

На правах рукописи

БАЛУШКИНА Софья Викторовна

**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**

25.00.04 – петрология, вулканология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

ИРКУТСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск).

Научный руководитель:

Чепуров Анатолий Ильич, доктор геолого-минералогических наук

Официальные оппоненты:

Зедгенизов Дмитрий Александрович, доктор геолого-минералогических наук, директор Института геологии и геохимии им. А.Н. Заварицкого УрО РАН

Бычинский Валерий Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук (ИГЕМ РАН, г. Москва)

Защита состоится 17 января 2022 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д.003.022.02 при Институте земной коры Сибирского отделения РАН

Адрес: 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН ИЗК СО РАН и на сайте:
<http://earth.crust.irk.ru/images/upload/newsfull199/2744.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, Д 003.022.02,
к.г.-м.н

Б.С. Данилов

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Фазовые диаграммы природных систем занимают особое место в понимании процессов формирования горных пород. Четырехкомпонентная система CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) считается модельной, поскольку в ней образуются практически все фазы, соответствующие минералам глубинных пород. В рамках реализации целей геотермобарометрии составы клинопироксенов можно считать универсальным индикатором физико-химических условий образования пород: они встречаются повсеместно и имеют широчайшие вариации состава. Преимущественно описываются стехиометричными минералами; тем не менее, допускалось существование нестехиометричных клинопироксенов с избыточным SiO₂ [Escola, 1921; Kushiro, Shairer, 1963; Kushiro, Yoder, 1966; Kushiro, 1972]; были предприняты попытки определить зависимость их состава от температуры и давления [Ханухова и др., 1976; Ханухова, 1978; Жариков и др., 1978; Жариков и др., 1980], однако не удалось предложить конкретную количественную корреляцию. Проблема устойчивости нестехиометричных клинопироксенов в последние десятилетия решалась посредством экспериментальных исследований фазовых взаимоотношений в сечении диопсид CaMgSi₂O₆ - кальциевая молекула Эскола Ca_{0,5}AlSi₂O₆ (Di-CaEs) [Сурков и др., 2004; Сурков и др., 2007], результаты которых показали специфичность кварцнормативной области CMAS-системы. В этой связи, возникла необходимость детального исследования составов твердых растворов фаз и фазовых взаимоотношений, реализуемых в сечении Di-CaEs, а также адекватного построения фазовой диаграммы модельной системы, что позволит более обосновано, с физико-химической точки зрения, трактовать генезис глубинных пород.

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном определении фазовых взаимоотношений, особенностей плавления и уточнении составов сосуществующих клинопироксенов в сечении Di-CaEs модельной системы CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) в интервале давлений 10⁻³ - 3,0 ГПа.

Защищаемые положения:

1. Из исходных валовых составов, отвечающих сечению Di-CaEs, в (p, T) диапазоне 10⁻³ - 3,0 ГПа и 960-1550 °С в различных ассоциациях кристаллизуются клинопироксены состава Di-En-CaTs-CaEs.

2. Основным фактором, контролирующим процессы плавления в кварцнормативной области составов CMAS-системы при аномально низких температурах (1137...1317±10 °С) относительно форстерит- и корунднормативной областей, является одновременное существование двух клинопироксенов – Al₂O₃-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.

3. Вязкость гомогенного расплава синтетического диопсида по экспериментальным данным при 4,0 ГПа и 1800 °С составляет менее 2 Па·с, а введение в расплав твердых фаз (оливин) в количестве до 10 мас. % не сказывается на величине вязкости расплава. При добавлении в расплав диопсида 30-50 мас. % оливина 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.

Научная новизна работы.

Подробно исследовано сечение Di-CaEs в интервале давлений 10⁻³-3,0 ГПа, по результатам экспериментов построены фазовые (Т-х)-диаграммы. Уточнены составы твердых растворов клинопироксенов и сосуществующих с ними фаз. Установлено наличие двух клинопироксенов в субсолидусной ассоциации: 1) глиноземсодержащий Cpx, состав которого представлен серией Di-En-CaTs-CaEs; 2) безглиноземистая (0 вес. % Al₂O₃) диопсидовая фаза Di, состав которого находится в сечении Di-En (количество En-минала ~5 мол. %) и характеризуется преобладанием магниального компонента над кальциевым. Построены тренды эвтектической кристаллизации в (р, Т) - координатах с участием выделенных фаз.

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. Вязкость расплава, содержащего до 10 мас. % твердой фазы, существенно не меняется, а с добавлением твердой фазы - прогрессивно увеличивается: при содержании 30 мас. % твердой фазы в своем составе расплав имеет вязкость порядка 100 Па·с; при 50 мас. % - значения, превышающие 1000 Па·с.

Практическая значимость работы.

Специфика фазовых взаимоотношений в кварцнормативной области CMAS-системы - совместное нахождение двух типов клинопироксенов в ассоциации - ведет к понижению температур плавления системы, что может способствовать реализации химического механизма накопления больших объемов алюмосиликатного расплава. Установленный тренд моновариантных эвтектических реакций представляет собой один из возможных путей эволюции кварцнормативных составов к поверхности. Использование выделенных в настоящей работе закономерностей в дополненной щелочными компонентами системе позволит глубже рассмотреть явления, сопутствующие образованию кварцнормативных пород, и аргументировано трактовать их генезис.

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.

Фактический материал и методы исследования. В процессе экспериментальных исследований проведено 47 опытов при атмосферном (10^{-3} ГПа) давлении и 33 опыта в интервале давлений 1,0-1,5 ГПа. Результаты 34 опытов при давлениях 2,0-3,0 ГПа, выполненных ранее в нашей лаборатории, были повторно проанализированы. Обработано и получено более 900 анализов на сканирующем электронном микроскопе SEM (EDS-метод), 1400 анализов на электронном микроанализаторе (EMР-метод); 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.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на XVII Всероссийском совещании по экспериментальной минералогии (7-9 сентября 2015 г., Новосибирск); на рабочем совещании "Геология и минерагения Северной Евразии" (3-5 октября 2017г., Новосибирск); на IV международной научной конференции "Корреляция алтаид и уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения" (2-6 апреля 2018 г., Новосибирск); на Всероссийском ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (16-17 апреля 2019 г., Москва); на V международной научной конференции "Корреляция алтаид и уралид: глубинное строение литосферы, стратиграфия, магматизм, метаморфизм, геодинамика и металлогения" (30 марта–2 апреля 2020 г., Новосибирск).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 статей в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень российских рецензируемых научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертаций; из них 1 статья индексируется Web of Science и 1 статья имеет Russian Science Citation Index на платформе Web of Science.

Структура и объем работы. Работа 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.

Техническая часть работы и интерпретация результатов проведена в лаборатории "Физического и химического моделирования геологических процессов" (445) Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, под руководством кандидата геолого-минералогических наук, доцента Н.В. Суркова.

Автор выражает признательность руководителю темы ведущему научному сотруднику лаборатории «Экспериментальной петрологии» (449) ИГМ СО РАН д.г.-м.н. А.И. Чепурову, заведующему лабораторией «Физического и химического моделирования геологических процессов» (445) ИГМ СО РАН д.г.-м.н. А.А. Кирдяшкину за обсуждение работы, внимание и поддержку на различных этапах ее выполнения. Автор благодарит д.г.-м.н. А.И. Туркина, д.г.-м.н. В.М. Сони́на, к.г.-м.н. Ю.Г. Гартвич, к.г.-м.н. В.Э. Дистанова и сотрудника аналитического центра ИГМ СО РАН В.А. Даниловскую за техническую помощь и научные консультации.

Глава 1. СОСТАВЫ КЛИНОПИРОКСЕНОВ И ФАЗОВЫЕ ВЗАИМООТНОШЕНИЯ В CMAS-СИСТЕМЕ

Упрощенная синтетическая система позволяет выяснить характеристики, которые наследуются при переходе к более сложным объектам, и разработать физико-химические модели, применимые для глубинных парагенезисов.

