назывались калгутитами (Дергачев, 1988), а теперь онгонитами и эльванами (Анникова, 2003; Владимиров и др., 2007). В онгориолитах Центральной Монголии (районы Дорбент-Дор-Ула, Тэг-Ула, Хэтсу-Тэг) топаз также отсутствует. Поэтому предлагаю отказаться от традиционной терминологической путаницы и все описанные в диссертации породы разделять в соответствии с рекомендациями Петрографического кодекса на калиевые и натриевые разновидности редкометалльных субвулканических пород - онгонитов (богатых фтором для Восточного Казахстана и богатых фосфором для Южного Алтая). Хотелось бы подчеркнуть, что разделение на существенно калиевые и натриевые расплавы весьма характерно для многих редкометалльных гранитоидных магматических систем и часто проявляется в гранитах и полях гранитных пегматитов. Так в жильных сериях гранитных пегматитов (Редкометалльные пегматиты, 1997; Миароловые пегматиты, 1999) обычно присутствуют разновозрастные как существенно калишпатовые (калиевые), так и плагиоклазовые (натриевые) пегматиты, а в крупных телах калишпатовые и плагиоклазовые (альбит-олигоклазовые) первично-магматические зоны встречаются совместно, имеют резкие границы раздела. Существенно калиевые и натриевые породы часто формируются в процессе эволюции единых магматических систем, что подтверждается выводами и в настоящей диссертации.

Из краткого обзора имеющихся *P-T* условий формирования редкометалльных дайковых пород в разных регионах (Монголия, Прибайкалье, Забайкалье, Алтай) делается вывод об относительно низких температурах гомогенизации и высоком флюидном давлении при их формировании. Низкие температуры гомогенизации связаны с присутствия в расплавах высоких концентраций воды и флюсующих элементов (F , P , B) и это подтверждается многочисленными экспериментальными данными. Вывод о высоком флюидном давлении при формировании редкометалльных пород не соответствует действительности. Прежде всего, следует разделять такие породы на вулканические (Дурбент-Дорт-Ула, Тэг-Ула, Хэтсу-Тэг в Монголии, топазовые риолиты США и др.) и субвулканические (многочисленные примеры в разных регионах мира) разновидности. Очевидно, что в вулканиках флюидное давление будет невелико (первые сотни бар). К расчетным оценкам для субвулканических пород следует относиться с большой

осторожность, поскольку они получены зачастую из явно завышенных значений температур гомогенизации с использованием фазовой диаграммы системы первого типа NaCl-H₂O. Наш опыт изучения пород онгонитов массива Ары-Булак (Перетяжко, 2009; Перетяжко, Савина, 2010) показал значительные расхождения в оценках флюидного давления если использовать фазовую диаграмму P-Q типа для природного флюида, состав которого близок к системе NaF-H₂O с небольшой примесью хлоридов. Во вкрапленниках этих пород содержатся первичные существенно газовые включения, сингенетичные РВ. По нашим данным расчетное значение флюидного давления было 400-800 бар, что 2-3 раза ниже полученных ранее (Наумов и др., 1990) оценок.

Во второй главе описываются материалы и методы исследования. Изучено около 80 образцов дайковых пород Ахмировского, Чечекского, Восточно-Калгутинского дайковых поясов и гранитов главных интрузивных фаз, с которыми генетически связаны данные породы, приводятся схематические планы с точками опробования.

Изучались шлифы и плоско-параллельные полированные с двух сторон пластинки, а также протоочки пород. Основной объем экспериментальных работ проводился с РВ во вкрапленниках кварца. Все стадии пробоподготовки и аналитических работ описаны с достаточной степенью детальности. Анализ минералов и стекол РВ выполнен с использованием сканирующих электронных микроскопов с ЭДС спектрометрами и на электронно-зондовых микроанализаторах с волно-дисперсионными детекторами. Содержание широкого круга микроэлементов, а также H₂O и Cl в нескольких зернах слюды, полевых шпатах и стеклах некоторых РВ определено на ионно-зондовом микроанализаторе. Для определения концентрации редких элементов в стеклах РВ также применялся метод лазерной абляции (LA ICP-MS). Определение состава газовой фазы в РВ и флюидных включениях (ФВ), идентификация кристаллических фаз в РВ проводилась методом КР-спектроскопии.

