

Отзыв официального оппонента

на диссертацию А.С. Девятияровой

«Кочумдекский контактовый ореол спуррит-мервинитового метаморфизма: минералогия, геохимические особенности, история становления»,
представленную на соискание учёной степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 — «минералогия, кристаллография».

Диссертация Анны Сергеевны Девятияровой посвящена процессам контактового метаморфизма, давно и успешно изучаемым Новосибирской метаморфической школой. Во многих случаях на примере контактового метаморфизма легче понять многие аспекты процессов метаморфических преобразований. Особый интерес представляют процессы высокотемпературного и сверхвысокотемпературного контактового метаморфизма, довольно редкие в природе и позволяющие проследить ранние стадии контактового метаморфизма непосредственно вблизи интрузий. Это определяет **несомненную актуальность** представленной работы. Однако стоит отметить, что изучение метаморфических процессов при контактовом метаморфизме не может заменить изучение процессов при региональном метаморфизме. Скорее, важно их сравнение, чтобы понять сходство и разницу этих процессов.

Работа выполнена на **богатом фактическом материале**, как собранном в ходе полевых работ с участием автора, так и предоставленном предшествующими исследователями Кочумдекского ореола. Последнее важно, так как, во-первых, сбор материала непосредственно на объекте весьма затруднён, а, во-вторых, появляется возможность изучить уже существующий материал современными методами и по-новому взглянуть на многие ранее полученные результаты. В работе применены многочисленные аналитические методы, многие из которых освоены и применены автором работы. Личный вклад автора включает участие в полевых работах, в ходе которых проводились геологические исследования объекта и отбор образцов, пробоподготовку, выполнение ряда аналитических исследований под руководством квалифицированных специалистов и участие в других исследованиях, а также интерпретацию полученных данных.

Научная новизна работы определяется тем, что в работе приведено значительное количество полученных автором работы новых фактических данных по составу протолита мраморов, минеральному и химическому (макро- и микроэлементному) составу контактово-метаморфических пород Кочумдекского контактового ореола и особенно составу, распределению и поведению при метаморфизме сульфидов, в том числе таких редких, как расвумит и джерфишерит, а также по возрасту контактового метаморфизма. Кроме представленных фактических данных, работа также содержит предложенные автором интерпретации новых и уже существующих данных, обогащающие и расширяющие наше понимание процессов контактового метаморфизма.

Диссертационная работа состоит из Введения, 5 глав и Заключения, содержит 49 рисунков, 37 таблиц и 1 приложение. Список цитируемой литературы включает 203 работы, включая современные публикации, в том числе в международных журналах. Результаты автора, представленные в диссертации, представлены в 14 публикациях, включая 7 рецензируемых статей, опубликованных в ведущих отечественных и в международных журналах. Основные выводы автора диссертации представлены в трёх защищаемых положениях.

В главе 1 рассмотрены положение интрузий и вмещающих их пород, геологическая позиция зонального контактового метаморфизма и строение метаморфического ореола. Описание достаточно подробное. В главе обрисована общая геологическая ситуация, приведено положение изученных и отобранных пород, которое может помочь разобраться в их соотношениях. К сожалению, из описания в этой и последующих главах не понятно, изучались ли автором известняки вне контактового ореола, не подверженные влиянию контактового метаморфизма. Также из геологического описания остаётся неясным, проявлен ли в пределах описываемого участка или в его окрестностях низкоградный региональный метаморфизм уровня цеолитовой – пренит-пумпеллиитовой фации, обычный для сибирских траппов.

Ещё одно небольшое замечание к этой главе – при характеристике контактового метаморфизма его уровень описывается в терминах то фаций роговиков, то фаций метаморфизма карбонатных пород. Для большей понятности текста стоило бы описать соотношение между фациями в породах разного состава, а ещё лучше применять единую схему фаций контактового метаморфизма, независимую от состава пород.

