

Утверждаю

Директор ФГБУН Институт Геологии
рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН,
доктор геолого-минералогических наук, чл.-кор. РАН,
Петров Владислав Александрович

8 декабря 2021 г.

Отзыв

ведущей организации на диссертацию
БАНУШКИНОЙ Софьи Викторовны

**«ФАЗОВЫЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ И
ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ В
КВАРЦНОРМАТИВНОЙ ОБЛАСТИ
СОСТАВОВ СИСТЕМЫ $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-}$
 SiO_2 (CMAS) НА ОСНОВЕ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО
ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЧЕНИЯ ДИОПСИД -
КАЛЬЦИЕВАЯ МОЛЕКУЛА ЭСКОЛА»**

представленную на соискание ученой степени кандидата геолого- минералогических наук по специальности 25.00.04 - петрология, вулканология

Актуальность работы Банушкиной С.В. не вызывает сомнений. Она обусловлена необходимостью развития и совершенствования методов оценки условий образования глубинных пород мантийного происхождения. Особое значение в этом направлении имеет твердый раствор клинопироксена, который является одним из главных породообразующих минералов верхней мантии. Широкий изоморфизм, проявленный в клинопироксене, делает его состав одним из наиболее перспективных (и часто используемых) индикаторов температуры, давления и летучести кислорода – важнейших физико-химических параметров глубинного петрогенеза. В принципиально важной системе $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS), охватывающей порядка 90% составов глубинных пород, наименее изученным является твердый раствор диопсид (Di)-Ca-молекула Эскола (Esc), что вполне объясняет необходимость исследований, проведенных диссертантом.

Основу диссертации составляют экспериментальные исследования фазовых соотношений, особенностей плавления и уточнении составов сосуществующих клинопироксенов в сечении Di-CaEs модельной системы CMAS в широком интервале давлений 10^{-4} - 3,0 ГПа.

Среди результатов диссертационной работы, составляющими ее **новизну**, наиболее значимым, на наш взгляд, является вывод о том, что процессы плавления в кварцнормативной области составов системы CMAS начинаются при аномально низких температурах ($1137...1317 \pm 10$ °C) по сравнению с форстерит- и корунднормативной областями, что, в соответствии с экспериментальными данными автора, обусловлено одновременным существованием двух клинопироксенов – Al_2O_3 -содержащего клинопироксена Cpx и магнезиального безглиноземистого диопсида Di, которые образуют стабильные субсолидусные ассоциации вида (Cpx+Di+An+Tr), (Cpx+Di+An+Qtz) и (Cpx+Di+Grt+Qtz). Тренд, сформированный эвтектическими реакциями $L=Cpx+Di+Grt+Qtz$, $L=Cpx+Di+An+Qtz$, $L=Cpx+Di+An+Tr$, контролирует эволюцию кварцнормативных пород в пространстве.

Несколько особняком от основной задачи, сформулированной в работе, стоит экспериментальное изучение вязкости гомогенного расплава синтетического диопсида при 4,0 ГПа и 1800 °C. Однако можно согласиться, что здесь также получен **очень важный новый результат**, указывающий на то, что введение в систему оливина в количестве до 10 мас. % не сказывается на величине вязкости расплава, а с повышением содержания оливина до 30-50 мас. % происходит резкое (скачкообразное) возрастание вязкости на 3 порядка и более. Таким образом, в природных условиях обогащение расплавов основного состава твердыми фазами может способствовать задержке продвижения (перемещения) таких расплавов в магмоподводящих каналах и их закупорке, или приводить к взрывному типу извержения, например, образованию трубок взрыва.

Первое из защищаемых положений диссертации, по поводу того, что из исходных валовых составов, отвечающих сечению Di-CaEs, в (p, T) диапазоне 10^{-3} - 3,0 ГПа и 960-1550 °C в различных ассоциациях кристаллизуются клинопироксены состава Di-En-CaTs-CaEs, **представляется весьма тривиальным**.

Здесь же сразу заметим, что *сквозной арифметической ошибкой текста* диссертации является перевод давления 1 атм в гигапаскали: $1 \text{ атм} = 10^{-4}$ ГПа, а не 10^{-3} , как везде в тексте.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Текст изложен на 131 странице, сопровождается 28 иллюстрациями и 9 таблицами. Список литературы включает в себя 193 наименования. В ее основе лежит большой фактический экспериментальный материал и широкое применение современных методов исследования. В процессе экспериментальных исследований проведено 47 опытов при атмосферном давлении и 33 опыта в интервале давлений 1,0-1,5 ГПа. Также повторно проанализированы результаты 34 выполненных ранее в лаборатории автора опытов при давлениях 2,0-3,0 ГПа. Обработано и получено более 900 анализов на сканирующем электронном микроскопе SEM методом EDS и 1400 анализов на электронном микроанализаторе методом WDS; снято 237 спектров на

спектрометре комбинационного рассеяния. В процессе исследования вязкости диопсидового расплава проведено 5 опытов при 4,0 ГПа и 1800 °С на беспрессовом многопуансонном аппарате “разрезная сфера” (БАРС) методом падающего платинового шарика; выполнены расчеты относительной вязкости по методу Стокса и с использованием уравнения Эйнштейна-Роско.

