

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Михно Анастасии Олеговны
**«ОСОБЕННОСТИ МИНЕРАЛОГИИ И ФЛЮИДНОГО РЕЖИМА
ОБРАЗОВАНИЯ КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ ПОРОД КОКЧЕТАВСКОГО
МАССИВА»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.05 «минералогия, кристаллография».

Диссертационная работа А.О. Михно посвящена петрологии одного из наиболее загадочных комплексов среди метаморфических комплексов ультравысоких давлений – Кокчетавскому комплексу в Северном Казахстане. Уникальность этого комплекса состоит в своеобразии некоторых его пород, неизвестных нигде более. Это, прежде всего, - гранат-клинопироксеновые и тесно связанные с ними карбонатно-силикатные породы. Их высокая алмазоносность стала главной причиной пристального внимания к этим породам еще с 1970-х годов. Однако дальнейшие исследования показали, что эти породы - кладезь минералогической информации о процессах метаморфизма и рециклинга корового материала в субдукционных зонах на глубинах более 150 км. Помимо алмаза в них были выявлены разнообразные индикаторы высоких давлений: коэсит, высококремниевый фенгит, обогащенный Si, Al, F титанит. Но особую славу кокчетавские породы приобрели благодаря калийсодержащему клинопироксену – индикатору не только высоких давлений, но и повышенной активности калия в минералообразующих средах. Будучи известными в мантийных ассоциациях, подобные пироксены не встречены в других метаморфических комплексах. Удивительной особенностью калийсодержащих пироксенов является то, что выявлены они в породах чрезвычайно обедненных калием. Именно этот факт вызвал ряд гипотез о роли высокоподвижных калиевых расплавов, которые участвовали не только в процессах образования гранат-пироксеновых пород, но и определяли процессы эксгумации пород Кокчетавского комплекса к поверхности. Эти гипотезы подтвердились результатами изучения флюидных и расплавных включений в минералах пород комплекса. Однако до сих пор не было исследований, которые бы соединили в себе информацию о составах расплавов и пироксенов с целью выявить P-T и флюидные условия образования гранат-пироксеновых пород. В работе А.О. Михно эти комплексные исследования выполнены. Данная диссертация является важной вехой в исследовании Кокчетавского комплекса и вносит важный вклад в исследования P-T и флюидных условий и магматизма в метаморфических комплексах высокого и ультравысокого давления. В этом и состоит актуальность исследований, представленных в диссертации.

Среди главных задач работы А.О. Михно выделяются следующие исследования.

- (1) Исследования состава, зональности и структур распада в калийсодержащих клинопироксенах гранат-пироксеновых и карбонатно-силикатных пород Кокчетавского комплекса как индикатора ультравысокобарических условий пика метаморфизма этих пород и интерпретация этих данных на основе расчетов температур и давлений.
- (2) Исследования фазового и химического состава полифазных включений в минералах гранат-пироксеновых пород, являющихся раскристаллизованными реликтами расплавов, сопровождавших образование и эволюцию гранат-пироксеновых и карбонатно-силикатных пород Кокчетавского комплекса.
- (3) Исследования флюидных включений в минералах гранат-пироксеновых и карбонатно-силикатных пород Кокчетавского комплекса.

(4) Исследования фазового и геохимического состава сульфидных включений в минералах гранат-пироксеновых и карбонатно-силикатных пород Кокчетавского комплекса.

Все эти задачи выполнены автором в максимальном объеме. В диссертации приведена исчерпывающая характеристика P-T и флюидного режима образования гранат-пироксеновых пород Кокчетавского комплекса. Работа А.О. Михно основана на огромном объеме аналитических данных, полученных на основе электронной микроскопии, микрозондового анализа, анализов LA-ICP-MS, рамановской спектроскопии и других современных аналитических методов. Главными научными достижениями диссертационной работы А.О. Михно, часть из которых составляет защищаемые положения, являются следующие результаты и выводы.

(1) В гранат-пироксеновых породах Кокчетавского комплекса детально изучены включения в гранатах калийсодержащих клинопироксенов с увеличивающейся к краям зональностью по K_2O и дана интерпретация этой зональности как отражения прогрессивного метаморфизма пород при участии богатых калием алюмосиликатных расплавов.