В главе 2 детально описаны изученные образцы, их характеристика, места отбора, методики применяемых аналитических исследований, указан личный вклад диссертанта в аналитические исследования. Подробное описание методик показывает внимание автора работы к качеству аналитических данных. Используются современные методики и современное оборудование, что позволяет с доверием относиться к полученным автором данным.

В главе 3 рассмотрен минеральный, макро- и микроэлементный состав габброидов, вызывающих контактовый метаморфизм, осадочных пород, подвергшихся этому метаморфизму, и собственно контактово-метаморфических пород. На основе петро- и геохимических данных делаются выводы о первичной природе протолита карбонатных и пелитовых пород из контактово-метаморфического ареала. Анализ детальный и в целом убедительный, однако к нему есть некоторые замечания и вопросы:

- В работе изучены мраморизованные известняки в составе контактового ареола. Но, видимо, совсем не изучались немраморизованные известняки, составы которых могли быть приняты за точку отсчёта, поэтому такие составы реконструируются;
- На диаграммах А и Б рис. 3.2 и диаграмме В рис. 3.4 видны три тренда вариаций состава мраморов. Автор связывает эти тренды с разной степенью декарбонатизации (стр. 57), однако не объясняет, каким образом декарбонатизация при изохимическом метаморфизме может приводить к изменению отношений породообразующих элементов. Анализ остальных диаграмм на этих рисунках свидетельствует, что отношения $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, TiO_2/MgO , $\text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ остаются постоянными, и только отношения $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и CaO/MgO меняются в зависимости от степени декарбонатизации. Это означает, что обсуждаемый метаморфизм не полностью изохимический: Si, Al, Ti, Mg и Fe ведут себя в контактовом ореоле инертно, а Ca подвижен. Инертное поведение в породах ореола демонстрирует также сера (рис. 3.4);
- Анализ диаграмм на рис. 3.5, показывающих спектры распределения REE и Y в породах, демонстрирует, что в мраморах ареола, в зависимости от уровня метаморфизма, меняется абсолютное содержание REE при сохранении их спектров. Видимо, это можно объяснить тем, что в углекислотной среде REE, наряду с Ca, тоже становятся подвижными, но в равной степени, благодаря чему спектры REE в мраморах сохраняются;
- Судя по рис. 3.6, высоkozарядные элементы ведут себя в целом инертно не только при термическом преобразовании мраморов, но и при метасоматозе (скарнировании);

- На стр. 51 упоминается серая окраска мраморов. Если эта окраска вызвана углеродом, что кажется наиболее вероятным, то исследование формы нахождения углерода в мраморах, скажем, методом рамановской спектроскопии, может дать дополнительные сведения о термической эволюции мраморов;
- На той же стр. 51 автор сообщает, что минеральные индивиды в мраморах крупные, до 5 мм. Это свидетельствует о существенной скорости массопереноса на прогрессивной стадии, не ограничивающей скорость реакций. Лимитирующей стадией реакций массоперенос становится позже, на ретроградной стадии метаморфизма, как свидетельствуют результаты, описанные в следующих главах.

Таким образом, следует уточнить выводы автора: обсуждаемый метаморфизм не полностью изохимичен; отдельные элементы (Са и REE), судя по приводимым данным, становятся подвижными в водно-углекислотном флюиде. При этом содержание REE в мраморах падает, а характер их распределения остаётся практически постоянным. Однако это перераспределение касается элементов, слагающих сами мрамора. Габброиды являются источником тепла, но не флюида и не переносимых им макрокомпонентов; сколько-то существенного привноса компонентов из габброидов в мрамора не происходит. Таким образом, вывод, сформулированный в первом защищаемом положении, под сомнение не ставится.