Детально описаны термобарогеохимические методы и особенности применяемой автоклавной методики с использованием тяжелой воды и последующей проверкой герметичности включения на наличие D₂O в стекле. При общем позитивном впечатлении от используемых приемов в этой методике имеется несколько замечаний и вопросов. Вывод об отсутствии значимого влияния объемной диффузии воды (водорода) между расплавом в РВ и окружающей средой (водным флюидом в эксперименте) через минерал-хозяин (кварц), по-видимому, справедлив только до максимальной температуры опытов (710°C) и выдержках до 2 суток при внешнем давлении 1-3 кбар. В работе показано, что таких условий достаточно для получения гомогенных стекол в изученных РВ из кварца. Из текста на стр. 29-30 не ясно, с какими процессами автор связывает понижение температуры гомогенизации при росте внешнего давления флюида в автоклаве (рис. 3). Наиболее очевидное объяснение - сокращением объема вакуоли РВ за счет сжимаемости матрицы минерала-хозяина (кварца). Фактором, препятствующим сокращению объема вакуоли, будет рост флюидного давления в РВ до полного растворения воды в новообразованном расплаве. Следует также учитывать увеличение объема РВ за счет частичного растворения кварца на его стенках, возможный совместный захват включениями расплава и пузырей свободной флюидной фазы. Кроме того, график на рис. 3 построен для РВ из разных зерен. Очевидно, что содержимое РВ в разных зернах может различаться по соотношению компонентов и, особенно, флюида. В связи с этим хотелось бы видеть более продуманную аргументацию методических приемов и вводимых температурных поправок для T_{гом}.

Существует и более серьезное замечание. Применяемая методика нацелена на получение корректных значений T_{гом}., которые зависят от состава и содержания флюида в расплаве РВ. Насколько эти значения соответствуют первичному расплаву? Очевидно, что после захвата расплава в РВ происходило переуравновешивание (по воде, водороду) с окружающим расплавом через матрицу минерала-хозяина за счет диффузионного обмена. Чем выше температура и давление, тем быстрее проходят такие процессы. По экспериментальным данным, например, с повышением температуры до 800°C и выдержках до 45 суток стекла РВ теряют около 70% воды. Считается, что содержание воды в стеклах РВ близко к истинной концентрации в расплаве для вкрапленников минералов, которые быстро переходят из P-T условий магматической камеры, например, при образовании игнимбритов, туфовых отложений и т.д. В этой связи получаемые T_{гом}.

для зерен кварца, длительное время находившихся в расплаве после образования РВ, могут быть весьма далеки от истинной температуры захвата РВ, а содержание воды в стеклах будет приближаться к водосодержанию остаточного расплава и не соответствовать исходному значению. Учитывать такие особенности особенно важно в связи с тем, что флюидное давление рассчитывается на значение температуры гомогенизации РВ.

В главе 3 представлены данные по истории изучения, геологической позиции и возрасту Чечекского и Ахмировского дайковым поясам (Восточный Казахстан). Раздел петрография, геохимия и номенклатура пород следовало бы существенно расширить и доработать. Особенно это касается краткой геохимической характеристики пород. Явно не хватает анализа мультиэлементных диаграмм для примесных компонентов, нормированных по какому-либо стандарту (верхней коре, региональным средним и т.д.). Без этого трудно оценить сходства либо различия микроэлементного состава онгонитов данных поясов. Также почти нет анализа нормированных спектров распределения РЗЭ. Между тем, из рис. 11 следует, что рост редкометалльности пород сопровождается возрастанием не только уровня их суммарного содержания и доли тяжелых лантаноидов, но и увеличением значений тетрад-эффектов в первой, третьей и четвертой тетрадах. Подобные тетрад-эффекты весьма характерны для нормированных РЗЭ спектров Li-F гранитов, онгонитов и других обогащенных фтором магматических, субвулканических пород, кислых вулканитов. Их появление объясняется процессами фторидно-силикатной несмесимости и флюидно-магматическим взаимодействием (см. работу Перетяжко, Савина, 2010А, где приводится обзор многочисленных публикаций по этой теме).

