

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Резвухиной Ольги Владимировны «Минералогия и условия образования алмазоносных кианитовых гнейсов участка Барчинский (Кокчетавский массив)», представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».

Диссертационная работа О.В. Резвухиной посвящена минералогии и петрологии уникальных высокобарических алмазоносных метапелитов участка Барчинский Кокчетавского метаморфического комплекса высоких давлений (Казахстан). Несмотря на многолетнюю историю исследований Кокчетавского массива, большая часть наиболее значимых результатов была получена для эклогитов и уникальных гранат-пироксеновых и карбонатно-силикатных пород, а алмазоносные метапелиты остаются наименее изученным типом пород в этом комплексе. Их исследование дает важную информацию о процессах субдукции материала, предположительно связанного с континентальной корой. Восстановление их проградной и ретроградной Р-Т эволюции является определяющей задачей для понимания эволюции не только Кокчетавского комплекса, но и других комплексов высоких давлений, во многих из которых метапелиты широко представлены. В этом и состоит актуальность исследований, представленных в диссертации. Работа О.В. Резвухиной заключалась в (1) детальном минералого-петрографическом изучение алмазоносных кианитовых гнейсов; (2) исследованиях структурной и химической неоднородности пордообразующих и акцессорных минералов; (3) оценки Р-Т условий метаморфизма пород, скоростей их остывания и эксгумации.

Все эти задачи выполнены автором в объеме, необходимом для представления в диссертации на соискание степени кандидата наук. Работа О.В. Резвухиной основана на минералогических и геохронологических данных для 6 наиболее информативных образцов указанных пород, отобранных автором в ходе полевых работ на Кокчетавском массиве. В исследовании применялись различные современные методы анализа состава и структуры вещества. Главными научными достижениями диссертационной работы О.В. Резвухиной, часть из которых составляет защищаемые положения, являются следующие результаты и выводы.

- (1) Впервые установлена неоднородность и стадийность образования порфиробластов кианита – принципиально важного минерала в изученных породах, и показана его эффективность как матрицы, сохраняющей реликтовые минералы высокобарической стадии эволюции пород.
- (2) Получена новая информация о прогressive этапе метаморфизма метапелитовых пород и оценены Р-Т параметры регressive метаморфизма.
- (3) Проведено датирование рутила из изученных пород, на основе чего оценены скорости остывания и эксгумации пород.

Эти результаты представляют интерес для исследователей в областях петрологии, геохимии, минералогии высокобарических комплексов.

Диссертация О.В. Резвухиной общим объемом 137 страниц состоит из Введения, 5 глав, Заключения, включает 45 иллюстраций, 12 таблиц и приложение. Текст диссертации содержит анализ литературных данных, обоснование задач исследований, сведения об использованных аналитических методах. Фотографии, диаграммы и таблицы наглядно иллюстрируют полученные результаты, а список литературы (217 наименование) отражает эрудицию автора.

Во Введении автор освещает актуальность работы, ее цель и задачи, фактический материал и личный вклад автора диссертации, характеризует новизну и практическую значимость работы, а также приводит сведения об апробации работы. Во Введении автор также формулирует три защищаемых положения, призванные отражать основные достижения работы. Однако, по моему мнению, представленные формулировки не вполне удовлетворительны как защищаемые положения. В них преобладают лишь факты, оспаривать которые никто не будет, а значит они не нуждаются в защите. Например, в первом положении «защищается» факт того, что кианит содержит включения и неоднороден. Но кто же будет оспаривать этот факт? Во втором защищаемом положении не понятно, что такое «минимальные РТ-параметры прогрессивного этапа метаморфизма»? Почему не ниже «~1 ГПа» или автор полагает, что породы изначально находились при 1 ГПа? РТ-параметры каких «этапов» регрессивного метаморфизма приведены? Исходя из этой формулировки, этих этапов предполагается не один. На мой взгляд, единственный тезис в представленных трех положениях, который действительно можно защищать – это вывод о скоростях остывания и экскумации пород.

Далее идет главный текст диссертации. Общим замечанием по тексту является то, что в ней резко доминирует обзорная и описательная части. Из 105 страниц главного текста диссертации (Главы 1 - 4), лишь 18 страниц (Глава 5 и Заключение) посвящены анализу полученных данных, реконструкциям условий и петро- и минералогенетическим моделям.