Глава 4 посвящена описанию минералов, слагающих магматические, осадочные и контактово-метаморфические породы контактового ареала. Описание очень подробное и детальное – глава является самой большой по объёму (более трети от всей работы). Приводимые данные представляют самостоятельную научную ценность. Детально охарактеризованы основные типы пород ореола (к сожалению, опять – за исключением неметаморфизованных известняков). Очень большое внимание уделяется поведению сульфидов, которые обычно игнорируются при изучении метаморфических процессов. Можно заключить, что данные по составам и поведению сульфидов, полученные автором работы, являются одними из наиболее интересных результатов работы. Особенно интересно появление здесь редких сульфидов – расвумита и джерфишерита и их связь с контактовым воздействием габброидов, в том числе с подвижностью хлора. К этой главе тоже есть некоторые вопросы и замечания:

- В 3 и 4 главах перечислены минералы габброидов, охарактеризован их химический состав. При изучении термальных ореолов тел габброидов большой интерес должны представлять РТ–условия образования самих габброидов и их послемагматическая эволюция. Каковы температура и давление кристаллизации долеритов? Их вполне возможно определить из термобарометрических исследований, а такие данные были бы полезны при оценке начальных условий метаморфизма;
- Мне кажется, что стоит изучить постмагматические (автометаморфические) и, возможно, регионально-метаморфические изменения в габброидах. Есть ли в траппах какие-либо реакционные структуры между оливином и плагиоклазом? Каковы соотношения между первичными и вторичными минералами, в том числе соотношения первично-магматических минералов с такими минералами, как роговая обманка, хлорит, ильменит, алланит? Являются ли слюды в долеритах первично-магматическими или вторичными, возникающими при субсолидусных реакциях? Какие минеральные реакции в породе отвечают процессам остывания и гидратации? Проявлены ли на изучаемом участке процессы регионального низкоградного (уровня цеолитовой – пренит-пумпеллиитовой фации) метаморфизма, хорошо известные в сибирских траппах? Кстати, историю остывания траппов также можно проследить, хотя бы частично, по структурам распада

первичного титаномагнетита с выделением ильменита. Знание термической магматической и постмагматической эволюции габброидов помогает понять эволюцию связанного с ними контактового метаморфизма;

- При описании мергелистых известняков в главах 3 и 4 перечислены довольно высокотемпературные (явно не аутигенные) минералы (пироксены, полевые шпаты и т.д.), но не понятно, являются ли эти минералы, все или частично, детритовыми или все они возникли под воздействием контактового метаморфизма. Встречаются ли они все вместе, или можно видеть какое-то зональное их распределение в породах ореола? Из текста неясно так же, являются ли минералы пелитовых прослоев (диопсид, калишпат и плагиоклаз ± актинолит, гроссуляр) парагенетичными? За счёт каких минералов они образуются — каковы первичные минералы пелитовых прослоев в стороне от контактового ореола?
- Автор в работе говорит об этом, но, возможно, стоит отдельно подчеркнуть различие в поведении галогенов: если фтор при контактовом метаморфизме мраморов попадает в мрамора из габброидов, что проявляется в появлении куспидина, то хлор ведёт себя инертно (о чём свидетельствует отсутствие хлора в апатитах мраморов) и в небольшом количестве попадает в мраморы лишь на поздних стадиях контактового метаморфизма в локальных зонах просачивания флюидов, о чём свидетельствует развитие хлор-содержащего сульфида (джерфишерита);
- На стр. 98 автор утверждает, что *“отсутствие зоны закалки, крупная зернистость, широкие вариации валовых составов пород и индивидуальных минералов позволяют предполагать, что породы кровли кочумдекского силла сформировались в результате длительной (а не одномоментной) кристаллизации”*. Непонятно, что подразумевается под *“неодномоментной”* кристаллизацией и как возможна длительная кристаллизация у небольшого силла, прорвавшего холодные породы на довольно небольшой глубине.

Пятая глава довольно разнородна и включает как представление фактических данных (например, раздел 5.4), так и анализ и обсуждение результатов. Такое объединение фактических данных и их обсуждения в одной главе, в общем, не очень удачно, однако на достоверность результатов и выводов оно не влияет. Однако удобнее рассмотреть её по разделам.