(2) Впервые оценены интервалы P-T параметров кристаллизации калийсодержащего клинопироксена в породах Кокчетавского комплекса – от 5.5 ГПа, 960⁰С до 7.3 ГПа, 1100⁰С.

(3) Впервые проведено исследование полифазных включений в калийсодержащих клинопироксенах и дана их интерпретация как реликтов алюмосиликатных расплавов, сосуществовавших с пироксеном на пике метаморфизма.

(4) Наглядно продемонстрировано, что среда кристаллизации минеральных ассоциаций гранат-пироксеновых пород включала в себя богатый калием алюмосиликатный расплав, возникший в ходе частичного плавления метасадков; карбонатитовый расплав, возникший в ходе взаимодействия алюмосиликатных расплавов с мраморами; и сульфидный расплав, который согласно геохимическим особенностям, имеет коровое происхождение.

(4) Показано, что эти расплавы сопровождалась водным флюидом, насыщенным силикатной составляющей.

Результаты диссертации представляют несомненный интерес для исследователей в областях петрологии и минералогии пород высокобарического метаморфизма и частичного плавления, сопровождающих субдукционно-коллизийные зоны. Они послужат основой для построения геодинамических моделей таких тектонических обстановок.

Диссертация А.О. Михно объемом 134 страницы состоит из Введения, 5 глав, Заключение, а также включает список литературы (161 наименование), 49 иллюстраций и 19 таблиц. Общий объем диссертации составляет 359 страниц. Текст диссертации содержит подробный анализ литературных данных и обоснование задач исследований. В работе приводятся сведения об использованных аналитических методах. Все фотографии, диаграммы и таблицы наглядно иллюстрируют полученные результаты, а список литературы полно отражает эрудицию автора.

Во Введении автор традиционно для диссертаций на соискание степени кандидата наук освещает актуальность работы, ее цель и задачи, фактический материал и личный вклад автора диссертации, характеризуется практическая значимость работы, а также приводятся сведения об апробации работы. Автор описывает новизну проведенных исследований. Во Введении автор также формулирует три защищаемых положения, полностью отражающих суть работы. Однако у меня возникли следующие *замечания к защищаемым положениям*.

(1) Из первого защищаемого положения не совсем понятно, что такое «заключительный этап прогрессивной стадии». Из этого термина можно сделать вывод о том, что метаморфизм проходил в несколько этапов, хотя в диссертации ничего не сказано про эти этапы. На мой

взгляд, формулировку этого защищаемого положения можно было бы ограничить тем, что рост пироксена проходил на прогрессивной стадии метаморфизма без упоминания о каких-либо этапах. Кроме того, P-T параметры, приведенные в защищаемом положении, не соответствуют тем, которые приведены на стр. 108. В защищаемом положении написано, что рост клинопироксена начался при 960^oC и 5.5 ГПа, а на стр. 108 – 870^oC и 5.5 ГПа. Согласно стр. 108, температуры 950^oC соответствуют давлению 7.6 ГПа, а не 5.5 ГПа.

(2) Третьему защищаемому положению следовало бы придать более четкий генетический смысл, указав на присутствие сульфидного расплава в среде образования карбонатно-силикатных пород, а не только то, что «сульфидные минералы являются равноправными членами высокобарических ассоциаций».

В Главе 1 диссертации приводится обзор литературных данных о геологическом строении Кокчетавского массива и Кумды-Кольского месторождения, геологическому положению и классификации карбонатно-силикатных пород, а также рассматриваются представления об их происхождении. **К Главе 1 у меня возникли следующие замечания.**

(1) Рассматривая классификацию карбонатно-силикатных Кумды-Кольского месторождения, автору следовало бы упомянуть, что среди них выделяются группы по *железистости*: железистые кальцитовые разности и магнезиальные доломитовые разности (Перчук и др., 1996; Перчук, Япаскурт, 1998; Perchuk et al., 2002). Необходимо было особо указать, что карбонатно-силикатные и гранат-пироксеновые породы тесно взаимосвязаны друг с другом, образуя переходные разности. Необходимо было рассмотреть детально те основания, которые полагались в основу классификации пород, а не просто ограничиваться ссылками. Например, из текста не понятно, почему Окамото и др. (Okamoto et al., 2000) классифицировали эти породы как эклогиты.