Во **Введении** приведены общие сведения об актуальности, новизне и практической значимости работы, объекте, задачах и целях исследования, фактическом материале, личном вкладе автора в работу и о публикациях автора по теме диссертации. Во **Введении** автор также формулирует 3 защищаемых положения. Как уже отмечалось выше, наиболее значимыми из них представляются второе и третье защищаемых положений, тогда как первое можно отнести к результату, вполне ожидаемому для выбранного сечения системы CMAS.

Глава 1 представляет обзор результатов предшествующих экспериментальных и теоретических работ, посвященных проблеме эсколаитового замещения в клинопироксене, и обосновывается необходимость проведения исследований, составляющих предмет диссертации. Автор демонстрирует знание практически всех литературных данных и способность критически выделять нерешенные задачи.

В этой главе допущены некоторые неточности:

Стр. 16. Ион Ca^{2+} не входит в позицию М1 клинопироксена, тогда как Mg^{2+} и Fe^{2+} обычно могут входить в позицию М2 (в составах, отклоняющихся в сторону образования твердых растворов пижонитового ряда).

Стр. 17.

- 1) Пространственная группа омфацита $P2/n$ или $C2/c$, а не $P2$.
- 2) При эсколаитовом замещении вакансии в позиции М2 не требуют никакой компенсации избытком трехвалентных катионов в М1.
- 3) Заключение о сомнительности вывода о необходимости высокого давления для стабилизации пироксенов со значительной долей Esc представляется неверным, т.к. уже в работе Т. МакКормика (1986) было показано, что экстраполированный из рентгеновских определений мольный объем Ca- Esc низок, а значит **высокое давление должно стабилизировать твердые растворы с этим миналом**. В этой связи было бы интересно и важно для целей работы провести исследование заселенности структурных позиций М1 и Т клинопироксена для относительно богатых Ca- Esc составов, например, с помощью ЯМР спектроскопии. Ведь нельзя исключить возможность, что часть атомов Si входит в позицию М1, а в Т – часть Al.

Рис. 1.2 (и рис. 2.1 в следующей главе). Представляется, что наиболее ярко фазовые отношения можно было бы показать на треугольной диаграмме в координатах Di - Ca-Tsch - Qtz, которая практически полно охватывает все наблюдавшиеся фазы и их состав, за

исключением очень небольшого (судя по результатам главы 3) отклонения клинопироксена в сторону твердого раствора клиноэнстатита.

Глава 2 посвящена описанию методики экспериментов. К этой главе нет замечаний. Следует отметить достижение автора в наплавлении исходных гомогенных стекол, что само по себе – вполне нетривиальная задача. Нельзя не согласиться, что их использование в качестве стартовых материалов опытов намного предпочтительней, чем механических смесей оксидов. В этой главе автор также продемонстрировала отличное понимание техники экспериментов и использованных в работе методов анализа продуктов.

В **главе 3**, являющейся одной из ключевых в диссертации, приводятся результаты экспериментов при 1 атм (раздел 3.1) и высоком давлении (1,0-3,0 ГПа; раздел 3.2). Эта глава характеризуется тщательностью и отличным представлением экспериментальных данных. Вполне справедливо внимание, которое автор уделила доказательству того, что сложные структуры продуктов опытов при 1 атм не связаны с девитрификацией расплава. Пожалуй, **главная претензия к материалу этой главы** – отсутствие на фото продуктов опытов при 1 атм обозначений диопсида и глиноземистого клинопироксена – прямых доказательств сосуществования двух пироксенов. На фото продуктов высокобарных опытов такие обозначения есть на рис. 3.9а и 3.9г, однако они не очень убедительны, т.к. Сrx на обоих находится внутри «карманов» расплава, а хорошо известно, что высокоглиноземистый пироксен может кристаллизоваться из них неравновесно.

На рис. 3.11 и 3.12 показаны составы Сrx из опытов с содержанием Са- Esc до 40 мол.%. В таблицах 5 и 8 диссертации максимальное отклонение суммы катионов от 4 составляет 0.084 (при 1 атм) и 0.1 (при высоких P). Если воспользоваться упрощенной формулой $X(\text{Ca- Esc}) = 2 \cdot (4 - \Sigma \text{кат.})$, то максимальные содержания этого минала должны быть только 17 и 20 мол.%, соответственно.

В **четвертой главе** на основе экспериментальных данных представлен анализ топологии моновариантных реакций для составов в сечении диопсид-эсколаит. Но главный результат экспериментов – сосуществование двух клинопироксенов как при 1 атм (**еще раз отметим, что 1 атм = 10^{-4} ГПа, а не 10^{-3} , как везде в работе**), так и при высоком давлении (рис. 4.1 – 4.4), причем **в субсолидусе** (а не в «солидусе», как везде в диссертации) диопсид появляется с увеличением содержания Са- Esc в валовом составе системы. Хотелось бы увидеть в этой главе объяснение этого, очень важного и контр интуитивного результата! При этом отметим, что в опытах при 1 атм и 1 ГПа поле сосуществования только двух клинопироксенов в субсолидусе не наблюдалось (рис. 4.1, 4.2), а при 2 и 3 ГПа вообще все субсолидусные ассоциации охарактеризованы единичными опытами. В то же время при топологическом анализе ассоциация Сrx + Di участвует почти во всех моновариантных реакциях, включая субсолидусную (L) (рис. 4.5). **Для убедительного доказательства сосуществования двух клинопироксенов в субсолидусе в будущем необходимо провести эксперименты с исходными смесями кристаллических фаз.**

Глава 5 посвящена петрологическим приложениям экспериментальных результатов.