Система CMAS является достаточно полным объектом для моделирования глубинных процессов и пород; оксиды Ca, Mg, Al, Si составляют до 90 % от валового состава лерцолитов, дунитов, эклогитов, гарцбургитов и пр. Условно CMAS-систему (Рисунок 1) можно разделить на три подсистемы - форстерит-, корунд- и кварцнормативную, в зависимости от положения относительно плоскости энстатит-волластонит-корунд (En-Woll-Cor). Клинопироксеновые твердые растворы $Cpx(ss)$ имеют широчайшие вариации состава и встречаются повсеместно, тем самым, являясь универсальным индикатором физико-химических условий образования. Занимают центральную позицию в системе CMAS, основная часть расположена в плоскости En-Woll-Cor, и составы чаще всего описываются в стехиометричных миналах. Обнаружение повышенного содержания SiO_2 в синтетических $Cpx(ss)$ [Yoder, Tilley, 1962; O'Hara, Yoder, 1967; Sobolev et al., 1968; Соболев, 1974] и отсутствие свободного кварца в кварцнормативной области составов [Ringwood, Green, 1964; Грин, 1968; Жариков, 1974; Ишбулатов, 1977; Жариков, 1978] привело к проблеме избыточного кремнезема, одним из вариантов решения которой предполагалось растворение избыточного SiO_2 в Cpx в виде минала $Ca_{0,5}AlSi_2O_6$ (кальциевая молекула Эскола, CaEs) [Kushiro, 1969; Мао, 1971; Ханухова и др., 1976; Ханухова и др., 1977; Ишбулатов, 1977; Ханухова 1978; Жариков и др., 1980].

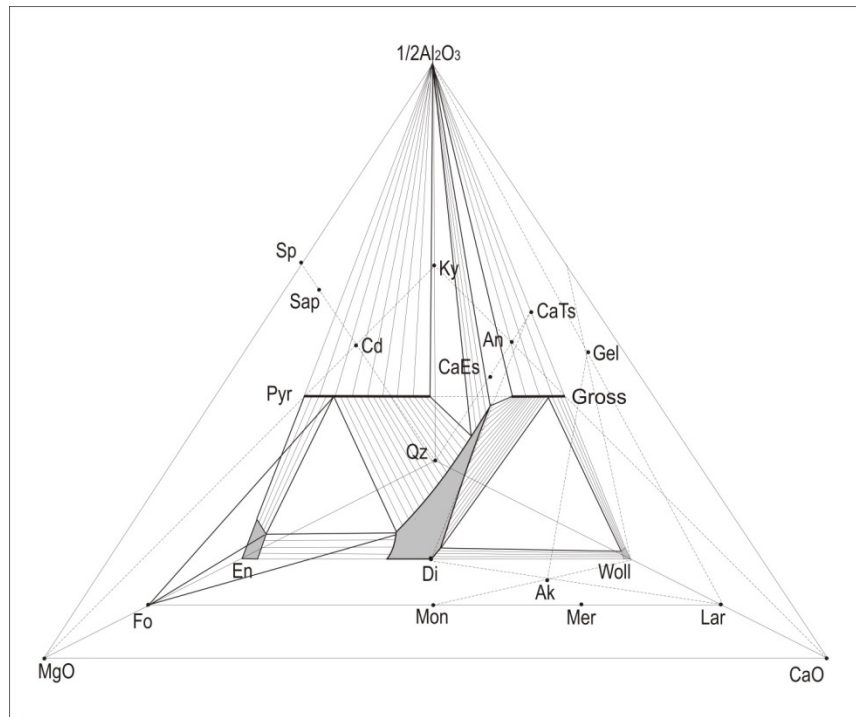


Рисунок 1 - Фазовые взаимоотношения в системе CMAS по данным [Boyd, 1970]

В публикациях отечественных и зарубежных исследователей [Ханухова и др., 1976; Жариков и др., 1980; Gasparik, 1984; Ишбулатов и др., 1986; Bruno et al., 2002; Ravna, Raquin, 2003; Konzett et al., 2008; Knapp et al., 2012; Schroeder-Frerkers et al., 2016] роль CaEs-минерала в CMAS-системе рассматривается, прежде всего, в контексте петрологии верхней мантии, с целью использования CaEs в качестве индикатора давления. Однако не удалось предложить конкретную количественную зависимость состава таких нестехиометричных клинопироксенов от (p, T)-параметров, несмотря на многочисленные экспериментальные данные и термодинамические расчёты [Wood, Henderson, 1978; Gasparik, 1980; Gasparik, 1984; Gasparik, 1986; Ишбулатов и др., 1986; Малиновская и др., 1991]. Устойчивость нестехиометричных клинопироксенов при высоких давлениях, учитывая их кристаллохимические особенности, также вызывала сомнения [Сурков и др., 2004; Сурков и др., 2007; Сурков и др., 2018; Golitsyna et al., 2018].

Вопрос, является ли CaEs-компонент функцией от давления, температуры или валового химического состава, до сих пор остается открытым [Wood, Henderson, 1978; Gasparik, 1986; Konzett et al., 2008; Zhao et al., 2011; Knapp et al., 2013]. Также не решена проблема условий и причин возможного распада CaEs-компонента в $Cpx(ss)$ [Жариков, 1984; Gasparik, 1986; Wood and Henderson, 1978; Wen et al., 2001; Janak et al., 2004; Konzett et al., 2008; Katayama, Maruyama, 2009; Zhao et al., 2011; Schroeder-Frerkers et al., 2016].

При этом сформированный к настоящему времени объем данных содержит результаты экспериментов, как с синтетическими, так и с природными образцами, при различных (p, T)-

условиях, в системах, преимущественно, CMAS+Na и CMAS+H₂O. В этом контексте сотрудниками нашей лаборатории был проведен ряд высокобарических экспериментов непосредственно в сечении Di-CaEs в "сухой" CMAS-системе [Сурков и др., 2004; Сурков и др., 2007]. Полученные результаты продемонстрировали тот факт, что фазовые взаимоотношения в кварцнормативной области CMAS-системы оказались несколько сложнее, чем можно было полагать из интерпретации предыдущих исследований, и, соответственно, необходимо более детальное изучение состава твердых растворов фаз и фазовых взаимоотношений, реализуемых в данном сечении.

Глава 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходные вещества приготовлены из прокаленных оксидов CaO, MgO, Al₂O₃, SiO₂ весовым методом. Эксперименты при атмосферном давлении проведены на вертикальной шахтной электропечи сопротивления с нагревательными элементами из карбида кремния. В средней части печи помещаются платиновые ампулы с образцами, к которым вплотную прилегает спай платинородиевой термопары Pt-PtRh10. Интервал колебания температуры от заданного значения не превышал ± 1 °C. Процедура закалки образцов до комнатной температуры не превышала 3-5 секунд.

Высокобарические эксперименты (1,0-3,0 ГПа) проведены на аппарате высокого давления типа "поршень-цилиндр" методом закалки [Boyd, England, 1960; Morey, 1964; Годовиков и др., 1971; Сурков и др., 2007]. В качестве среды, передающей давление, взят спрессованный и прокаленный хлорид натрия NaCl [Сурков, Гартвич, 2012], чьи физико-механические свойства (высокая пластичность и стабильная теплоизоляция) позволяют проводить длительные опыты при высокой температуре. В середину трубчатого графитового нагревателя помещается платиновая ампула (толщина стенки 0,5 мм) с образцом. Сверху ампулы устанавливается платинородиевая термопара PtRh6-PtRh30. Точность поддержания температуры в ходе экспериментов составила ± 1 °C; точность поддержания давления - $\pm 0,03$ ГПа [Сурков, 1983; Сурков и др., 2007; Сурков, Гартвич, 2012]. Процедура закалки образцов до комнатной температуры не превышала 5-7 секунд.

Из поперечного скола полученных образцов были изготовлены двусторонне полированные шлифы, с ориентировкой преимущественно вдоль вертикальной оси. Анализ фазовых взаимоотношений проведен на поляризационном петрографическом микроскопе ПОЛАМ Л-211 и Olympus BX51 с фотоприставкой; анализ состава фаз - электронно-зондовым методом на микроанализаторе Camebax-Micro и на электронном сканирующем микроскопе MIRA3-LMU (Tescan Orsay Holding) с системой микроанализа INCA Energy 450+ XMax 80 (Oxford Instruments Nanoanalysis Ltd) [Лаврентьев и др., 2015]. Дополнительная диагностика

фаз проводилась по спектрам комбинационного рассеяния на спектрометре LabRAM HR800 (Horiba Jobin Yvon).