(2) При описании существующих моделей образования пород Кумды-Кольского месторождения (раздел 1.3), следовало сначала рассмотреть P-T условия и тренды эволюции пород, а потом уже рассказывать о моделях. Из повествования не понятно, на каких основаниях предлагались те или иные модели. Разделы 1.3 и 1.4 можно было бы объединить.

(3) Во многих частях диссертации, в частности на стр. 18, автор упоминает о вторых критических точках, но не ссылается на значения их P и T. Так например, не понятно, где же находится «вторая критическая точка для метапелитов»? Совершенно не понятно, чем согласуются составы «включений раскристаллизованного расплава в алмазах и породообразующих минералах» с экспериментальными данными для «метапелитовой системы»? Среди ссылок приведена работа Wang, Takahashi, 1999, результаты которой не относятся к изучению «метапелитовой системы», но не упомянуты результаты других экспериментов (прежде всего работы М. Шмидта с соавторами). В этой части нужно было привести диаграммы, сравнивающие результаты экспериментов по плавлению пелитов и карбонатсодержащих пелитов с составами расплавных включений в минералах гранат-пироксеновых пород. Такого сравнения, к сожалению, нет и в обсуждении результатов.

(4) На схеме разведочной штольни Кумды-Кольского месторождения нужно было показать места отбора изученных образцов.

К Главе 2, в которой рассмотрены аналитические методы исследования, примененные в работе, у меня нет замечаний. Глава 3 диссертации посвящена петрографическому и минералогическому описанию изученных пород. В целом эта глава написана достаточно ясно. **Главное замечание к петрографическому описанию пород** – это отсутствие парагенетического анализа пород. Нужно было бы привести сводную таблицу, указав в ней

первичные, ретроградные и вторичные ассоциации (парагенезисы). *К разделу 3.2 у меня возникли следующие вопросы и замечания.*

(1) В диссертации не приводится схема расчета составов клинопироксенов на миналы и метод определения Fe^{3+} . Особенно это касается расчета Са-молекулы Эсколы, т.к. все клинопироксены в таблице 3.1 показывают не недостаток, а даже избыток катионов.

(2) Увеличение содержания Na_2O в клинопироксенах от ядер кристаллов к их периферии автор объясняет «...возрастанием давления, так и с возрастанием потенциала натрия» (стр. 44). Это утверждение в отношении давления совершенно не соответствует наблюдаемым взаимоотношениям, поскольку согласно изменению содержаний K_2O в клинопироксенах, их периферийные зоны росли на фоне снижения давления. Из данного утверждения не понятно, о «потенциале натрия» в какой среде идет речь? Судя по анализам в таблице 3.1, содержание Na в клинопироксенах проявляет некоторую обратную корреляцию с K (напр. Сафонов и др., 2004). Поэтому Na, похоже, просто занимает место K (причем, примерно в равных количествах) при давлениях, при которых последний не может входить в клинопироксен.

(3) Несмотря на то, что изучение клинопироксенов с прогрессивной зональностью по K_2O является определяющей задачей работы, описания этих включений в разделе 3.2.1 явно не достаточно. Собственно говоря, в этом разделе описана только зональность по K. Однако из фотографий на рис. 3.15 с и g видно, что в них есть зональность по Na и Fe. Интересно также знать, как меняется содержания Al^{IV} и Al^{VI} в этих кристаллах. Профиль по X_{Mg} приведен лишь на рис. 5.1, хотя его (а также Na, Al и т.д.) стоило бы привести именно в разделе 3.2.1.

(4) В описаниях составов и зональности гранатов нет ни слова о вариациях состава граната в контактах с включениями калийсодержащего клинопироксена. Если таких изменений нет, то это следовало бы это особо указать. Во включениях пироксена четко проявлена внешняя более железистая зона, которую можно принять за резкую обменно-диффузионную зональность. Если это так, то ответная зональность должна быть и в контактирующем гранате, чего не видно на рис. 3.15. Вряд ли, гранат мог гомогенизироваться, а пироксен нет. Это может лишь означать то, что включение пироксена было захвачено гранатом уже после возникновения железистой зоны. Не рассматривала ли автор диссертации такой вариант?

(5) Что за «посветления» проявлены в карте граната по Ti на рис. 3.15e? Они, похоже, коррелируются с «посветлениями» в отношении Fe.