В разделе Минералогия последовательно описаны породообразующие и некоторые акцессорные минералы. При общем позитивном впечатлении от содержания данного раздела имеется целый ряд замечаний. К сожалению слюды из пород дайковых поясов изучены только локальными микроскопическими методами без трудоемкого выделения мономинеральных фракций, хотя это возможно, судя по размеру вкрапленников на фотографиях шлифов. Такой методический подход вынуждает автора использовать расчетную схему (Tishendorf, 1997) для оценок содержания Li по концентрации F. Однако эта схема применима лишь для триоктаэдрических слюд и не может быть использована для диоктаэдрических мусковитов, фенгит-мусковитов (связи между F и Li здесь другие). Поэтому расчеты Li для всех слюд в таблице 3 некорректны. Следствием такого ошибочного подхода является большое количество фигуративных точек составов на диаграмме $Li-R^{2+}-R^{3+}$ (рис. 17) между триоктаэдрическими лепидолитами (полилитионитом, трилитионитом) и мусковитами, где существует разрыв смесимости. О существовании разрыва между этим слюдами косвенно свидетельствуют и данные на рис.18, где литиевая слюда образует самую позднюю кайму без переходных зон на лейсте мусковита. Для калиевых полевых шпатов приводится мало данных. В частности, не определена степень структурной упорядоченности и поэтому неясно, какому структурному типу они соответствуют – санидину, ортоклазу либо микроклину. Такие определения можно сделать петрографическими методами без рентгенофазового анализа и были бы полезны для подтверждения субвулканического характера пород. Нет ясно также, есть ли пертиты в КПШ? Приведено очень мало информации (одна страница) о многочисленных акцессорных минералах.

Значительная часть главы посвящена описанию термометрических свойств РВ, термокриометрии ФВ и определению состава стекол в РВ. На мой взгляд, здесь представляет интерес диагностика метана в составе флюидной фазы в РВ и первичных магматических ФВ. Микроскопическими методами определены макрокомпоненты, R, F, Cs, Rb, Cs. Для всех составов стекол характерны очень низкие суммы компонентов (90-95 мас.%). Для стекол шести включений из кварца онгонитов Чечекского комплекса на ионном зонде определен широкий круг микроэлементов, включая воду. Даже с учетом этих данных по воде и другим элементам-примесям суммы в анализах стекол этих РВ не поднимаются выше 93-96 мас.%. Это никак не обсуждается. Из примечания к таблице 8 следует, что в таблице показаны стекла как герметичных, так и негерметичных в отношении воды РВ, полученные в автоклавных экспериментах. Из вышесказанного следует, что при неопределенности по летучим компонентам сопоставлять составы стекол РВ и пород, для которых характерно небольшое количество П.П.П. (0.1-0.7

мас.%), необходимо на безводной основе (т.е. после нормировки к 100%) с приведением исходных сумм анализов. После этого серия графиков на рис. 30 будет более информативна и станет ясно, каким образом эволюционировал макрокомпонентный состав расплавов. Было бы также полезно показать точки анализов на диаграммах TAS ($\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) и Шэнда (A/CNK-A/NK). При анализе диаграммы Qtz-Ab-Or необходимо указать, каким методом получены составы модальных компонентов. В зависимости от выбранного метода расчета (CIPW нормы, баланс масс) положение точек на диаграмме может измениться.

В главе 4 описывается история изучения, геологическая позиция, возраст и связь с оруденением для Восточно-Калгутинского пояса редкометалльных даек. В разделе петрография и номенклатура пород автор вынужден называть обогащенные фосфором породы эльванами и онгонитами даже в пределах одного дайкового тела (см. комментарии выше). Геохимическая характеристика пород, в основном, сводится к анализу вариаций концентраций петрогенных элементов с детализацией по Ca и P. Кратко обсуждаются вариации содержания Li, Rb, Cs и PЗЭ. Также как и в предыдущей главе, не приводится геохимическая характеристика пород на мультиэлементных диаграммах и не анализируются нормированные редкоземельные спектры, в которых наблюдаются значимые тетрад-эффекты. Основной вывод данного раздела сводится к тому, что породы этого пояса имеют богатые фосфором калиевые и натриевые в разной степени редкометалльные разновидности, которые встречаются как совместно в одних, так и в разных дайковых телах. К сожалению, этот вывод в отношении большинства примесных элементов из таблицы 9 не обсуждается и не подкреплен графическим материалом. Из этой таблицы следует, что содержание бора (характерного примесного элемента для “нормальных” эльванов) в средних РМ и УРМ онгонитах составляет 42-128 ppm, а в РМ и высоко РМ эльванах – 41-65 ppm. Единичные находки кристаллических включений турмалина обнаружены лишь в матриксе и во вкрапленниках кварца, мусковита и полевых шпатов из УРМ онгонитов. Это подтверждает, что выделяемые в этом дайковом поясе существенно калиевые породы не являются эльванами.