В Главе 1 диссертации приводится обзор литературных данных о метаморфических комплексах высоких давлений и о приложении экспериментальных данных к их исследованиям. Глава недостаточно структурирована. Раздел (1.1) – это коллаж отрывочных данных о минеральных индикаторах метаморфизма высоких давлений, о некоторых особенностях состава минералов, о проблемах термобарометрии и реконструкции Р-Т трендов для этих пород. Информация о минеральных ассоциациях пород высокобарического метаморфизма перемешана с информацией о составах минералов – включений в алмазах из кимберлитов, причем логика этой «смеси» не понятна. Например, в качестве примера граната с включениями алмаза почему-то приведен Cr-пироп, описанный в работе Meyer (1968), хотя в этой работе исследовался гранат, включенный в алмаз. Какое отношение этот пример имеет к породам метаморфических

комплексов высоких давлений? Подобная ситуация наблюдается в абзаце на стр. 10, посвященном калийсодержащему клинопироксену.

Раздел 1.2, разбирающий экспериментальные данные по фазовым равновесиям в пелитовых системах при высоких давлениях, содержит много утверждений, которые выглядят необоснованно. Например, почему автор решила, что Na и Fe «не оказывают значительного влияния на фазовые взаимоотношения» в пелитовых системах? Особенно это касается Fe, который является ведущим компонентом в пелитах и значительно влияет на процессы плавления. Автор утверждает, что «добавление Fe в экспериментальные системы приводит к сложностям». Каким? В качестве подтверждения своих выводов, автор приводит ссылку на статью Hermann (2003), в которой я не нашел каких-либо выводов о малом влиянии Fe и Na на равновесия в системе KCMASH. Аналогичное замечание касается реакции $Bt+Ky+Cpx+Coe\rightarrow Opx+расплав_1$ на стр. 12 со ссылкой на работу Schmidt, Poli (2014), которую я не нашел в списке литературы. Сама реакция выглядит, по меньшей мере, странно, особенно с утверждением автора, что в ее результате «появляется расплав» (расплав указан по обе стороны реакции). Рассматривая фазовые равновесия в пелитах, содержащих карбонаты, автор особенно отмечает работу Shatskiy et al. (2019), хотя таких работ много (Grassi, Schmidt, 2011; Thomsen, Schmidt, 2008; Tsuno, Dasgupta, 2012; Tsuno et al., 2012).

К краткой Главе 2, где рассмотрены аналитические методы исследования, примененные при выполнении работы, у меня нет замечаний.

Глава 3 посвящена описанию геологического положения Кокчетавского массива. Эта глава сразу начинается с характеристики «двух альтернативных моделей образования Кокчетавского массива», хотя логичнее было бы сначала охарактеризовать положение (геологическое и тектоническое) и строение этого комплекса. Вызывает вопросы карта на рис. 3.2. Какие породы отмечены серыми цветами в разделе легенды “НР-МТ”? Почему для других пород не приведены Р-Т параметры, а только для этих пород? Что такое гранат-кварцевые породы? Изученные алмазоносные кианитовые гнейсы – это «UHP гнейсы»? Почему они не разделены с карбонатно-силикатными породами?

В Главе 4 рассматриваются петрографические особенности и минеральный состав алмазоносных кианитовых гнейсов, описываются составы и зональность минералов. В отличие от предыдущих глав, глава 4 лучше структурирована и информация в ней подана с хорошей детальностью. К сожалению, в этой главе (и в диссертации в целом) нет никаких упоминаний о геохимических особенностях этих метапелитов и о типе их протолита.

При чтении этой главы у меня возникли также следующие вопросы и замечания.

- (1) Автор выделяет два типа порфиробластов кианита в породах (Ky-I и Ky-II) на основе распределения и набора минеральных включений. Характеристики этих типов порфиробластов приведены в тексте, но ни на одной иллюстрации я не смог найти их взаимоотношения. На Рис. 4.2а-г, 4.3, 4.4а, иллюстрирующие общие структурные взаимоотношения в породах, отмечены

лишь порфиробласти Ky-I. Не ясно микроструктурное положение порфиробластов в породах, испытавшим значительные деформации. Являются ли они до- (порфирокласти), син- или постдеформационными? Похоже, что Ky-II (каймы на Ky-I и мелкие порфиробласти) является постдеформационным. Самый элементарный микроструктурный анализ в сопоставлении с Р-Т данными очень важен для восстановления истории пород.