(6) На мой взгляд, наряду со словесными описаниями вариаций составов гранатов в разделе 3.2.2 нужно было привести профили с указаниями распределения включений. Например, наряду с огромной таблицей 3.6 можно было бы привести хороший профиль. Следовало более подробно описать «ореолы» нового граната вокруг полифазных включений.

(7) В описании «аксессуарных минералов» (раздел 3.2.4.) намешаны сведения как о действительно аксессуарных минералах первичных парагенезисов (титанит, фенгит), так о ретроградных и вторичных минералах (амфибол, цоизит, плагиоклаз, мусковит и т.д.). Эти группы минералов должны были быть четко разделены. Например, в табл. 3.7. приведены два анализа плагиоклаза, но совершенно не понятно, какова позиция этих плагиоклазов в минеральных ассоциациях изученных пород. Указывается, что титаниты содержат ламели кварца, хотя на стр. 38 говорится о ламелях коэсита. Пробовала ли автор идентифицировать эту фазу с использованием Рамановской спектроскопии? Почему присутствие 0.25 мас. % K_2O в «роговой обманке» имеет важное значение? Кстати, анализ амфибола в таблице не соответствует роговой обманке, поскольку в нем вообще нет Na, а соответствует амфиболу ряда актинолит-чермакит. Почему в таблице приведены анализы кальцитов, но нет анализов доломитов?

В Главе 4 рассматриваются результаты исследований флюидных и расплавных включений в минералах изученных пород. Эта информация является определяющей для диссертации, на основе которой делаются далее генетические выводы. Важнейшим, на мой взгляд, выводом, который сделала автор на основе изучения флюидных включений является подтверждение существенно водного состава флюида, сосуществовавшего при высоких давлениях с минералами гранат-пироксеновых пород, и вывод о насыщенности этого флюида силикатными компонентами. Автор выделяет несколько типов включений по их фазовому составу (монофазные, газовой-жидкие, трехфазные). Однако в тексте нет характеристик того, чем отличаются эти включения по положению в породах и минералах. Чем, например, отличаются флюидные включения в гранатах, от таковых в клинопироксене, титаните или карбонатах? На мой взгляд, это могло бы дать важную генетическую информацию. В таблице 4.1 приведены параметры как довольно плотных, так и мало плотных включений. Все мало плотные включения - газовой-жидкие, а среди включений, содержащих твердую фазу, нет мало плотных. Не связано ли это с закономерной эволюцией состава флюида?

В разделе 4.2 дается характеристика фазового состава полифазных включений в минералах гранат-пироксеновых пород на основе детальной сканирующей микроскопии и КР-спектроскопии. Полагая, что эти включения являются реликтами расплава, автор делает выводы о составе этого расплава. В разделе приводятся также результаты экспериментов по гомогенизации (плавлению) вещества включений, что во многом подтвердило выводы автора о составе расплава, сделанные на основе фазового анализа включений. В целом ни аналитические данные, ни выводы не вызывают сомнений. Однако *к разделу 4.2 у меня возник ряд вопросов.*

(1) Хотя на стр. 73 указано, что изучены полифазные включения как в клинопироксенах, так и в гранатах, приводится описание только включений в клинопироксенах. Насколько составы включений в гранатах отличаются от составов включений в пироксенах?

(2) Чтобы убедить читателей в том, что заметные вариации состава включений в пироксенах отсутствуют, автору следовало бы привести таблицу с составами индивидуальных включений. Удивительно видеть, что автор приводит огромную таблицу составов граната по профилю, который далее нигде не используется (Табл. 3.6), но не приводит сводку составов полифазных включений, далее используемых для генетических выводов. Фазовый состав даже четырех включений, изображенных на рис. 4.5, убеждает в том, что какие-то вариации состава все же есть: агрегат Hbl+Qtz во включении (d) отличается от Kfs+Qtz+Phe во включении (a). Об этом же говорят стандартные отклонения составов в таблице 4.4. Было бы информативно привести бинарные или тройные диаграммы для составов включений.

(3) Утверждение автора о том, что «наблюдается корреляция содержания калия в расплаве с содержанием калия во включениях калийсодержащего пироксена в гранате» не совсем понятна, поскольку включения пироксена также могут быть неоднородны. По-видимому, автор имела в виду максимальные значения K_2O , зафиксированные в различных образцах.