Эксперименты по исследованию вязкости диопсидового расплава были проведены на беспрессовом многопуансонном аппарате “разрезная сфера” (БАРС) методом падающего платинового Pt шарика [Чепуров и др., 2009]. Во внутреннюю рабочую полость, имеющую форму куба, помещается твердофазная ячейка высокого давления (ЯВД) с образцом. В качестве образцов были использованы навески, спрессованные из порошка синтетического диопсида, предварительно перетертого на шаровой мельнице, с добавлением зерен природного оливина из мантийных ксенолитов вулкана Шаварын-Царам (Монголия), также раздробленного и отсортированного в ситах, в форме цилиндра с Pt шариком в центре. Платиновые шарики были изготовлены плавлением кусочков Pt при высоком давлении в расплавленном CsCl. Были отобраны шарики диаметром 0,1-1,0 мм, контроль размера проводился с помощью микроскопа МБИ-15 с точностью до $\pm 0,01$ мм.

Для измерения температуры в ЯВД помещается платинородиевая термопара (Pt/Rh 30/6), подведенная к образцу через нижнюю электроводную крышку. Точность определения температуры составляла ± 25 °С. Давление фиксируется манометром; в качестве реперов для калибровки давления были использованы PbSe и Bi. Точность определения давления в ЯВД составляет $\pm 0,2$ ГПа. Время закалки составляло 2-3 секунды; сброс давления осуществлялся со скоростью 0,3-0,5 ГПа/мин. После экспериментов образцы были распилены вдоль вертикальной оси и шлифованы. Положение Pt шарика фиксировалось с помощью микроскопа МБС-10. Для расчета относительной вязкости расплава диопсида были использованы метод Стокса и уравнение Эйнштейна-Роско.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СЕЧЕНИИ ДИОПСИД – КАЛЬЦИЕВАЯ МОЛЕКУЛА ЭСКОЛА

Эксперименты при атмосферном давлении (10^{-3} ГПа) проведены в интервале температур 960...1240 °С, длительность от 53 ч до 414 ч; при 1,0-1,5 ГПа, температура 1171...1363 ± 10 °С, длительность от 4 ч до 25 ч; при 2,0 ГПа - температура 1218...1470 ± 10 °С, длительность от 5,5 ч до 38 ч; при 3,0 ГПа - температура 1219...1547 ± 10 °С, длительность от 0,3 ч до 38 ч. Обнаружены фазы: глиноземсодержащий клинопироксен Sr_x , безглиноземистый Di , анортит An , гранат Grt (в опытах при 3,0 ГПа), кварц Qtz (тридимит Tr в опытах при атмосферном давлении), расплав L .

В продуктах опытов в солидусе клинопироксеновые твердые растворы $Sr_x(ss)$ формируют сложные морфологические образования, от крупных зерен до мелкокристаллических (1-3 мкм) агрегатов. В связи с дискуссионностью вопроса, являются ли

обнаруженные структуры следствием девитрификации стекла в условиях солидуса, либо эти структуры образовались при закалке расплава, дополнительно был произведён отжиг стекла состава стехиометричного диопсида ($\text{CaO}:\text{MgO}:\text{SiO}_2=1:1:2$) при $T=1100$ °C с выдержкой 1 час, 24 часа и 72 часа. В результате образовались аналогичные структуры, которые обладают хорошей сохранностью при длительном отжиге. Таким образом, полученные в опытах остаточные структуры $\text{Cpx}(\text{ss})$ характеризуют смену условий кристаллизации в области солидуса. По результатам EDS-анализа отмечена фазовая идентичность и однородность состава по всей площади шлифа. Фазы в образцах образуют тесные срастания друг с другом, что несколько усложнило диагностику, в частности, анортита An и кварца Qtz, которые визуально не выделяются среди матрицы Cpx , однако на КР-спектрах всегда присутствуют их характерные пики. Зональность зерен и разброс по составу в разных зернах не зафиксированы, что свидетельствует о достижении равновесного процесса.

В присутствии граната Grt (и в незначительной степени, анортита An), количество Al^{3+} в Cpx уменьшается, т.е. наблюдается зависимость состава Cpx от ассоциации полученных фаз. Состав Di характеризуется отсутствием Al^{3+} , преобладанием магниального компонента над кальциевым (количество энстатитового компонента до ~ 5 мол.%), близкое к идеальному содержание SiO_2 . Гранат Grt принадлежит твердым растворам пироп-гроссулярового ряда (количество пиропового компонента достигает $\sim 3-6$ мол.%). Плавление диагностируется по наличию стекла в шлифе. Состав расплава - кальциевый и кремнистый (Таблица 1).

Таблица 1 – Избранные составы фаз в продуктах экспериментов. EDS-анализ.

No. опыта	p, ГПа	T, °C	CaEs, мол.%	фаза	анализ фазы, вес. %					формульные коэффициенты				
					CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Σ	Ca	Mg	Al	Si	Σ
A-140	10 ⁻³	1238±10	5	Cpx	24,92	18,59	2,27	55,22	101,00	0,949	0,985	0,095	1,962	3,991
A-103	-/-	1208±10	10	Cpx	23,55	18,04	5,39	52,17	99,15	0,912	0,972	0,230	1,886	3,999
A-109	-/-	1137±10	5	Cpx	24,67	18,14	2,83	54,17	99,81	0,951	0,973	0,120	1,948	3,992
A-112	-/-	1114±10	5	Cpx	23,60	18,36	3,80	53,72	99,48	0,910	0,985	0,161	1,932	3,987
A-114	-/-	-/-	10	Cpx	23,11	16,68	6,82	52,88	99,49	0,887	0,891	0,288	1,895	3,961
A-117	-/-	-/-	50	Cpx	23,39	16,77	7,14	51,84	99,14	0,904	0,902	0,304	1,870	3,979
A-115	-/-	-/-	70	Cpx	22,49	15,69	6,82	54,62	99,62	0,857	0,832	0,286	1,942	3,916
A-126	-/-	1013±10	5	Cpx	23,65	18,11	4,02	53,63	99,41	0,912	0,972	0,171	1,930	3,984
A-127	-/-	-/-	10	Cpx	22,25	18,36	7,86	51,52	99,99	0,851	0,977	0,331	1,838	3,996
A-133	-/-	966,6±10	5	Cpx	23,25	18,42	4,48	54,79	100,94	0,880	0,970	0,187	1,935	3,972
A-136	-/-	-/-	10	Cpx	22,79	17,53	8,07	52,41	100,80	0,864	0,924	0,336	1,854	3,978
P-487	1,0	1363±10	30	Di	25,45	19,09	0,00	55,47	100,01	0,982	1,025	0,000	1,997	4,003
				L	39,56	12,57	8,69	39,73	100,55					
P-488	-/-	-/-	70	Di	25,42	19,02	0,00	56,16	100,60	0,973	1,013	0,000	2,007	3,993
				An	19,11	0,85	30,72	49,23	99,91	0,939	0,058	1,660	2,257	4,913
				L	20,09	3,32	16,97	59,41	99,79					

