

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки
Института геологии и минералогии
им. В.С. Соболева Сибирского
отделения Российской академии
наук, чл.-корр. РАН
Крук Николай Николаевич



Handwritten signature

« 26 » *Handwritten date* 2021 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН)**

Диссертация «**Фазовые взаимоотношения и особенности плавления в кварцнормативной области системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) на основе экспериментального исследования сечения диопсид – кальциевая молекула Эскола**» выполнена в лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов (№445) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук.

В период подготовки диссертации соискатель **Банушкина Софья Викторовна** работала в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук в лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов (№445) в должности младшего научного сотрудника.

В 2015 г. окончила геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета (Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет») по специальности «петрология». В 2018 г. окончила очную аспирантуру при ИГМ СО РАН по специальности «петрология, вулканология». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов и диплом об окончании аспирантуры № 105424 3757115 от 31 августа 2018 г. выданы от Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель – Чепуров Анатолий Ильич, доктор геолого-минералогических наук, работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения РАН в лаборатории экспериментальной петрологии (№449) в должности ведущего научного сотрудника.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Цель диссертационной работы С.В. Банушкиной – экспериментальное определение фазовых взаимоотношений и особенностей плавления в кварцнормативной области CMAS-системы; экспериментальное определение вязкости гомогенного расплава диопсида и в смеси его с оливином. **Объектами исследования** являются синтетические составы, принадлежащие сечению диопсид – кальциевая молекула Эскола; синтетический порошок диопсида и природный оливин из мантийных ксенолитов вулкана Шаварын-Царам (Монголия).

Актуальность исследования и постановка научной проблемы.

Четырехкомпонентная система $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) является достаточно полным объектом для моделирования глубинных процессов, поскольку в ней образуются практически все фазы, соответствующие минералам глубинных пород. Составы твердых растворов клинопироксенов можно считать универсальным индикатором физико-химических условий образования пород: они встречаются повсеместно и имеют широчайшие вариации состава. Согласно многочисленным работам отечественных и зарубежных исследователей твердые растворы клинопироксенов, не лежащие в плоскости энстатит-волластонит-корунд, наиболее значительны в направлении кремнезема (SiO_2) или минала кальций-эсколаита ($\text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$), и были предприняты попытки определить зависимость состава таких нестехиометричных клинопироксенов от

температуры и давления. Однако последующий анализ всего комплекса материала выявил некоторые противоречия. Проблема устойчивости нестехиометричных клинопироксенов в последние десятилетия решалась посредством экспериментального исследования сечения диопсид - кальциевая молекула Эскола (Di-CaEs) и фазовых взаимоотношений в кварцнормативной области CMAS-системы, в которой реализуемые фазовые ассоциации соответствуют таким парагенезисам, как кварцевые (коэситовые) эклогиты и гроспидиты. Полученные неоднозначные результаты показали, что необходимо детальное исследование и адекватное построение фазовой диаграммы модельной системы, что позволит более обосновано трактовать генезис глубинных пород.

Разработка геодинамических моделей перемещения расплавов в мантии и земной коре невозможна без данных по оценке вязкости таких расплавов. В настоящем исследовании была проведена также экспериментальная оценка вязкости модельного состава на основе диопсида при высоких ($p-t^0$) параметрах.

Наиболее важные научные результаты, полученные соискателем

Детально исследована кварцнормативная область CMAS-системы. **Проведены** эксперименты с составами, принадлежащими сечению диопсид – кальциевая молекула Эскола, в широком интервале температур (960-1550 °C) и давлений (1 атм-3,0 ГПа). **Уточнены** составы твердых растворов клинопироксенов и сосуществующих с ними фаз. **Установлено** наличие двух клинопироксенов в субсолидусной ассоциации: диопсид, состав которого находится в сечении Di-En, и глиноземсодержащий клинопироксен, твердые растворы которого представлены серией Di-En-CaTs-CaEs. **Построен** тетраэдр составов клинопироксенов.

Показано, что солидусные фазы в сечении диопсид – кальциевая молекула Эскола представляют собой остаточные структуры, возникающие в результате девитрификации исходного стекла и характеризующие смену условий кристаллизации в области солидуса.

По результатам исследования **построены** фазовые (t^0-x) - диаграммы.

В кварцнормативной области CMAS-системы **выделены** эвтектические моновариантные реакции, для которых характерны пониженные температуры плавления (температурный диапазон составляет 1137...1275 °C в исследованном интервале давлений). **Отмечено**, что подобное понижение температур вызвано стабилизацией фазы диопсида к субсолидусным ассоциациям вида (клинопироксен+анортит+кварц) и (клинопироксен+гранат+кварц).