(4) Описание экспериментов по гомогенизации (плавлению) полифазных включений необходимо было вынести в отдельный раздел. Из текста не понятно, сколько включений было подвергнуто плавлению, а в описании не показан изначальный фазовый состав включений. Автор диссертации, хотя и обращает на это внимание (стр. 88), но не делает попытку оценить насколько колоссальная разница давлений в экспериментах (атмосферное) и в природных ассоциациях (по оценкам автора, 6-7 ГПа) влияет на процесс плавления вещества включений. Плавление во включениях, по сути, является дегидратационным, зависящим от стабильности конкретного водного минерала, входящего в состав включения,

что было показано А.Л. Перчуком и др. (2009). Эти исследователи показали, что при давлениях 3 ГПа включения, содержащие амфибол, эпидот и т.д., начинают плавиться уже при температурах порядка 700-800^oC. Интерпретация КР-спектра гомогенизированного включения на рис. 4.11 вызывает следующий вопрос: если во включении стекло, то КР-спектр должен состоять из широких полос, а не из пиков, характерных для кристаллических веществ. Автор никак не объясняет, почему спектр «стекла» аналогичен клинопироксену при «непироксеновом» составе.

В Главе 5 приводятся результаты реконструкции Р-Т и флюидных условий формирования карбонатно-силикатных пород Кокчетавского комплекса. Для расчетов Р-Т условий кристаллизации калийсодержащего клинопироксена автор использовала гранат-клинопироксеновый геотермометр Э. Равны (Ravna, 2000) и эмпирический барометр О.Г. Сафонова и др. (2005), основанный на равновесии калийсодержащего клинопироксена и расплава. *К главе 5 у меня возник ряд принципиальных вопросов*, затрагивающих корректность использования данных минералогических сенсоров.

(1) Автор показала, что вне зависимости от состава пород характерной особенностью включений калийсодержащего клинопироксена в гранатах является резкое снижение содержаний К₂О в краях включений на контакте с гранатом-хозяином. Кроме того, на рис. 3.12, 3.15 и 5.1 четко видно, что включения клинопироксена (и пироксены с прогрессивной зональностью по К₂О не исключение) окаймлено зоной с резко более низкой магнезиальностью. Она, как отмечалось мной выше, могла бы иметь обменно-диффузионный характер, но «ответной» зональности в гранате-хозяине нет. Нет также выделений калиевых фаз по границам включений клинопироксена (которые должны быть при уходе К из минерала). Все эти факты позволяют сделать вывод о том, что включения калийсодержащего клинопироксена захватывались на более поздней стадии эволюции пород, и гранат был равновесен не с магнезиальным и обогащенным калием клинопироксеном, а с более железистым пироксеном, лишенным калия. Возможно, что и сам гранат кристаллизовался на более поздних стадиях, не отвечающим ультравысоким давлениям. Тогда использование гранат-клинопироксенового обменного равновесия для расчетов температур образования богатого калием клинопироксена во включениях не обосновано. Из какой зоны граната был взят анализ, приведенный в таблицах 3.3 и 5.1 и использованный для расчетов? Насколько вариации состава граната влияют на результаты расчетов температуры?

(2) Для расчетов по формуле 5.8., насколько понятно из текста, использовался постоянный состав граната, т.е. постоянные X_{Mg} и X_{Ca} (табл. 3.3), X_{Mg} клинопироксена также постоянна (профиль Mg# на рис. 5.1) (не учитывая краевую железистую зонку), а давление не входит в формулу 5.8. Тогда почему же, меняются значения Т, образуя вогнутый «профиль» (рис. 5.1)? Какой же параметр косвенно влияет на результаты расчета по формуле 5.8? Единственный компонент, который меняется по профилю (кроме К) – это Al (Табл. 5.1).

(3) Почему для каждого состава клинопироксена по профилю (1-12) в таблице 5.1 приведены 4 разные значения температуры: Т(1), Т(2), Т(КН), Т(Н)? Насколько понятно из текста, четыре расчета для каждой точки различаются лишь составом расплава (влияющим на оценки Р), который никак не влияет на расчеты Т по формуле 5.8, т.к. Р не входит в эту формулу. При этом составы граната и клинопироксена одинаковы.