В минералогическом разделе главы с разной степенью детальности описаны кварц, слюды (мусковит, биотит), полевые шпаты и акцессорные минералы (апатит, фосфаты и др.). Замечания относительно расчетов концентраций Li в мусковитах методом Тишендорфа из предыдущей главы в полной мере относятся и к этому материалу. Так, на стр. 96 пишется, что расчеты по представленной формуле наилучшим образом совпадают с данными, полученными на ионном зонде. Это утверждение не следует из таблиц 11 и 12. Например, максимальное содержание Li в пересчете на Li_2O по данным ионного зонда в слюде под номером 142 составляет 0,7 мас.%, а по формуле Тишендорфа для максимальной концентрации фтора 4,61 мас.% будет в три раза выше – 2,18 мас.% Li_2O . Не ясно, о каком совпадении идет речь? К чему использовать эту формулу для триоктаэдрических слюд, когда автор располагает значительным объемом данных по концентрациям Li и F в мусковитах, которых достаточно для вывода новой зависимости и расчета по ней более обоснованных концентраций Li?

На стр.97 противоречивый текст, из которого не ясно, какой мусковит кристаллизовался раньше – в основной массе либо во вкрапленниках? Для биотитов расчеты содержания Li вполне оправданы. Из описаний биотита также очевидно, что между триоктаэдрической слюдой (биотитом) и более поздним диоктаэдрическим фенгит-мусковитом, образующим каймы, нет промежуточных составов, что подтверждает наличие разрыва смесимости, о котором я писал выше. Вполне логичным кажется определение последовательности относительной температуры кристаллизации слюд по содержанию в них титана. Можно было бы также сделать оценки концентрации фтора в магматических флюидах, используя его концентрацию в биотите и апатите на основе известных геофториметров А.М. Аксюка (2002). Полевые шпаты из этих пород описаны намного детальнее, чем в предыдущей главе и здесь есть упоминание, что КПШ представлен ортоклазом, хотя без каких-либо комментариев о степени его структурной упорядоченности. Интересным наблюдением является обнаружение высоких концентраций фосфора в ПШ, а также доказательство изморфного вхождения P в структуры минералов по отсутствию корреляции между концентрациями Ca и P, характерной для апатита. Стоит отметить, что низкие температуры совместной

кристаллизации ПШ, которые следуют из их состава, в т.ч. и по термометру Т.Барта, могут быть не атрефактом, а следствием, например, кристаллизации вкрапленников из переохлажденного в разной степени онгонитового расплава.

В этой главе приводятся данные по акцессорной минерализации, особенно детальные для апатита и Р-содержащих минералов. Здесь также есть ряд замечаний и вопросов. Не понятно, почему, описанный на стр. 108 вкрапленник кварца с включениями сульфидов имеет гидротермальное происхождение и был захвачен онгонитовым расплавом? Тогда агрегаты сульфидных минералов в матриксе также не связаны с кристаллизацией расплава и попали в него из внешнего источника? Интересен факт обнаружения образца онгонита, в котором флюорит занимает до 10-15% объема породы. Автор не уделяет внимания этому образцу, хотя его детальное минералогическое и геохимическое изучение может привести к находке реликтов фторидно-кальциевого расплава, несмесимого с онгонитовым расплавом. Такие реликты впервые обнаружены и описаны в онгонитах массива Ары-Булак (Перетяжко и др. 2007). Следствием фторидной (возможно, фторидно-фосфатной) несмесимости являются тетрад-эффекты в нормированных спектрах лантаноидов (Перетяжко, Савина, 2010Б), которые также характерны для дайковых пород Восточно-Калгутинского пояса (рис. 41). Практически не описаны минералы-окислы Ti и Fe, хотя их можно использовать для оценок температур кристаллизации и окислительно-восстановительных условий по летучести кислорода. Результаты детальны работ автора привели к надежной диагностике монтебразита и гердерита. Показано, что эти минералы являются первично-магматическими и кристаллизовались на позднемагматической стадии при формировании наиболее ультраредкометалльных разностей онгонитов.