Построены тренды эвтектической кристаллизации в (p, t^0) - координатах с участием выделенных фаз. Представленные тренды характеризуют смену полей устойчивости ассоциаций фаз (и, соответственно, минеральных парагенезисов). В частности, для кварцнормативной области CMAS-системы смена (клинопироксен+гранат) на (клинопироксен+анортит) соответствует переходу пород от ультраосновного состава к основному составу с понижением давления.

В работе также **изложены** традиционные модели выплавления гранитоподобных пород, и на основании полученных экспериментальных данных **предложен возможный механизм** эволюции **кварцнормативных** составов, соответствующих кварцевым и кианитовым эклогитам и гроспидитам, к поверхности, что вполне согласуется с гипотезой В.С. Соболева о происхождении кислых магм.

Экспериментально продемонстрировано, что расплав диопсида с небольшим количеством твердой фазы в виде кристаллов оливина имеет довольно низкую относительную вязкость при 4,0 ГПа и 1800 °С, которая обеспечивает высокую скорость продвижения таких магм даже сквозь узкие каналы. **Проведены расчеты** вязкости диопсидового расплава. Вязкость расплава, содержащего до 10 мас. % твердой фазы, существенно не меняется, а с добавлением твердой фазы - прогрессивно увеличивается: при 30 мас. % твердой фазы вязкость расплава составляет ~ 100 Па·с, при 50 мас. % - выше 1000 Па·с.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации

Основу диссертации составляют исследования, проведенные автором в период с 2011 по 2020 годы. Личный вклад автора состоит в критическом анализе литературы, в непосредственном участии в подготовке и проведении экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, анализе и синтезе результатов, написании текстов статей, тезисов и материалов конференций.

Высокая степень достоверности и обоснованности результатов проведенных исследований

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется комплексным характером выполненных исследований, большим объемом фактического материала, тщательной пробоподготовкой, качественным проведением экспериментов.

Для решения поставленных задач используются высокочувствительные аналитические методы. Исследование фазовых взаимоотношений проводилось методом оптической микроскопии (микроскоп Olympus BX-51, снабженный цифровой фотокамерой

высокого разрешения ColorView III). Химический анализ состава фаз проводился электронно-зондовым методом на микроанализаторе Camebax-Micro, методом сканирующей электронной микроскопии (сканирующий микроскоп MIRA3-LMU (Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80) и спектроскопии комбинационного рассеяния (спектроанализатор LabRAM HR800 фирмы Horiba Jobin Yvon с использованием 532-нм эмиссионной линии Nd-лазера) в аналитическом центре ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Результаты исследований апробированы на российских конференциях и опубликованы в рецензируемых журналах.

Научная новизна и практическая значимость работы

Обнаруженное понижение температур плавления для кварцнормативной области CMAS-системы может способствовать реализации механизма накопления больших объемов расплава, и в дальнейшем позволит с физико-химической точки зрения аргументировать генезис крупных интрузивов на поверхности земли.

Установленные фазовые объемы, включающие ассоциацию вида (диопсид+клинопироксен), крайне важны для их последующей диагностики среди горных пород и глубинных ксенолитов. Дополнение CMAS-системы щелочными компонентами и применение представленных в данной работе закономерностей может быть использовано для лучшего понимания процесса формирования глубинных парагенезисов.

Изучение устойчивости клинопироксеновых твердых растворов необходимо для решения многих геотермобарометрических вопросов. Выделенный кварцнормативный эвтектический тренд позволяет предложить возможную модель эволюции кварцнормативных составов CMAS-системы. Полученные фазовые взаимоотношения могут быть основой для изучения влияния щелочей, железистого компонента, и т.д. на устойчивость кварцнормативных минеральных ассоциаций.

Совместно с лучами моновариантных реакций форстеритнормативной области составов, ранее исследованных и опубликованных, выделенный в настоящей работе кварцнормативный тренд образует единую топологическую сеть, полноценно описывающую CMAS-систему, что немаловажно для дальнейшего моделирования глубинных процессов.

Полученные результаты по исследованию вязкости диопсидового расплава позволили сделать вывод, что высокое содержание твердой фазы в расплаве будет препятствовать его высокоскоростному продвижению к поверхности Земли. Можно ожидать, что магмы с содержанием твердой фазы >30 мас. %, ввиду резкого возрастания

относительной вязкости системы, могут значительно замедлять свое продвижение, и вероятно, закупоривать подводящие каналы, либо перемещаться к поверхности по взрывному типу извержения.