(4) В том виде, в котором она приведена на стр. 103 диссертации, формула 5.2 не соответствует формуле (8) в статье Сафонова и др. (2005). Так, член $W_{Ca} X_{Ca}^{M2} (1 - X_K^{M2})$ почему-то находится в знаменателе дроби под логарифмом, тогда как в оригинальной формуле этот член вычитается из логарифма константы равновесия. Это и должно быть,

поскольку этот член уравнения - избыточная парциальная энергия К-жадеитового компонента в пироксене и эта величина никогда не может стоять под логарифмом. Кроме того, перед всей формулой в оригинальной формуле стоит знак «минус». Не понятна также формула расчета X_{Al}^{M1} в пироксене (5.5): почему в сумме компонентов в знаменателе дроби отсутствует Fe, оно же тоже входит в позицию M1. Дополню также, что X_i^L - это не активности (как сказано на стр. 103), а мольные доли компонентов в расплаве. Учитывая эти замечания, возникает вопрос, является ли формула 5.2 именно той, по которой производились расчеты, или все ее неточности в тексте по сравнению с оригинальной формулой (8) из работы Сафонова и др. (2005) – это лишь досадные опечатки?

В разделах 5.2-5.4 автор анализирует возможные модели образования калийсодержащего клинопироксена и эволюции его состава в свете полученных данных. А.О. Михно приходит к выводу, что наиболее вероятной моделью является рост минерала при прогрессивном метаморфизме от 5.5 ГПа и 870°C до 7.6 ГПа и 950-1100°C в присутствии алюмосиликатного расплава почти постоянного состава, который был равновесен также с небольшими порциями карбонатного и сульфидного расплавов. В целом эта модель вполне оправдана. Однако она вызывает *следующие вопросы*.

(1) Каким образом расплав мог сохраняться в субстрате, не мигрируя вверх, в ходе погружения пород более, чем на 60 км. (с 5.5 до 7.6 ГПа)! Автор придерживается выводов А. В. Корсакова и Й. Херманна (Korsakov, Hermann, 2006) о том, что этот расплав генерировался при частичном плавлении метаосадков. Этот вывод, действительно, весьма продуктивный, и я его вполне поддерживаю. Из него следует, что объем расплава был вполне достаточен для миграции из источника. Почему же он тогда «застревал» в карбонатно-силикатных породах, при этом даже погружаясь с ними вместе на 60 км. и не изменяясь в составе? На мой взгляд, логичнее предположить, что расплав генерировался на пике метаморфизма и в ходе миграции вверх взаимодействовал с мраморами, образуя гранат-пироксеновые ассоциации. На начальных этапах взаимодействия, контаминация силикатного расплава карбонатным материалом вела к его «разбавлению», что способствовало к кристаллизации клинопироксена с небольшими концентрациями K_2O . Эксперименты Сафонова и др. (2006, ДАН, Т. 408, № 4, С. 580-585) действительно показали, что «контаминация» калиевого алюмосиликатного расплава доломитом сказывается в снижении концентрациями K_2O в клинопироксене. По мере интенсификации взаимодействия концентрация K_2O возрастала. Кстати, автор не исключает такой механизм для образования гранат-пироксеновых ассоциаций, констатируя на стр. 119, что «вариации в содержании кальция в составе силикатного расплава объясняются различным вкладом карбонатной составляющей и гранитного расплава...». Локальность процесса объясняет редкость включений пироксенов с прогрессивной зональностью.

(2) Второй вопрос – это место граната в процессе. Выше я указывал, что специфическая зональность включений клинопироксена как по К, так и по X_{Mg} указывает, что включения захватывались позднее (возможно, значительно) пика метаморфизма пород, соответствуя скорее этапу 3, а не этапу 2, на рис. 5.2. Ведь включений, в которых не отмечается регрессивной зональности, не описано ни в данной работе, ни в предыдущих работах.

(3) Третий вопрос – это механизм образования ламелей $KAlSi_3O_8$. Вне того, что за фаза образуется в ламелях (санидин, кимрит или кокчетавит) за счет К-жадеитового компонента клинопироксена, она требует либо добавления SiO_2 ($KAlSi_2O_6 + SiO_2 = KAlSi_3O_8$), либо присутствия в твердом растворе Са-молекулы Эсколы (Luth, 1997). Второй вариант