Общим недостатком минералогической части работы является отсутствие данных (рентгеновских и валовому составу) по мономинеральным выборкам, которые можно было бы получить для крупных вкрапленников полевых шпатов, слюд и некоторых акцессорных минералов.

В завершающем разделе главы приводятся результаты исследований РВ и ФВ. Из детальны описаний РВ не ясно, каким способом проводилась идентификация многочисленны минеральны фаз в кристаллических включениях, агрегатах внутри РВ и среди недоплавленны стеклов РВ после автоклавны опытов. Это данные микрозондовы исследований вскрыты РВ, КР-спектроскопии, оптическая диагностика? Очевидно, что интерпретация солевого состава растворов ФВ на основе значений температур эвтектики только на хлоридную систему, где доминирует $MgCl_2$, весьма смелое и непроверенное предположение. Состав растворов, вероятно, более комплексный и содержит фтор, фосфор? Среди аналитическы методов, применяемы в настоящей работе, упоминается лазерная абляция (стр. 26) для стеклов РВ, хотя результаты этого анализа не приводятся и не обсуждаются. Данный метод можно было бы использовать для уточнения солевого состава растворов ФВ.

Замечания относительно особенностей состава стеклов и методическы приемам их интерпретации аналогичны, сделанным в предыдущей главе. К ним, прежде всего, относятся низкие суммы анализов (90-95 мас.%), которые существенно не улучшаются с учетом концентраций воды и других компонентов, определенных на ионном зонде (табл. 17, 18). Автор не может объяснить значительный недостаток сумм анализов (стр. 122). Особо подчеркну, что во всех случаях (табл. 7, 17) составы водосодержащы стеклов РВ определялись микрозондовым (ВДС) методом, использование которого в разных режимах даже широким зондом диаметром 20 мкм и более приводит к значительной потере не только натрия (до 50 отн.%), но и калия (до 20-30 отн.%). Я рекомендовал бы провести повторные анализы всех стеклов РВ методом СЭМ ЭДС, который имеет режимы съемки, практически исключают потерю щелочей. Не исключено также, что часть летучих терялась из водосодержащы стеклов с течением длительного времени после автоклавны экспериментов? Все это требует проведения дополнительных методическы работ. К сожалению, недоопределение щелочей в стеклах РВ приводит к значительным вариациям индекса A/CNK и соотношения Na и K. Еще раз подчеркну, что при такой неопределенности по летучим компонентам и значительным невязкам сумм анализов сопоставлять составы стеклов РВ и пород необходимо на безводной основе.

В главе 5 дается сравнительная характеристика условий формирования дайковых поясов, их связь с оруденением. Здесь проводится обобщение всех представленных в работе данных.

В дополнение к методическим замечаниям по применяемой автоклавной методике (комментарии выше) необходимо заметить, что проникновение воды из внешнего источника (флюидного заполнения автоклава) в расплав негерметичных РВ по данным автора (стр. 129) не оказывает заметного влияния на соотношение концентраций петрогенных элементов. Однако, это будет приводить к насыщению расплава водой при данных *P-T* условиях опыта и, как следствие, изменять (понижать ?) температуру гомогенизации.

Рассматривается последовательность кристаллизации минералов из редкометалльных расплавов и делается вывод (в основном на сопоставлении концентрации фосфора в стеклах РВ с расчетными значениями в расплаве по индексу A/CNK и содержанию Р в КПШ), что вкрапленники кварца, ПШ и слюд формировались в расплавах магматической камеры до их внедрения и образования даек на месте становления. Иными словами, в дайко-вмещающее пространство внедрялась гранитоидная магма, содержащая расплав при температурах ниже его ликвидуса. Этот вывод хорошо аргументирован и не вызывает возражений. Хотелось бы, однако, отметить, что называть такие камеры глубинными преждевременно (см. комментарии ниже). Несколько странным выглядит предположение, основанное на данных катодолюминесценции, о наличии обломков кварца из гранитов главной фазы и/или рудных жил ?, которые послужили затравками для последующего роста некоторых вкрапленников кварца. По-видимому, разными режимами роста вкрапленников в пределах одной либо нескольких магматических камер объяснить вариации их зональности намного проще без привлечения такой экзотической модели ?