P-562	-/-	1293±10	30	Di	25,49	18,81	0,00	56,09	100,39	0,978	1,004	0,000	2,009	3,991
				Cpx	24,16	17,63	4,57	54,02	100,38	0,923	0,937	0,192	1,926	3,978
				L	18,12	4,56	16,73	60,22	99,63					
P-558	-/-	1275±10	30	Di	25,51	18,87	0,00	56,16	100,54	0,977	1,006	0,000	2,008	3,992
				Cpx	24,90	16,80	5,56	53,60	100,86	0,949	0,890	0,233	1,906	3,978
				L	18,34	3,02	17,19	60,63	99,18					
P-478	-/-	1227±10	30	Di	25,16	19,45	0,00	55,69	100,30	0,967	1,040	0,000	1,997	4,003
P-521	1,2	1208±10	30	Di	25,80	18,79	0,00	57,04	101,63	0,977	0,990	0,000	2,016	3,984
				Cpx	24,89	17,40	2,53	56,80	101,62	0,938	0,912	0,105	1,997	3,951
				An	18,89	0,13	34,82	46,64	100,81	0,924	0,009	1,873	2,129	4,935
P-524	1,3	-/-	30	Di	25,00	18,52	0,17	55,64	99,33	0,968	0,998	0,007	2,011	3,985
				Cpx	24,51	17,23	3,00	54,34	99,08	0,950	0,929	0,128	1,965	3,971
				An	19,09	0,00	35,84	43,90	98,83	0,954	0,000	1,969	2,047	4,969
P-499	1,5	1222±10	30	Cpx	22,77	19,77	2,57	54,90	100,01	0,870	1,051	0,108	1,958	3,988
				L	12,51	2,02	18,95	56,61	100,01					
P-475	2,0	1470±10	50	Cpx	24,92	17,59	4,08	53,66	100,25	0,957	0,940	0,172	1,923	3,991
				L	20,14	6,79	14,02	58,70	99,49					
P-462	-/-	1417±10	20	Di	24,36	19,97	0,00	55,84	100,17	0,935	1,066	0,000	2,000	4,000
				Cpx	24,53	15,41	7,61	51,75	99,30	0,949	0,829	0,324	1,868	3,970
				L	21,09	3,66	14,93	59,52	99,20					
P-464	-/-	-/-	50	Cpx	24,18	17,06	6,35	52,88	100,47	0,924	0,907	0,267	1,885	3,982
				L	18,61	5,82	15,72	59,41	99,56					
P-466	-/-	1300±10	50	Di	24,98	19,44	0,00	55,64	100,06	0,962	1,041	0,000	1,999	4,001
				Cpx	24,32	17,21	5,25	52,82	99,60	0,938	0,924	0,223	1,902	3,987
				L	19,17	7,01	15,15	58,30	99,63					
P-450	3,0	1547±10	50	Cpx	24,19	16,35	6,52	52,97	100,03	0,927	0,872	0,275	1,895	3,968
				L	19,46	7,53	14,47	58,04	99,50					
P-42	-/-	1525±10	20	Di	25,65	18,81	0,00	55,36	99,82	0,992	1,012	0,000	1,998	4,002
				Cpx	24,91	17,46	3,04	54,43	99,84	0,959	0,935	0,129	1,956	3,980
				L	20,83	2,90	13,25	61,63	98,61					
P-454	-/-	1518±10	10	Di	24,96	19,47	0,00	55,88	100,31	0,958	1,040	0,000	2,001	3,999
				L	22,14	5,77	11,36	59,77	99,04					
P-457	-/-	1441±10	10	Di	25,02	18,62	0,15	54,58	98,37	0,981	1,016	0,007	1,997	4,000
				Cpx	25,07	17,43	2,57	54,34	99,41	0,971	0,939	0,109	1,963	3,982
				L	22,44	4,61	9,43	60,93	97,41					
P-458	-/-	-/-	50	Cpx	23,77	15,95	7,29	51,41	98,42	0,926	0,865	0,313	1,870	3,974
				L	18,28	5,66	16,11	59,18	99,23					
P-48	-/-	1425±10	20	Di	25,71	18,86	0,01	56,18	100,76	0,984	1,004	0,000	2,006	3,994
				Cpx	24,84	14,01	8,58	51,47	98,90	0,964	0,757	0,366	1,865	3,952
				L	23,07	1,97	13,74	59,39	98,17					
P-56	-/-	1371±10	20	Di	25,06	19,57	0,00	56,16	100,79	0,957	1,040	0,000	2,002	3,998
				Grt	34,73	2,17	22,79	40,22	99,91	2,771	0,241	2,000	2,995	8,006
P-442	-/-	1317±10	30	Cpx	25,70	16,52	3,57	53,42	99,21	0,999	0,894	0,153	1,939	3,985
P-441	-/-	-/-	50	Cpx	23,84	14,49	9,56	51,05	98,94	0,922	0,780	0,407	1,844	3,953
P-445	-/-	1219±10	30	Di	25,24	18,74	0,00	54,68	98,66	0,987	1,020	0,000	1,996	4,004
				Cpx	25,52	15,51	6,73	50,87	98,63	1,000	0,845	0,290	1,860	3,995
P-444	-/-	-/-	50	Cpx	24,98	14,89	8,33	50,30	98,50	0,978	0,811	0,359	1,837	3,984
				Grt	32,78	3,50	22,48	39,58	98,34	2,647	0,393	1,997	2,983	8,019

Кристаллизующиеся в исследованном (р, Т) диапазоне клинопироксены Cpx(ss), за редким исключением, содержат избыточное количество SiO₂, и их составы могут быть выражены совокупностью четырех миналов - диопсид Di (CaMgSi₂O₆), энстатит En (MgSiO₃), кальциевая молекула Чермака CaTs (CaAl₂SiO₆), кальциевая молекула Эскола CaEs

($\text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$) (Рисунок 2). Прослеживается положительная корреляция содержания Al в клинопироксене от мольной доли CaTs и CaEs компонентов (Рисунок 3).

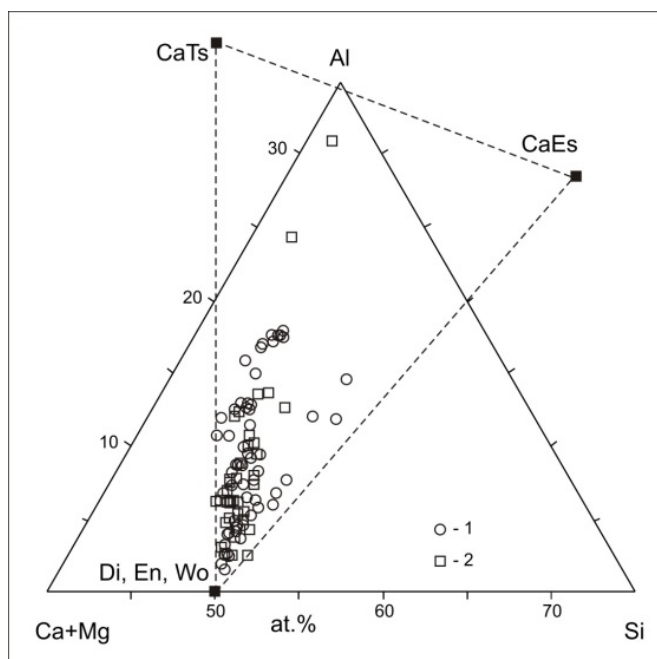


Рисунок 2 - Составы клинопироксенов в композиционном треугольнике (Ca+Mg) - Al - Si. 1 - наши данные, 2 - данные из работ [Сурков и др., 2004; Сурков и др., 2007; Сурков и др., 2018; Банушкина и др., 2019]. Пунктирными линиями соединены точки, соответствующие диопсиду Di (энстатиту En, волластониту Wo), кальциевым молекулам Чермака (CaTs) и Эскола (CaEs).

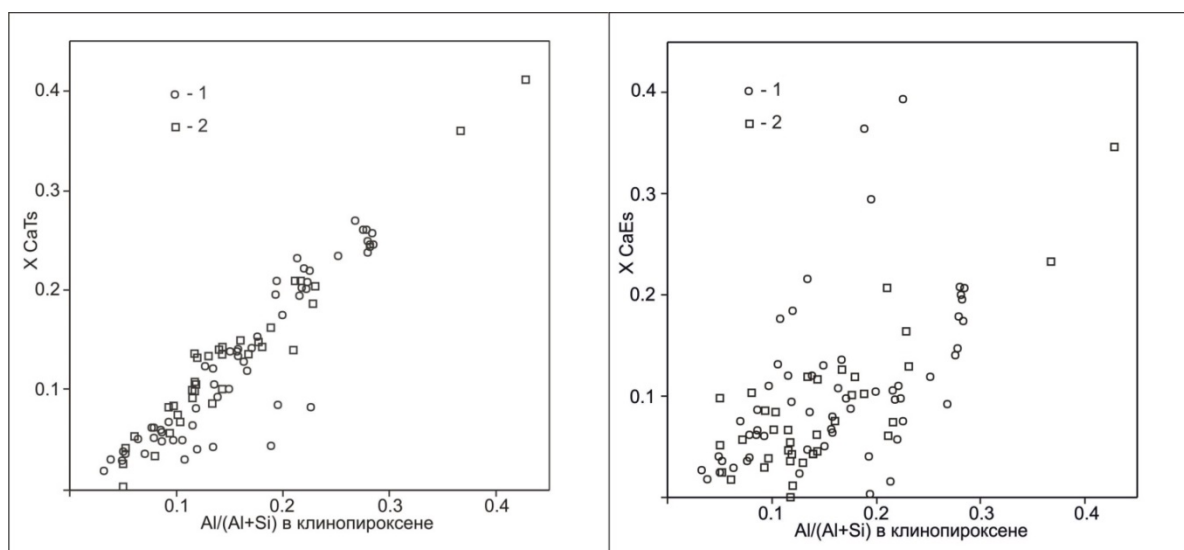


Рисунок 3 - Соотношение величины $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Si})$ в Cpx и мольной доли CaTs и CaEs компонента. Условные обозначения – см. выше (Рисунок 2)

Глава 4. АНАЛИЗ ТОПОЛОГИИ МОНОВАРИАНТНЫХ РЕАКЦИЙ В СЕЧЕНИИ ДИОПСИД – КАЛЬЦИЕВАЯ МОЛЕКУЛА ЭСКОЛА ПРИ ДАВЛЕНИЯХ ДО 3,0 ГПа

По результатам экспериментального исследования сечения Di-CaEs построены фазовые (Т-х)-диаграммы, выделена последовательность фазовых объемов, существующих в солидусе, и эвтектические реакции, по которым происходит плавление для каждого значения давления.