Раздел 5.1 посвящён режиму прогрессивного метаморфизма в Кочумдекском ореоле. В нём обсуждаются минеральные равновесия и оцениваются условия пика контактового метаморфизма. В целом можно согласиться с построениями и выводами автора. Однако важно сделать три замечания:

(1) Петрогенетические сетки, анализируемые в этом разделе, взяты из довольно старой публикации Н.Н. Перцева (1977). Вероятно, лучше рассчитать эти сетки самостоятельно, например, в программе Thermocalc (авторы R. Powell и T.J.V. Holland). Её термодинамическая база данных включает Ca и Ca-Mg силикаты и карбонато-силикаты, характерные для контактовых ореолов, в том числе обсуждаемые в работе. Это позволило бы решить ряд проблем:

- использовать современные термодинамические данные для определения равновесий этих минералов;
- рассчитать петрогенетическую сетку для давления 200 бар, принятого автором как литостатическое давление в рассматриваемом контактовом ореоле, а не для 100 бар, как в работе Перцева (при малых давлениях такая разница весьма значительно влияет на положение линий реакций на диаграмме);

- построить диаграмму в координатах $T-X_{CO_2}$, которая была бы полезна и информативна в рассматриваемом случае;
- учесть при построении петрогенетических сеток реальные составы твёрдых растворов минералов;
- уточнение температур метаморфизма также лучше проводить на основе современных данных.

Такие расчёты достаточно несложны, и остаётся пожелать автору сделать их в будущем.

(2) Автор работы в этом разделе признаёт смешанный водно-углекислотный состав флюида, но не высказывает здесь никаких соображений об источнике воды в метаморфическом флюиде и том, насколько она была подвижна.

(3) Расчёты с помощью программы Thermocalc позволили бы добавить в систему Al_2O_3 и проанализировать более сложные породы, в том числе гранат-содержащие волластонитовые мрамора. Большая вариативность системы позволила бы надёжнее определить термодинамические параметры метаморфизма.

Раздел 5.2 посвящён режиму регрессивного этапа метаморфизма в Кочумдекском ореоле. Здесь основное внимание автора привлечено к действительно интересным симплектитовым структурам, отражающим регрессивные преобразования в мраморах. В разделе представлен тщательный и подробный анализ, с которым в целом можно согласиться, за исключением того, что реакция мервинит + кальцит \rightarrow монтичеллит + спуррит должна протекать *при существенном снижении доли CO_2 во флюиде* (стр. 176). Из реакции, записанной на стр. 175, видно, что CO_2 в этой реакции не участвует, так что доля CO_2 во флюиде никак не влияет на условия протекания этой реакции. Это видно и из рис. 5.5 на стр. 173.

Очевидный вопрос: чем определяется подвижность Ca, Mg, Fe и Mn, о которой говорит в этом разделе автор? Каков масштаб такого массопереноса? Кажется логичным предположить, что, как уже обсуждалось выше – при рассмотрении главы 3 работы, здесь подвижен только Ca. За счёт его подвижности меняются отношения Ca/Mg, Ca/Fe и Ca/Mn, даже если три последних элемента остаются инертными.

Раздел 5.3 посвящён сульфидам в контактово-метаморфических мраморах. Автор убедительно и подробно анализирует полученные ранее данные и показывает, что сидерофильные элементы и хлор на ранних (высокотемпературных) стадиях контактового метаморфизма ведут себя инертно и лишь в дальнейшем становятся в некоторой степени подвижными. Использование сульфидов для анализа метаморфических процессов – это одно из существенных достижений автора. Отмечу, что можно пойти и дальше. В работе приводится состав Fe-содержащих сфалеритов, сосуществующих с пирротинном в ореоле контактового метаморфизма. В этом случае возможно воспользоваться сфалеритовым барометром, пригодным и для низких давлений (существуют калибровки этого барометра и для сверхнизких давлений – сфалеритовый космобарометр). Вероятно, можно воспользоваться сульфидами (к примеру, арсенопиритом) и для геотермометрии. Даже в случае позднего переуравновешивания составов сульфидов это даст дополнительную информацию по термической эволюции ореола.