Далее приводится краткое обобщение минералого-геохимических особенностей редкометалльных дайковых пород и анализируются основные характеристики состава расплавов при кристаллизации слагающих их минералов. Выше представлены мои комментарии к главам 3 и 4, где эта информация обсуждалась в более развернутом виде. Сопоставление составов пород, минералов-вкрапленников и данных по РВ приводят автора к первому защищаемому положению.

В значительном по объему разделе 5.4 анализируются причины неоднородности состава пород дайковых поясов. Обобщаются петрохимические и минералогические свидетельства гетерогенности состава пород. В основном здесь кратко излагаются выводы, представленные в главах 3 и 4, основанные на составах минералов и стекол РВ. Автор считает, что РМ и УРМ разновидности онгонитов Чечекского дайкового пояса образовались из разных расплавов на уровне магматических очагов (стр. 139). Не ясно, однако, на каком основании необходимо привлекать разные очаги, если такие расплавы могли быть производными единого магматического очага на разных по времени стадиях его дифференциации. Далее причины химической неоднородности расплавов связываются с процессами кристаллизационной дифференциации и флюидно-магматического взаимодействия. Здесь уже для Чечекского пояса обосновано привлекается модель дифференциации РМ расплава из единой магматической камеры, т.е. для системы близкой к закрытой (стр. 141). В этой связи рекомендовал бы лучше согласовывать по смыслу разные части текста работы. Подчеркну, что эти и дальнейшие выводы по Восточно-Калгутинскому поясу сложно аргументировать без детального анализа геохимических особенностей пород на мультиэлементных диаграммах. Не обсуждается также такая особенность РВ как близость их состава в породах с разным соотношением щелочей Na и K. Особенно это касается дайки, сложенной породами, обогащенными как натрием, так и калием. Между тем, это имеет важное петрологическое значение, поскольку необходимо установить, где произошло магматическое разделение расплавов. Если в единой магматической камере, то почему нет контрастных по K и Na стекол РВ ? Если уже после внедрения, то как это могло произойти в быстро остывающем дайковом теле малой мощности, находящемся среди относительно холодных вмещающих пород ?

Необходимо отметить, что при дифференциации гранитных расплавов могут быть разные пути эволюции РЗЭ как с обеднением поздних дифференциатов лантаноидами,

так и с их накоплением (Козлов, 2009; Перетяжко, Савина, 2010Б и др.), что и наблюдается в центральной дайке для обогащенных калием онгонитов. В рассуждениях по соотношению Rb и Sr не учитывается описанный факт для онгонитов массива Ары-Булак, где концентрации Sr иногда достигают ураганных значений (Перетяжко и др., 2011) в участках пород, где имеются реликты фторидно-кальциевых расплавов (об этом писалось выше). В таких породах комбинированные коэффициенты распределения элементов совсем иные. В этой связи расчеты, представленные на стр. 143, теряют смысл и высокие концентраций Sr могут быть следствием процессов фторидно (фосфатно)-силикатной несмесимости, которые протекали без участия каких-либо гипотетических дополнительных источников.