При давлении 10^{-3} ГПа плавление происходит по реакции $\text{Cpx}+\text{Di}+\text{An}+\text{Tr}=\text{L}$ при температуре ~ 1137 °С; при 1,0 ГПа - $\text{Cpx}+\text{Di}+\text{An}+\text{Qtz}=\text{L}$ при температуре выше 1200 °С; при 2,0 ГПа - $\text{Cpx}+\text{Di}+\text{An}+\text{Qtz}=\text{L}$ при температуре ~ 1230 °С; при 3,0 ГПа в диопсидовой части сечения - по эвтектической реакции $\text{Cpx}+\text{Di}+\text{Grt}+\text{Qtz}=\text{L}$ при температуре ~ 1250 °С, в кальций-эсколаитовой части - по реакции $\text{Cpx}+\text{Grt}+\text{Ky}+\text{Qtz}=\text{L}$ при температуре ~ 1350 °С. Таким образом, полученные эвтектические реакции формируют единый тренд, характеризующий кварцнормативную область составов в CMAS-системе (Рисунок 4).

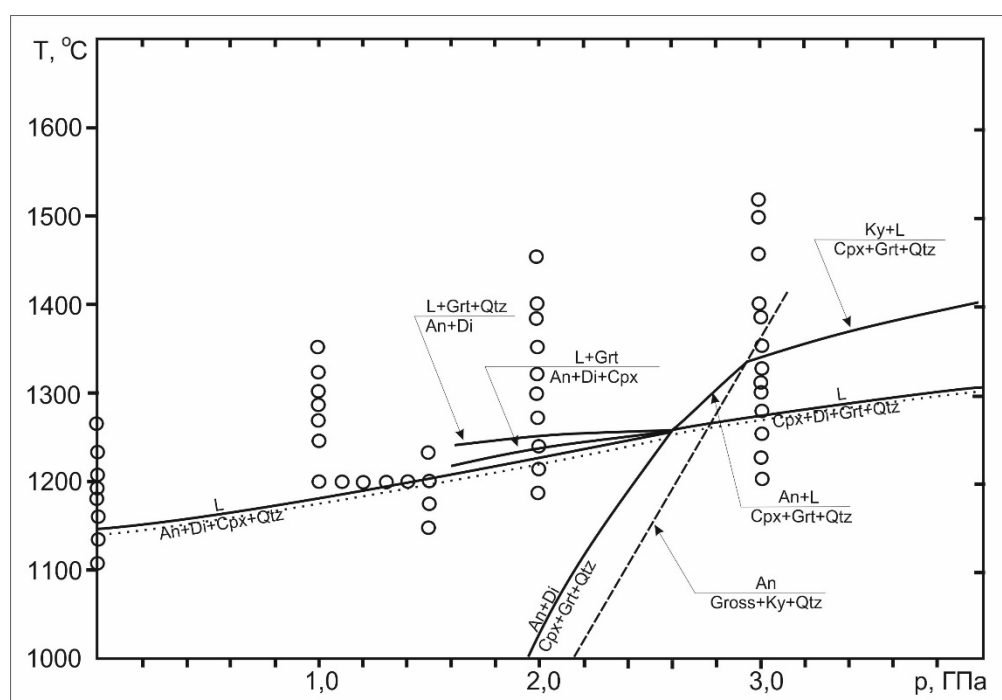


Рисунок 4 - Топология моновариантных реакций в кварцнормативной области CMAS-системы, по результатам исследования сечения Di-CaEs. Белые кружки - условия проведенных экспериментов. Точечная кривая - эвтектические моновариантные равновесия. Сплошная линия - лучи моновариантных равновесий в CMAS-системе, пунктирная - в CAS-системе по данным [Сурков, Дорошев, 1998].

Сформированный тренд имеет положительный наклон dt/dp при движении вдоль барической оси. Линия тренда по давлению выше 3,0 ГПа проведена на основе экстраполяции полученных данных. Температурный диапазон, в котором существует данный тренд, составляет $1137...1317 \pm 10$ °С.

Определяющим моментом строения кварцнормативной части CMAS-системы является точка невариантного равновесия (Di, Cpx, An, Qtz, L, Grt), расположенная при 2,6 ГПа и $T=1250$ °С. Из точки в сторону высоких давлений выходят лучи моновариантных реакций $\text{An}+\text{L}=\text{Cpx}+\text{Grt}+\text{Qtz}$ и $\text{L}=\text{Cpx}+\text{Di}+\text{Grt}+\text{Qtz}$. В сторону низких давлений направлены лучи

реакций $An+Di=Cpx+Grt+Qtz$, $L=Cpx+Di+An+Qtz$, $L+Grt=An+Di+Cpx$ и $L+Grt+Qtz=An+Di$. Реакции $An+L=Cpx+Grt+Qtz$ и $An+Di=Cpx+Grt+Qtz$ являются границей по давлению полей устойчивости граната и анортита в кварцнормативной области CMAS-системы, при этом последняя реакция имеет фундаментальное значение для петрологии как граница, отделяющая глубинные фации с гроссуляровым гранатом от фаций более низкого давления. В данном поле стабильна коннода гранат-диопсидовый клинопироксен, что свидетельствует об устойчивости ряда $Cpx-Grt$ -ассоциаций, соответствующих парагенезисам серии эклогитоподобных пород.

Смена ассоциаций глиноземистых клинопироксенов с гранатом ($Grt+Cpx$) на ассоциации с анортитом ($An+Cpx$) при понижении давления хорошо согласуется с известными ранее данными [Малиновская и др., 1991; Surkov, 1996; Milholland, Presnall, 1998] и соответствует переходу от ультраосновных пород к основным.

Глава 5. ПЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ СТРОЕНИЯ КВАРЦНОРМАТИВНОЙ ОБЛАСТИ CMAS-СИСТЕМЫ

В результате тщательного исследования сечения $Di-CaEs$ было получено, что вместо предполагаемого твердого раствора клинопироксенов ряда $Di-CaEs$, образуются две независимые стабильные пироксеновые фазы (Рисунок 5). Составы твердых растворов глиноземистых клинопироксенов $Cpx(ss)$ представлены серией $Di-CaTs-CaEs-En$, данный тетраэдр занимает центральную позицию в CMAS-системе. Вторая пироксеновая высокомагнезиальная фаза представлена твердым раствором $Di-En$.

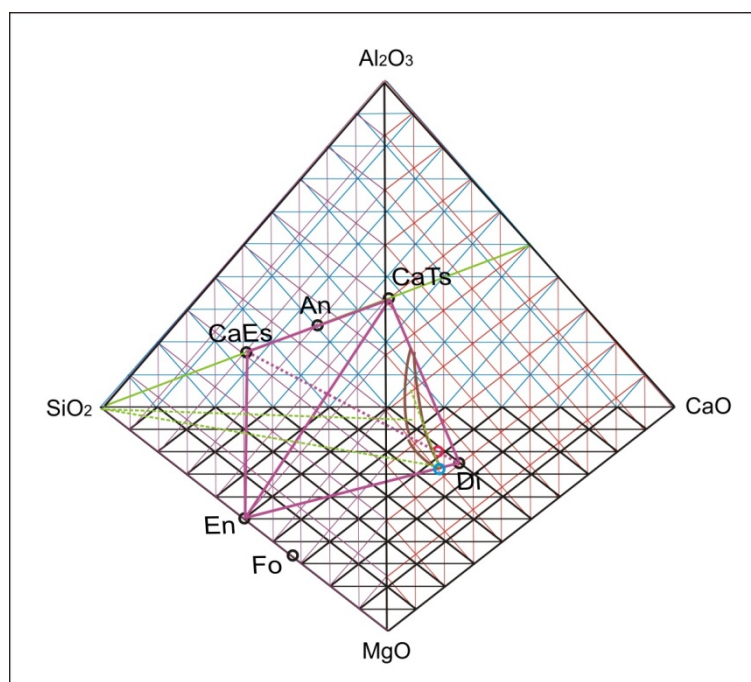


Рисунок 5 - Составы клинопироксенов в CMAS-системе. Сечение $Di-CaEs$ - сиреневая пунктирная линия; красная точка - условное обозначение исходного состава. Твердые растворы глиноземистых клинопироксенов $Cpx(ss)$ - сиреневый тетраэдр. Состав диопсида Di лежит на линии $Di-En$ (схематически обозначен синей точкой).