Соответствие темы и содержания диссертации

Диссертационная работа С.В. Банушкиной представляет собой законченную научно-квалификационную работу, посвященную детальному исследованию кварцнормативной области CMAS-системы ($\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$) на примере сечения диопсид – кальциевая молекула Эскола, а также экспериментального определения вязкости гомогенного диопсидового расплава и в смеси его с оливином. Область исследования соответствует **паспорту специальности 25.00.04 (петрология, вулканология) по геолого-минералогическим наукам по следующим пунктам: п.2. Магматическая петрология (источники магматических расплавов, физико-химические условия возникновения, существования и эволюции расплавов; процессы дифференциации, ассимиляции, смешения и расслоения магматических расплавов и физико-химическое моделирование этих процессов); п.8. Экспериментальная петрология (экспериментальные исследования фазовых равновесий; экспериментальное моделирование магматических, метаморфических и метасоматических процессов).**

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени

Основные научные результаты и материалы диссертационного исследования достаточно полно изложены в научных публикациях соискателя С.В. Банушкиной (с соавторами). Соискатель имеет 17 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано **7 работ в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций** и 6 работ в материалах всероссийских конференций.

Основные публикации соискателя, в которых опубликованы материалы диссертации (статьи в журналах списка ВАК)

1. **Банушкина С.В.,** Гартвич Ю.Г., Голицына З.Ф., Сурков Н.В. Экспериментальное исследование плавления в форстеритнормативной части системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в связи с существованием "эклогитового барьера" //

Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. - №11(65). - Ч. 3. - С. 173-180.
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.65.048>.

2. **Банушкина С.В.**, Гартвич Ю.Г., Голицына З.Ф., Сурков Н.В. Экспериментальное исследование моновариантных реакций плавления в форстеритнормативной части системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ в связи с образованием шпинелевых перидотитов // Международный научно-исследовательский журнал. - 2017а. - №12(66). - Ч. 2. - С. 152-161. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2017.66.050>.

3. Сурков Н.В., **Банушкина С.В.**, Гартвич Ю.Г. Особенности плавления ассоциаций с α -диопсидом в сечении $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 - \text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$ при атмосферном давлении // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2018. – Т.24. - №7. – С. 51-59. DOI: 10.21209/2227-9245-2018-24-7-51-59.

4. Golitsyna Z.F., **Banushkina S.V.**, Surkov N.V. Comparison of the compositions of crystalline aluminosilicate rocks and their minerals in a planar triangular projection // Russian Geology and Geophysics. - 2018. - Vol.59. - P. 257-267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rgg.2018.03.004>.

5. **Банушкина С.В.**, Сурков Н.В., Голицына З.Ф. Особенности плавления фаз в сечении диопсид – кальциевая молекула Эскола в интервале давлений $1 \text{ кгс/см}^2 - 20 \text{ кбар}$ // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2019. – Т. 25. - №7. – С. 6-17. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-6-17.

6. **Банушкина С.В.**, Чепуров А.И. Экспериментальное изучение вязкости расплава диопсида при высоком давлении // Известия АлтГУ. Физика. - 2020. - № 4 (114). - С. 17-20. DOI 10.14258/izvasu(2020)4-02.

7. **Банушкина С.В.**, Туркин А.И., Чепуров А.И. Клинопироксеновые твердые растворы в сечении $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6 - \text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$ при высоких P-T параметрах // Известия Иркутского государственного университета. Серия "Науки о Земле". - 2020. - Т. 34. - С. 37-54. DOI 10.26516/2073-3402.2020.34.37.

Диссертация «**Фазовые взаимоотношения и особенности плавления в кварцнормативной области системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS) на основе экспериментального исследования сечения диопсид – кальциевая молекула Эскола**» **Банушкиной Софьи Викторовны** рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук по специальности 25.00.04 – «Петрология, вулканология».

Заключение принято на расширенном заседании лаборатории физического и химического моделирования геологических процессов (№445) и лаборатории

экспериментальной петрологии (№449). Присутствовало на заседании 23 человека (из них 7 д.г.-м.н., 1 д.т.н., 3 к.г.-м.н., 2 н.с., 1 м.н.с., 1 вед.кон., 1 вед.инж., 1 инж., 6 инж.-иссл.). Результаты открытого голосования по вопросу принятия заключения по диссертации С.В. Банушкиной: «за» - 23 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол №1 от 24 июня 2021 г.

Заключение оформил:



*Сонин Валерий Михайлович
доктор геолого-минералогических
наук, ведущий научный сотрудник
лаборатории экспериментальной
петрологии (№449) ИГМ СО РАН*