Раздел 5.1 по существу подводит итоги результатов, изложенных в двух предыдущих главах. Центральную роль здесь снова играет вывод о сосуществовании двух клинопироксенов (Рис. 5.1). На этом рисунке показана широкая область несмесимости в ряду $Di - Ca-Tsch$, что возможно только при низких значениях температуры и давления.

В разделе 5.2 рассмотрены модели генезиса «гранитоподобных пород». Здесь автор демонстрирует отличное знание литературы по проблеме происхождения гранитоидов и указывает на возможность предложить еще одну гипотезу на основе оригинальных экспериментальных данных диссертации.

В разделе 5.3 обсуждаются возможные тренды магматической дифференциации при плавлении мантийного вещества, моделируемого системой CMAS. Главным здесь является вывод, на основе проведенных экспериментов, что магматическая дифференциация может приводить к появлению сравнительно низкотемпературных и обогащенных кремнеземом расплавов. Как уже отмечалось выше, этот очень интересный и петрологически очень важный вывод необходимо в будущем подкрепить более детальным исследованием субсолидусной ассоциации с двумя клинопироксенами.

В 6-ой главе представлены результаты экспериментов и расчетов по определению вязкости расплава диопсида. Хотя она напрямую не связана с основными задачами работы, автору удалось освоить очень сложную методику экспериментального определения вязкости расплавов и гетерогенных систем расплав + кристаллы при высоких P-T параметрах и сделать важный вывод о том, что эффективный подъем глубинных магм возможен только при сравнительно невысокой доле кристаллических фаз (<20-30 масс. %).

В заключение отметим, что, не смотря на отмеченные выше неточности и сделанные замечания, в целом представленная работа характеризует автора как вполне сложившегося исследователя, хорошо разбирающегося как в фундаментальных петрологических проблемах, так и в экспериментальных методах их решения.

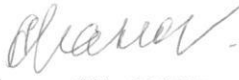
Согласно «Положению ВАК России», работа Банушкиной Софьи Викторовны «**ФАЗОВЫЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПЛАВЛЕНИЯ В КВАРЦНОРМАТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОСТАВОВ СИСТЕМЫ $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$ (CMAS) НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЧЕНИЯ ДИОПСИД - КАЛЬЦИЕВАЯ МОЛЕКУЛА ЭСКОЛА**» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание степени кандидата наук. Автор диссертации, Софья Викторовна Банушкина, заслуживает присуждения степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 - петрология, вулканология.

Текст автореферата полностью отражает содержание всей диссертационной работы.

Составители отзыва:

Доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Лаборатории метаморфизма и метасоматоза ИГЕМ РАН, чл.-кор. РАН

Аранович Леонид Яковлевич



Л.Я. Аранович

119017 Москва, Старомонетный пер. 35, ФГБУН Институт Геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, тел. (8499)-230-8497, e-mail: lyaranov@igem.ru

Доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Лаборатории геохимии ИГЕМ РАН

Гирнис Андрей Владиславович...



А.В. Гирнис

119017 Москва, Старомонетный пер. 35, ФГБУН Институт Геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН, тел. (8499)-230-8415, e-mail: girnis@igem.ru

Мы, Аранович Л.Я., Гирнис А.В., даем согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

7 декабря 2021 г.



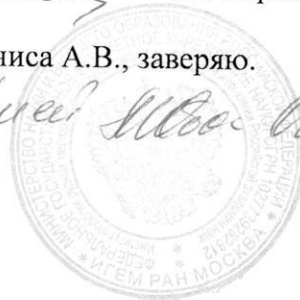
Л.Я. Аранович



А.В. Гирнис

Подписи авторов отзыва, Арановича Л.Я. и Гирниса А.В., заверяю.

зав. канцелярией ИГЕМ РАН М.И. Козловский



Отзыв заслушан и утвержден в качестве официального на совместном заседании лаборатории метаморфизма и метасоматоза и лаборатории редкометального магматизма ФГБУН Институт Геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии (ИГЕМ) РАН 8 декабря 2021 г.

Заведующий лабораторией метаморфизма и метасоматоза ИГЕМ РАН,

Доктор геол-мин.наук



В.М. Козловский

Заведующий лабораторией редкометального магматизма ИГЕМ РАН,

Академик РАН



В.В. Ярмолук

Подписи В.М. Козловского и В.В. Ярмолюка заверяю.

зав. канцелярией ИГЕМ РАН М.И. Козловский