Выделение ассоциаций вида ($Di+Cpx$), как возможных парагенезисов в нижних частях земной коры и верхней мантии, во-первых, важно для их последующей диагностики среди горных пород и глубинных ксенолитов; во-вторых, стабилизация диопсида Di к субсолидусным ассоциациям вида ($Cpx+An+Qtz$) и ($Cpx+Grt+Qtz$) приводит к понижению температуры плавления составов. Согласно работам [Сурков, 1995; Сурков, Зинчук, 2001; Сурков, Гартвич, 2012; Сурков, Гартвич, 2012а] для форстеритнормативной области CMAS-системы, в частности при 2,5 ГПа, плавление составов происходит при ~ 1550 °С; для корунднормативной области - при ~ 1400 °С. Полученные в данном исследовании температурные значения для кварцнормативной области на ~ 200 °С ниже, что может способствовать реализации химического механизма накопления больших объемов алюмосиликатного расплава.

Автором в диссертационной работе упомянуты основные модели генезиса гранитоподобных пород. В настоящем исследовании автор не преследовал цели объяснить происхождение гранитов на примере выбранной синтетической CMAS-системы. Разумеется, реальная магматическая система имеет свои характеристические особенности; тем не менее, если существует возможность определить некоторые переменные в естественной системе независимо, то экспериментальная составляющая может предоставить информацию о других переменных, а разрабатываемые физико-химические модели могут служить базисом, на который, при переходе к более сложным объектам, накладываются конкретные ограничения.

Полученные экспериментальные данные позволили выявить тренды эвтектической кристаллизации, которые реализуются в CMAS-системе, что в свою очередь, представляет собой один из возможных путей эволюции магматического расплава. По результатам исследования сечения $Di-CaEs$, приведенная в (p, T)-координатах схема (Рисунок 6) дополнена кварцнормативным трендом, который в совокупности с лерцолитовым и щелочноземельным трендами, выделенными на основе исследования форстерит- и корунднормативных областей CMAS-системы [Сурков, 1995; Surkov, 1996; Сурков и др., 2004; Сурков и др., 2007; Сурков, Гартвич, 2012; Сурков, Гартвич, 2012а], контролирует плавление системы.

Первичный ультраосновной магматический расплав, предполагается, имеет перидотитовый состав - Fo, Орх, Срх, Grt (формирование такого расплава происходит при ~ 20 ГПа). Фундаментальная эвтектика вида $L=Fo+Cpx+Orx+Grt$ контролирует его состав до глубин ~ 100 км (3-3,5 ГПа); затем плавление носит более сложный характер. Фазовые ассоциации в данном поле составов соответствуют парагенезисам гранатовых лерцолитов и дунитов.

При давлении $\sim 2,5-2,6$ ГПа и $T=1500$ °С существует неинвариантное равновесие (L, Срх, Орх, Grt, Fo). Состав жидкости в данной точке находится в плоскости En-Woll-Cor, что полностью подтверждает выводы о смещении состава расплава [Herzberg, 1983; Herzberg,

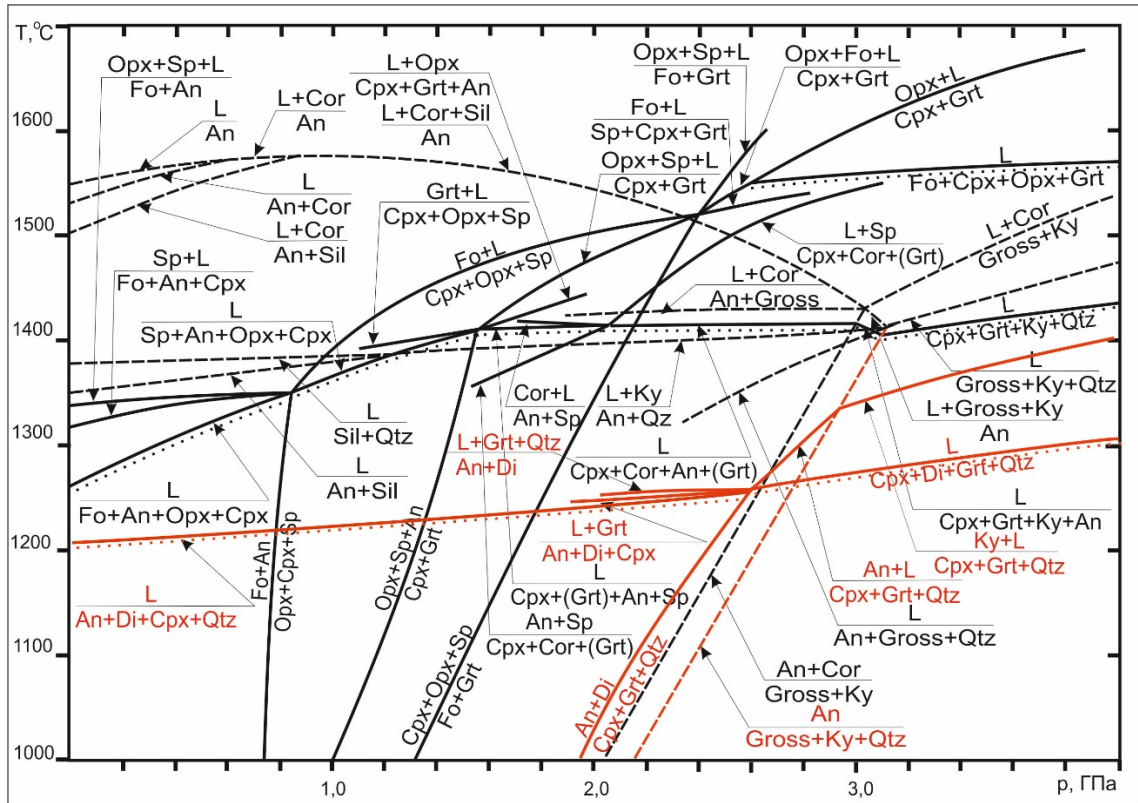


Рисунок 6 - Тренды эвтектической кристаллизации на фазовой диаграмме системы CMAS. Красный цвет - результаты исследования сечения Di-CaEs. Точечная кривая - эвтектические моновариантные равновесия. Сплошная линия - лучи моновариантных равновесий в CMAS-системе, пунктирная - в CAS-системе [Сурков, Дорошев, 1998; Surkov, Darmenko, 2002]

О'Нара, 1985; Kato, Kumazawa, 1985; Herzberg et al., 1990]. Согласно [Сурков, Зинчук, 2001] при давлениях 2,0-2,6 ГПа состав расплава соответствует гранатовым пироксенитам и биминеральным эклогитам, что связано с обогащением остаточного расплава Ca и SiO₂ в процессе осаждения магнезиальных фаз - оливина Ol, шпинели Sp, ортопироксена Орх - в магматическом очаге.

В диапазоне 0,8-2,6 ГПа существуют три невариантных равновесия - (L, Fo, Sp, Cpx, Grt, Орх), расположенное при p=2,3-2,4 ГПа, T=1500-1510 °C; (L, An, Sp, Cpx, Орх, Grt) - при p=1,5-1,6 ГПа, T=1400-1410 °C; (L, An, Fo, Sp, Cpx, Орх) - p=0,8-0,9 ГПа, T=1330-1350 °C. Диапазон давлений 1,6-2,6 ГПа характеризуется перитектическим типом плавления, а ниже 1,5-1,6 ГПа - эвтектическим типом плавления. В интервале давлений 0,8-1,5 ГПа состав расплава контролируется эвтектической реакцией $L=Sp+An+Opx+Cpx$, ниже 0,8 ГПа - реакцией $L=Fo+An+Opx+Cpx$.

Выше по давлению от реакции $Opx+Sp+An=Cpx+Grt$ устойчивы эклогитоподобные породы, гранатовые пироксениты; данной реакции отводится роль границы перехода гранат-содержащих в плагиоклаз-содержащие парагенезисы. Для составов с нормальным форстеритом характерно появление гранат-содержащих парагенезисов выше луча реакции

$Cpx+Opx+Sp=Fo+Grt$. Между реакциями $Cpx+Opx+Sp=Fo+Grt$ и $Fo+An=Opx+Cpx+Sp$ устойчиво поле составов, аналогичное парагенезисам шпинельных лерцолитов и шпинель-плагиоклазовых-пироксенитов. Составы габброидов контролируются реакцией $Fo+An=Opx+Cpx+Sp$.