(2) С чем же связано разное катодолюминисцентное свечение в отдельных зонах порфиробластов кианита и гетерогенность их внешних зон? Какую принципиальную информацию о генезисе и истории роста порфиробластов дает КР-картирование самого кианита (не включений в нем)? Судя по описанию на стр. 41, КР-картирование и метод дифракции отраженных электронов выявили лишь то, что «индивидуды, образуют двойник». И это все?

(3) Из описания образцов и приведенных фотографий не ясны взаимоотношения мусковита/фенгита и биотита. Они могут иметь важное петрогенетическое значение, т.к. биотит может быть продуктом инконгруэнтного плавления ассоциаций, содержащих белые слюды.

(4) Автор лишь единожды упоминает «лейкократовые прослои» (стр. 32), не рассматривая их взаимоотношения с породой. Являются ли эти прослои продуктами анатексиса? Сопоставим ли их минеральный состав с силикатными полиминеральными включениями в гранате (стр. 69)? Вообще в работе ничего не сказано об «анатектической» истории изученных пород.

(5) Выделяя разные генерации кианита в породах, автор не поясняет, есть ли какие-нибудь различия в составе Ky-I, кайм на Ky-I и Ky-II. Не различаются ли генерации кианита по Fe, Ti, V, Cr, на присутствие которых указывает автор на стр. 74?

(6) При описании составов монацита и рутила автор, на мой взгляд, избыточно занимает место в тексте перечислением всех компонентов, входящих в минералы. Для рутила приводятся корреляции Nb-Ta и Zr-Hf, но не объясняется их значение (далее они никак не используются). Проводилось ли датирование рутила из одного образца или из нескольких?

В Главе 5, заметно более краткой, чем Глава 4, описываются результаты реконструкции условий образования и эволюции алмазоносных кианитовых гнейсов. К сожалению, большинство выводов о параметрах минералообразования далеки от конкретики, оценены приблизительно, сопровождаются словами «вероятно», «наиболее вероятен», знаками типа “<”, что оставляет двоякое впечатление об этих выводах. Вызывает также сожаление, что для восстановления условий метаморфизма автор применила лишь «обычную» термобарометрию, основанную на калибровках отдельных равновесий, но не использовала методы мультивариантной термобарометрии (TWQ, THERMOCALC) и методы моделирования минеральных ассоциаций с помощью псевдосечений (PERPLE_X, THERMOCALC, DOMINO).

1. На основе выявления включений алмаза в ядрах и в каймах порфиробластов кианита автор делает вывод о том, что кианит кристаллизовался в поле стабильности алмаза. Однако непонятно, означает ли ассоциации включений алмаза и графита в ядрах порфиробластов то, что ядра

представляют собой зоны роста, образовавшиеся при более низком давлении, чем каймы, в которых включения графита отсутствуют? В ядрах порфиробластов отмечен коэсит, а в каймах его нет. Это может свидетельствовать о росте кианита в ходе реакций, расходящих свободный SiO_2 . Ими могли быть реакции слюд с образованием граната, калиевого полевого шпата и кианита, а также реакции плавления. Иначе говоря, такое распределение включений коэсита, по-видимому, свидетельствует о росте кианита на прогрессивной стадии.

2. Автор упоминает (стр. 99) включения «незональных гранатов ($\text{Alm}_{76}\text{Prp}_{16}\text{Grs}_{7}\text{Sps}_{1}$)» в каймах кианита, которые отличаются пониженной кальциевостью от включений, «приуроченным к границам «чистой» каймы и графитового ядра» ($\text{Alm}_{60}\text{Prp}_{13}\text{Grs}_{26}\text{Sps}_{1}$). Автор никак не комментирует этот факт, который (следуя логике выводов автора) должен свидетельствовать о резком падении давления.

3. Чем обоснован вывод, что «кристаллизация мусковита с повышенным содержанием селадонитового компонента происходила на регрессивном этапе метаморфизма при давлениях <2.5 ГПа», а не на пике метаморфизма? Как я отмечал выше, замещение мусковита биотитом может свидетельствовать о реакциях инконгруэнтного плавления белой слюды.