Раздел 5.4 посвящён геохронологическому исследованию U-Pb системы перовскита и определению возраста термического события. Эти данные представляют интерес, но безусловно, являются только первым шагом. Обсуждая датирование контактового метаморфизма в зоне воздействия сибирских траппов, нельзя говорить о продолжительности магматического импульса Сибирской трапповой провинции ~20 млн лет на основании

использования результатов K–Ar и Ar–Ar датирования, особенно с учётом наложения на сибирские траппы и вмещающие их породы низкоградного регионального метаморфизма и сопряжённой флюидной переработки. В современных работах рассматриваются один или два кратких импульса магматизма в сибирских траппах (Падерин и др., 2016; Augland et al., 2019; Burgess and Bowring, 2015; Kamo et al., 2003; Ivanov et al., 2013; ...), продолжительность которых (~1 млн лет) сильно меньше погрешности LA-ICP-MS метода. Поэтому информативным является более прецизионное датирование. Более точные значения возраста контактового метаморфизма и возраста внедрения габброидных интрузий, которые возможно корректно сравнивать, могут быть получены при одновременном ID-TIMS U–Pb датировании бадделеита из габброидов и перовскита из мраморов.

В разделе 5.5 суммируются приводимые ранее в работе результаты по изохимичности метаморфизма. Добавляются утверждения о частично неизохимичном поведении K вместе с Cl. В целом с приводимыми утверждениями и заключениями можно согласиться, с поправкой на уже отмеченные особенности поведения Ca и REE.

Раздел 5.6 посвящён геологическим предпосылкам изохимического контактового метаморфизма на реке Кочумдек. Автор делает вывод об изохимическом характере метаморфизма как следствие низкой проницаемости и низкой флюидонасыщенности осадков. С этим можно согласиться только частично: при таком прогреве пелитовая компонента осадков должна выделить значительные объёмы водного флюида, а мраморы – также значительные объёмы, но углекислотного флюида, в результате чего и в них образуются Ca и Ca-Mg безводные силикаты и карбонатосиликаты. Кроме того, происходит перекристаллизация пород, что означает, что при анализе их флюидопроницаемости нельзя ссылаться на проницаемость известняков. В то же время представляется совершенно верным вывод, что основным источником водного флюида, который приводит к проявлению локальных метасоматических процессов, являются сами осадки, а не габброиды. Добавлю, что подтверждением этого вывода является и приводимый в работе состав апатита из пород силла. Этот апатит содержит в анионной части только Cl и F и совсем не содержит OH.

В **Заключении** сформулированы главные результаты работы.

Стоит отметить ещё то, что можно было бы ожидать от работы, но чего в работе нет:

- Было бы полезно оценить условия контактовых преобразований пелитов и сравнить их с оценками условий преобразований карбонатов.
- Оценка P–T–X условий метаморфизма метасоматитов (скарнов и скаполитовых жил) и особенностей их состава позволила бы выявить условия появления флюидных потоков, состав (а, значит, и возможный источник) этих флюидов и подвижность элементов в этих флюидах (видимо, в среднетемпературных условиях). Для скаполитовых жил при этом важно разделить слагающие их минеральные ассоциации: среднетемпературные, включая скаполит, и более поздние, низкотемпературные (цеолитовые). Для понимания состава флюида, приведшего к формированию скаполитовых жил, важно характеризовать не только катионный, но и анионный состав скаполита.
- В работе отсутствует сопоставление с другими примерами высокотемпературного контактового метаморфизма – как в районе развития сибирских траппов (эти проявления упоминаются на с. 25), так и в других регионах мира. Такое сопоставление, как кажется, должно способствовать пониманию сути обсуждаемых процессов.
- Очевидный вопрос, который возникает при знакомстве с работой: когда под действием базитовых интрузий возникают высокотемпературные контактовые ореолы (весьма редкие,