Достигнув плоскости En-Woll-Cor (~2,6 ГПа), состав расплава попадает в область кварцевых (коэситовых) эклогитов, т.е. становится кварцнормативным [Сурков, 2017], а дальнейший процесс кристаллизационной дифференциации (с осаждением магнезиальных фаз) ведет к обогащению остаточного расплава не только кремнеземом, но также кальциевым компонентом (то есть состав расплава смещается в сторону анортита). Интенсивное отделение кальциевого плагиоклаза – анортита (ниже 1,6 ГПа), в свою очередь, смещает состав остаточного расплава в сторону повышенного содержания кремнезема, который при высокой степени дифференциации оказывается в кварцнормативной области составов [Сурков, 2014].

Для кварцнормативной области CMAS-системы, как было упомянуто выше, ключевым моментом является невариантная точка (Di, Cpx, An, Qtz, L, Grt), расположенная при 2,6 ГПа и $T \sim 1250$ °C. Лучи $An+Di=Cpx+Grt+Qtz$ и $An+L=Cpx+Grt+Qtz$ ограничивают по давлению поле существования фазовой ассоциации, соответствующей парагенезису кварц-содержащих эклогитов. Причем, выше по давлению линии распада анортита, которая имеет вид $An=Grt(Gross)+Ky+Qtz$, находится поле формирования кианит-содержащих эклогитов и гроспидитов, которые попадают в высокоглиноземистую область системы и контролируются моновариантной эвтектической реакцией вида $Ky+L=Cpx+Grt+Qtz$.

В процессе подъема магматического кварцнормативного расплава к поверхности, гранат-содержащие парагенезисы сменяются плагиоклаз-содержащими ($An+Di=Cpx+Grt+Qtz$). Состав расплава, в свою очередь, на данном отрезке регулируется эвтектическими реакциями вида $L=Cpx+Di+Grt+Qtz$ и $L=An+Di+Cpx+Qtz$. При этом по мере дальнейшей кристаллизации твердых растворов клинопироксенов $Cpx(ss)$, основного плагиоклаза, а также магнезиальной безглиноземистой фазы Di, состав расплава обедняется Al_2O_3 и MgO , в то же время, обогащаясь кальциевым компонентом и SiO_2 .

Ранее в работе [Соболев, 1979] было показано, что согласно экспериментальным исследованиям за счет оливин-содержащих пиролитов могут выплавляться достаточно кислые магмы, но лишь в присутствии высокого содержания воды. С другой стороны, магмы обладают высокой температурой, что установлено по расплавленным включениям, в связи с чем, можно сделать вывод о сухом характере расплавов. Поэтому предполагалось, что источником кислых магм являются кварцевые (коэситовые) эклогиты - безоливиновые породы, содержащие свободную кремнекислоту; при этом отмечалось, что такие эклогиты должны иметь низкие

температуры солидуса [Соболев, Соболев, 1977; Соболев, 1979], а их формирование связано с погружением обычных базальтов на глубину (в область высоких давлений и температур).

В настоящей работе, по результатам исследования сечения Di-CaEs, также получены низкие температуры солидуса (за счет сосуществования двух клинопироксенов) для ассоциации кварцевых эклогитов, что согласуется с предложенной гипотезой академика В.С. Соболева. Представленный кварцнормативный эвтектический тренд может рассматриваться в качестве варианта физико-химического механизма эволюции кварцнормативных составов к поверхности земли.

Глава 6. ВЯЗКОСТЬ ГОМОГЕННОГО РАСПЛАВА ДИОПСИДА И В СМЕСИ ЕГО С ОЛИВИНОМ ПРИ ВЫСОКОМ ДАВЛЕНИИ

Разработка геодинамических моделей перемещения расплавов в мантии и земной коре невозможна без данных по оценке вязкости таких расплавов. Особого внимания заслуживает экспериментальное изучение реологических свойств субликвидусных гетерогенных (жидкость+твердая фаза+газ) сред, к которым и относится основная магма, геолого-петрологические наблюдения и экспериментальные исследования которой свидетельствуют о ее низкой вязкости [Pinkerton, Stevenson, 1992; Reid et al., 2003; Персиков, Бухтияров, 2014]. Учитывая значительные расхождения в теоретических оценках вязкости гетерогенных сред, что обусловлено сложностью проведения расчетов, чрезвычайно важным является совершенствование экспериментальных методов для определения вязкости расплава [Банушкина, Чепуров, 2020]. В настоящем исследовании была проведена экспериментальная оценка вязкости модельного состава на основе диопсида, содержащего кристаллы минералов (оливина), при давлении 4,0 ГПа и температуре 1800 °С (Таблица 2).

Таблица 2 - Результаты экспериментов по определению относительной вязкости (η_r) расплава диопсида с зёрнами оливина при давлении 4,0 ГПа

№ опыта	сод. Ol, мас. %	r, см	r _a , см	h, см	t, с	l, см	V, см/с	K	η_r , Па·с
1	-	0,012	0,3	0,4	40	0,19	$>1,9 \cdot 10^{-2}$	0,92	$<2,5$
2	10	0,05	0,3	0,4	60	0,16	$>5,3 \cdot 10^{-3}$	0,65	$<8,9 \cdot 10^1$
3	20	0,05	0,3	0,4	60	0,13	$4,2 \cdot 10^{-3}$	0,65	$1,1 \cdot 10^2$
4	30	0,05	0,3	0,4	60	0,10	$3,3 \cdot 10^{-3}$	0,66	$1,4 \cdot 10^2$
5	50	0,04	0,3	0,4	60	-	$<3,3 \cdot 10^{-4}$	0,79	$>1,2 \cdot 10^3$

Примечание. Сод. Ol - содержание оливина (Ol) в мас.%; r - радиус Pt шарика; r_a - радиус ампулы; h - высота ампулы; t - время выдержки; l - длина перемещения шарика; V - скорость перемещения шарика; K - поправка на пристеночный эффект в ампуле.

При введении в состав 50 мас. % зерен оливина не удалось обнаружить перемещения Pt шарика при параметрах опытов длительностью до 1 ч, что свидетельствует о высокой относительной вязкости расплавов, по нашим оценкам значительно превышающей $1,2 \cdot 10^3$ Па·с (см. Таблица 2). С другой стороны, при содержании 10 мас. % зерен оливина и менее, перемещение Pt шарика ко дну ампулы происходило в течение <10 с. При содержании 20 и 30 мас. % зерен оливина удалось получить более корректные величины вязкости исследованных систем (см. Таблица 2). Установлено ожидаемое снижение скорости перемещения Pt шариков и, соответственно, увеличение относительной вязкости таких гетерогенных сред, в отличие от расплавов, не содержащих твердых фаз.

По нашим данным, вязкость расплава диопсида при 4,0 ГПа и 1800 °С составляет менее 2 Па·с. Интерес представляет то, что при содержании ксенокристаллов оливина в расплаве до 10 мас. % значения вязкости остаются низкими. С увеличением содержания ксенокристаллов вязкость прогрессивно растет: при 20-30 мас. % на 1-2 порядка, при 50 мас. % - на 3 порядка и более (см. Таблица 2).

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать важный вывод: высокое содержание кристаллов в расплаве указывает на невозможность сверхскоростного течения жидкости по узким трещинам, что объясняется уменьшением пропускной способности в трещине, вследствие присутствия кристаллов, и увеличением внутреннего трения при взаимодействии расплава и кристаллов [Банушкина, Чепуров, 2020]. Отсюда следует, что в магме количество твердой фазы должно быть достаточно низким (< 20 -30 мас. %), в противном случае перемещение расплава было бы возможно исключительно при взрывных процессах. Отношение между твердыми фазами, жидкостью и газом может создавать эффузивный или взрывной тип извержений [Moss et al., 2009].