4. Вопросы вызывают выводы в отношении образования полевых шпатов в породах. На стр. 100 автор утверждает, что ортоклаз образовался «из силикатного расплава на регрессивном этапе метаморфизма при температурах <600°C». Во-первых, это будет все же микроклин, а во-вторых, что это за расплав с температурой менее 600°C? Далее автор пишет, что «обычно олигоклаз рассматривается в качестве продукта дегидратационного плавления водосодержащих минералов на прогрессивном этапе метаморфизма», но не указывает, каких? Зачем наносить составы полевых шпатов на диаграмму An-Ab-Or, если эти составы в подавляющем числе измерений лежат на сторонах треугольника. Так утверждение, что «включение анортоклаза из порфиробласта кианита практически попадает на изотерму 700°C» (стр. 105) некорректно, т.к. его состав лежит точно на стороне Ab-Or. Нанесение составов полевых шпатов на изотермы на тройной диаграмме имеет смысл, когда есть признаки распада (перитты, антиперитты) и применяется обычно для реинтегрированных составов.

5. Обсуждая происхождение рутила в породах, автор приводит некую реакцию $\text{Ilm} + \text{силикаты} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Rt} + \text{Chl}$, указывая на ее «прогрессивный» характер. Что за «силикаты» обуславливают реакцию с поглощением воды на прогрессивном этапе (на прогрессивной стадии обычны реакции с выделением воды)? Однако истинной причиной стабилизации рутила относительно ильменита в высокобарных метапелитах является реакция $\text{Ilm} + \text{Ky} + \text{Qz} = \text{Alm} + \text{Rt}$ (кстати, приведенная на рис. 5.2), которая исследовалась экспериментально в 1980-х годах, как потенциальный геобарометр для пород высоких ступеней метаморфизма (см. например, Bohlen, 1983). На стр. 101 автор указывает на «несколько генераций» рутила в породах, хотя в Главе 4 эти генерации не описывались. Есть ли какие-нибудь различия в составе рутила, ведь ранее (стр. 84, Рис. 4.37) автор отмечала вариации содержаний микроэлементов в рутиле и корреляции Nb-Ta и Zr-Hf. Какая генерация рутила исследовалась на Pb-U возраст или полученное значение возраста 519 ± 1.6

млн. лет – это нечто среднее? Вопрос возникает и по поводу использования термометра Zr-в-рутile (стр. 104): какая генерация рутила фиксирует максимальные концентрации Zr?

6. Обсуждая короны вокруг монацитита, автор приводит реакцию с участием флюида (стр. 102), несбалансированную по зарядам.

7. Применяя гранат-фенгитовый геотермометр автор делает вывод (стр. 105), что «оценки РТ-условий регрессивного этапа метаморфизма алмазоносных кианитовых гнейсов ... составляют 720°C и 2.5 ГПа». Если термометрия проводилась не по одной паре минералов (я так надеюсь!), почему приведены лишь одни значения температуры и давления, а не интервал значений, например, 720°C±...? Он будет характеризовать не весь «регрессивный этап метаморфизма», а лишь отдельный отрезок на Р-Т тренде. Как получено давление 2.5 ГПа для этого эпизода?

В Заключении О.В. Резвухина суммирует главные выводы работы.

Отмеченные в отзыве замечания свидетельствуют о неоднозначности в интерпретации полученных данных и не влияют на общую положительную оценку работы. Результаты имеют международное признание, что подтверждается 11 статьями в международных рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ и индексируемых системами РИНЦ, Web of Science и Scopus, в том числе входящим в quartiles Q1 и Q2, а также докладами на отечественных и международных конференциях. Материалы диссертации О.В. Резвухиной представляют интерес для использования в учебных курсах петрологии, геохимии, минералогии, кристаллохимии.

Диссертация О.В. Резвухиной является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на высоком научно-методическом уровне, разноплановых аналитических данных. Результаты работы соответствуют пункту 2 (минералогия земной коры и мантии Земли, ее поверхности и дна океанов) паспорта специальности 25.00.05. Автореферат отражает основную логику всей работы. Диссертация «Минералогия и условия образования алмазоносных кианитовых гнейсов участка Барчинский (Кокчетавский массив)» соответствует требованиям Положения ВАК о присуждении ученых степеней, а её автор, Резвухина Ольга Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».

Директор ИЭМ РАН, доктор геолого-минералогических наук, профессор РАН

Отзыв составлен 31 мая 2021 г.

Олег Геннадьевич Сафонов



Институт экспериментальной минералогии им. академика Д.С. Коржинского РАН (ИЭМ РАН),
Московская область, 142432 г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 4, адрес электронной
почты oleg@iem.ac.ru, телефон: +7-496-524-44-25.