Вызывает также много вопросов рассуждения о флюидно-магматическом взаимодействии, которое привело к химической гетерогенности редкометалльных расплавов (т.е. образованию существенно калиевых и натриевых дифференциатов с контрастными геохимическими характеристиками) при формировании даек, особенно, центральной в пределах Восточно-Калгутинского дайкового пояса. Здесь приводится попытка объяснить смещение состава эволюционирующего расплава на диаграмме кварц-ортоклаз-альбит в сторону кварцевой вершины с уменьшением щелочей Na и K при возрастающей роли калия. Прежде всего, у меня есть сомнения в корректности анализов стекол РВ методом ВДС (см. выше), который может привести к значительной потере при анализе не только натрия, но калия. Потеря щелочей может свести эту зависимость к аналитическому артефакту. Допустим, такой тренд подтверждается, что вполне вероятно. Для его объяснения предлагается одна из моделей эволюции пегматитовых расплавов гранитного состава с участием флюидной фазы, детально обсуждаемая в многочисленных публикациях, начиная с работ Джанса, Бэрнема (1969). Данная модель неоднократно критиковалась, например, в обширной монографии Д.Лондона (2009). Основным ее недостатком является участие во флюидно-магматическом взаимодействии огромного количества флюида, объем которого в 3-4 раз больше объема расплава, через который флюид должен "просачиваться". Не следует упрощать чрезвычайно сложные процессы дегазации с гравитационным всплытием пузырей свободной фазы в дегазирующем кислом силикатном расплаве высокой вязкости, где происходят конвекционные течения магмы. Эти проблемы также детально обсуждаются в многочисленной литературе. Не вдаваясь в обширную дискуссию по этому сложному вопросу необходимо вспомнить и о других вероятных моделях гетерогенизации гранитоидных расплавов. Так А.М.Маракушевым и Е.Б.Яковлевой (1992) вслед за Я.И.Френкелем (1948) предполагалось, что в надликвидусных условиях вязкие кислые силикатные субэвтектические расплавы нестабильны и распадаются (расслаиваются). При этом подчеркивается, что эвтектические силикатные расплавы могут сохранять однофазное (гомогенное) состояние до ликвидуса или расслаиваться с образованием контрастных по составу метастабильных расплавов (жидкостей) при появлении надликвидусных куполов фазового разделения. Предполагается, что расслоение субэвтектического силикатного расплава может быть вызвано резко меняющимися *P-T* параметрами, например, ростом флюидного давления, сбросом давления либо снижением температуры. Подобный механизм расслоения риолитового расплава, например, предлагался для объяснения причин формирования полосчатых лав в Центральном Казахстане (Маракушев, Яковлева, 1992), а также экструзий и потоков флюидалных риолитов Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса (Попов, Гребенников, 1995). Таким образом, нельзя считать доказанным влияние флюидно-магматического взаимодействия в понимании автора на формирование очагов гетерогенной гранитоидной магмы, из которых формировались дайки Восточно-Калгутинского пояса.

Далее в работе обсуждаются *P-T* параметры кристаллизации вкрапленников в очагах редкометалльных магм. Давление оценивалось по косвенным признакам – наличию трещин декрепитации вокруг РВ в кварце, а также из анализа минерального парагенезиса с участием кварца и мусковита. В обоих случаях такие расчеты имеют очень большую неопределенность. Трещины декрепитации появляются при разной величине ΔP , которая зависит от внутривакуольного давления (функции содержания флюида в расплаве РВ), размера РВ, толщины стенок вокруг РВ в минерале-хозяине и

величине внешнего давления. Они могут появиться без всякого перемещения вкрапленника в область с меньшим литостатическим давлением, например при декомпрессии магматической камеры. Такие трещины, например встречаются во многих РВ из минералов гранитных пегматитов, которые формировались в закрытых камерах на месте своего становления. При анализе P - T условий парагенезиса кварц-мусковит (рис. 67) неясно, почему берется очень приблизительное положение солидуса гранита, когда РВ захватывались вкрапленниками в магматической камере, где расплав находился в температурном диапазоне между ликвидусом и солидусом и был далек до полной кристаллизации? По какой причине положение линии устойчивости мусковит-кварц смещено в область больших P - T параметров? Оценки давления по сингенетическим РВ и ФВ также могут давать существенные отклонения в зависимости от величины $T_{гом}$ и положения изохор для предполагаемого состава водного раствора (см. комментарии выше). Поэтому к полученным высоким значениям флюидного давления (3,5-6 кбар) нужно относиться с большой осторожностью. Автор приходит к выводу о значительной глубине магматической камеры, из которой происходило внедрение гетерогенной онгонитовой магмы. Подчеркну, что высокое флюидное давление не свидетельствует о большой глубине магматической камеры. В общем случае, оно может быть достигнуто в закрытой системе на разных глубинах, в т.ч. и в близповерхностных условиях. Очевидно, благодаря избыточному относительно литостатического флюидному давлению происходит перемещение на значительные расстояния магмы при формировании жильных и дайковых тел после вскрытия магматической камеры. Только представленные далее в работе ссылки на геолого-геофизические и изотопно-геохимические данные по Калгутинской РМС позволяют весьма приблизительно согласовать полученные величины высокого флюидного давления с глубиной магматического очага. Температуры кристаллизации вкрапленников определены в рамках принятых допущений с использованием автоклавной методики для гомогенизации РВ (см. комментарии выше).