Измеренные в работе значения относительной вязкости расплава диопсида с твердыми фазами являются оценочным, несмотря на то, что воспроизводимость результатов была достаточно высокая. Однако даже приближенные оценки имеют большое значение при изучении процессов, происходящих в мантии и земной коре. Маловероятно существование в природных обстановках абсолютно гомогенных основных магм без твердых фаз. С изменением содержания, размера или формы твердых фаз в расплаве, величины относительной вязкости, определенные в экспериментах, могут варьировать от чрезвычайно малых до высоких значений. К тому же, проведенные нами исследования выполнены без учета появления фенокристаллов, кристаллизующихся непосредственно в расплаве, что, несомненно, также является одним из дополнительных факторов, влияющим на изменение вязкости реальных расплавов в природе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. **Детально исследовано** сечение диопсид ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) - кальциевая молекула Эскола ($\text{Ca}_{0,5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$), принадлежащее кварц(Qtz)-нормативной области модельной системы $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (CMAS). **Проведены** эксперименты с составами в широком диапазоне давлений и температур: $p = 10^{-3}\text{-}3,0$ ГПа; $T = 966\text{...}1547\pm 10$ °С. **Обнаружены** фазы: Cpx(ss) - твердые растворы глиноземсодержащего клинопироксена; безглиноземистый Di; кальциевый плагиоклаз - анортит An (поле устойчивости находится в области давлений $10^{-3}\text{-}2,0$ ГПа); твердые растворы граната Grt(ss), характерные для области высоких давлений (2,6-3,0 ГПа); кварц Qtz; тридимит Tr (в экспериментах при атмосферном давлении согласно своему полю стабильности); расплав L.

2. **Уточнены** составы сосуществующих фаз. Составы Cpx(ss) представлены серией Di-En-CaTs-CaEs. **Отмечено**, что составы Cpx(ss) меняются не только от (p, T)-параметров, но и зависят от ассоциации сосуществующих с ними фаз. Состав Di находится в сечении Di-En (содержание энстатитового минала составляет ~5 мол. %), характеризуется отсутствием глинозема Al_2O_3 и преобладанием магниального компонента над кальциевым. Состав Grt(ss) принадлежит пироп-гроссуляровому ряду (количество пиропового компонента достигает 3-6 мол. %). Составы An, Qtz и Tr соответствуют стехиометрии. Состав расплава L в сечении Di-CaEs обогащен кальциевым компонентом и кремнеземом SiO_2 .

3. **Показаны** идентичность и однородность состава по всей площади шлифа, не зависимо от морфологической формы выделений фаз в солидусе. В рамках данной работы **дополнительно** был **проведен** отжиг диопсидового стекла с идеальной стехиометрией, чтобы разрешить вопрос возникновения специфических структур в образцах; **продемонстрировано**, что солидусные фазы в сечении Di-CaEs представляют собой остаточные структуры, являются следствием девитрификации стекла и характеризуют смену условий кристаллизации в области солидуса.

4. В кварцнормативной области CMAS-системы **выделены** следующие эвтектические моновариантные реакции: $L=\text{Cpx}+\text{Di}+\text{An}+\text{Tr}$ для опытов при атмосферном давлении (10^{-3} ГПа), $T_{\text{пл}} \sim 1137$ °С; $L=\text{Cpx}+\text{Di}+\text{An}+\text{Qtz}$ в интервале давлений от 1,0 ГПа до ~2,6 ГПа, $T_{\text{пл}}$ находится в диапазоне 1208...1250 °С; $L=\text{Cpx}+\text{Di}+\text{Grt}+\text{Qtz}$ при давлениях выше 2,6 ГПа, $T_{\text{пл}} \sim 1300$ °С и выше. Подобное понижение температур плавления (на ~ 200 °С), в сравнении с эвтектическими реакциями, которые реализуются в форстерит- и корунднормативных областях CMAS-системы, **предполагается**, вызвано стабилизацией фазы Di к субсолидусным ассоциациям вида $(\text{Cpx}+\text{An}+\text{Qtz})$ и $(\text{Cpx}+\text{Grt}+\text{Qtz})$.

5. **Построены** фазовые (T-x)-диаграммы сечения Di-CaEs. **Построена** диаграмма моновариантных эвтектических реакций в (p, T)-координатах. Изобарические проекции сечения

Di-CaEs формируют эвтектический тренд, который существует в температурном диапазоне 1137...1317±10 °С, характеризует кварцнормативную область составов и смену полей устойчивости ассоциаций фаз (и, соответственно, минеральных парагенезисов). В частности, смена (Grt+Cpx) на (An+Cpx) соответствует переходу пород ультраосновного состава к породам основного состава с понижением давления. Линия тренда имеет положительный наклон dt/dp . Сформированный **кварцнормативный** тренд, в совокупности с выделенными ранее Н.В. Сурковым **лерцолитовым** и **щелочноземельным** трендами, контролирует плавление составов в CMAS-системе; **предложен** вариант фазовой (p, T)-диаграммы.

6. **Выделенный** кварцнормативный эвтектический тренд в рамках фундаментальной петрологии имеет немаловажное значение, поскольку **моделирует возможную** эволюцию кварцнормативных составов CMAS-системы, соответствующих Qtz- и Ку-эклогитам и гроспидитам, к поверхности земли и вполне **согласуется** с гипотезой академика В.С. Соболева о происхождении кислых магм. Полученные фазовые взаимоотношения могут быть основой для изучения влияния щелочей, железистого компонента, и т.д. на устойчивость Qtz-нормативных минеральных ассоциаций. Установленные фазовые объемы, включающие ассоциацию вида (Di+Cpx), важны для их последующей диагностики среди горных пород и глубинных ксенолитов. Использование выделенных закономерностей в дополненной щелочными компонентами CMAS-системе позволит глубже рассмотреть явления, сопутствующие образованию кварцнормативных пород, и аргументировано трактовать их генезис. Более того, обнаруженное в экспериментах понижение температур плавления может способствовать реализации механизма накопления больших объемов алюмосиликатного расплава, что в дальнейшем позволит с физико-химической точки зрения аргументировать генезис крупных интрузивов на поверхности земли.

7. **Экспериментально продемонстрировано**, что расплав диоксида 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. **Получено**, что вязкость чистого расплава составляет менее 2,5 Па·с; при содержании в расплаве до 10 мас. % твердой фазы вязкость существенно не меняется ($< 8,9 \cdot 10^1$ Па·с), а с добавлением твердой фазы - прогрессивно увеличивается: при содержании 30 мас. % твердой фазы в своем составе расплав имеет вязкость порядка 100 Па·с; при 50 мас. % - значения, превышающие (экспериментально не фиксируется) 1000 Па·с, что, несомненно, будет препятствовать высокоскоростному продвижению расплава к поверхности Земли. Можно ожидать, что магмы с высоким содержанием твердой фазы (более 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.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Банушкина, С.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" / С.В. Банушкина, Ю.Г. Гартвич, З.Ф. Голицына, Н.В. Сурков // Международный научно-исследовательский журнал. – 2017. - №11(65). - Ч. 3. - С. 173-180.
2. Банушкина, С.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 / С.В. Банушкина, Ю.Г. Гартвич, З.Ф. Голицына, Н.В. Сурков // Международный научно-исследовательский журнал. - 2017а. - №12(66). - Ч. 2. - С. 152-161.
3. Golitsyna, Z.F. Comparison of the composition of crystalline aluminosilicate rocks and their minerals in a planar triangular projection / Z.F. Golitsyna, S.V. Banushkina, N.V. Surkov // Russian Geology and Geophysics. - 2018. - Vol. 59. - No. 3. - P. 257-267.
4. Сурков, Н.В. 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 / Н.В. Сурков, С.В. Банушкина, Ю.Г. Гартвич // Вестник ЗабГУ. - 2018. - Т. 24. - №7. - С. 51-59.
5. Банушкина, С.В. Особенности плавления фаз в сечении диопсид – кальциевая молекула Эскола в интервале давлений $1 \text{ кгс/см}^2 - 20 \text{ кбар}$ / С.В. Банушкина, Н.В. Сурков, З.Ф. Голицына // Вестник ЗабГУ. – 2019. – Т. 25. - №7. – С. 6-17. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-7-6-17.
6. Банушкина, С.В. Экспериментальное изучение вязкости расплава диопсида при высоком давлении / С.В. Банушкина, А.И. Чепуров // Известия АлтГУ. Физика. - 2020. - № 4 (114). - С. 17-20. DOI 10.14258/izvasu(2020)4-02.
7. Банушкина, С.В. 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 / С.В. Банушкина, А.И. Туркин, А.И. Чепуров // Известия Иркутского государственного университета. Серия "Науки о Земле". - 2020. - Т. 34. - С. 37-54. DOI 10.26516/2073-3402.2020.34.37.