В разделе 5.6 рассматривается связь образования редкометалльных дайковых поясов с оруденением. Здесь следует отметить интересное предположение о связи оловянной металлогенической специализации дайковых интрузий Восточного Казахстана с высоким содержанием метана в магматическом флюиде. На примере Калгутинской РМС кратко обсуждается возможный источник рудоносного флюида и место генерации редкометалльных расплавов. Мне не понятно, почему в работе очагам онгонитовых магм приписывается преимущественно глубинный источник (стр. 161-162)? Такие очаги могут образоваться как в нижней, так в верхних частях магматических систем. Например, относительно крупные интрузивы редкометалльных кварцевых порфиров, дайки топазитов и онгонитов, в т.ч. онгониты массива Ары-Булак вблизи гранитов Адун-Челона (Восточное Забайкалье) формировались в близповерхностных условиях при давлении менее 1 кбар. По модели автора очаги редкометалльного онгонитового расплава, из которых происходило внедрение магмы и образование даек Чечекского и Ахмировского поясов, также располагались в остаточных очагах верхней части Калбинского гранитного батолита (рис. 71). Схема образования Восточно-Калгутинского пояса сомнительна (рис. 72). В ней автор пытается увязать модель флюидно-магматического взаимодействия, когда через редкометалльный расплав в магматической камере длительное время проходил объем флюида во много раз превышающий объем расплава. Кратко критические замечания к этой модели приведены выше. К ним также можно добавить изотопные соображения по Rb-Sr системе для редкометалльных гранитоидных расплавов (см. работу Ю.А.Костицына с соавторами, 2004). Из этих данных однозначно следует, что очаги, в которых редкометалльные расплавы накапливаются существуют очень небольшое время – десятки-первые сотни тысяч лет. В противном случае при крайне высоких концентрациях Rb в расплаве произойдет значительное накопление радиогенного Sr и начальное изотопное отношение Sr достигнет величин намного выше 0,704-0,706, чего не наблюдается. За столь короткий промежуток времени с учетом реологии редкометалльных расплавов, скорости гравитационного всплытия флюидных пузырей и конвекционных течений магмы ни о каком значительном просачивании флюида через очаг расплава говорить не приходится. Такая модель предлагается в связи с тем, что автор не видит альтернативы флюидно-магматическому взаимодействию с участием огромного объема флюида для объяснения причин разделения гранитоидных расплавов

на существенно калиевые и натриевые расплавы в единой магматической камере. Отличие модели Калгутинской РМС от Чечекского и Ахмировского поясов, кроме геохимических особенностей магмы, в том, что здесь очаг редкометалльного расплава находился внутри Калгутинского гранитного массива и в нем произошли процессы магматической гетерогенизации. Внедрение гетерогенной магмы из одного либо нескольких остаточных очагов привело к формированию контрастных по соотношению К и Na пород и дайки, где эти породы находятся совместно.

В заключении хотелось бы сказать, что диссертационная работа написана в хорошем стиле, прекрасно оформлена и отредактирована, содержит обширный список цитируемой литературы. Высказанные в отзыве замечания ни в коем случае не умаляют очевидных достоинств работы и часто относятся к методическим подходам, используемым в работе. В рамках принятых допущений и моделей основные защищаемые положения хорошо аргументированы и не вызывают возражений. Петрологическая интерпретация полученных данных требует более глубокого анализа и переосмысления. Надеюсь, это будет выполнено в дальнейшем. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание диссертационной работы и защищаемые положения.

Все вышесказанное позволяет сделать вывод, что представленная работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Соколова Екатерина Николаевна, достойна присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 «петрология, вулканология».

Ведущий научный сотрудник лаборатории геохимии
гранитоидного магматизма и метаморфизма,
доктор геолого-минералогических наук

07.05.2014 г.
г. Иркутск



/Перетяжко Игорь Сергеевич/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии
им. А.П. Виноградова СО РАН, (664033, г.Иркутск, а/я 304, ул. Фаворского, 1А)
e-mail: pgmigor@igc.irk.ru
р.т.: 83952 425936

