

*На правах рукописи*

Крук Алексей Николаевич

**УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ КИМБЕРЛИТОПОДОБНЫХ МАГМ  
ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ КАРБОНАТНЫХ РАСПЛАВОВ С  
ЛИТОСФЕРНЫМИ ПЕРИДОТИТАМИ: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ  
ИССЛЕДОВАНИЕ**

Специальность 25.00.05 – минералогия, кристаллография

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата геолого-минералогических наук

НОВОСИБИРСК - 2016

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

**Научный руководитель:**

**Сокол Александр Григорьевич**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник ИГМ СО РАН

**Официальные оппоненты:**

**Персиков Эдуард Сергеевич**, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экспериментальной минералогии Российской академии наук, г. Черноголовка.

**Гаранин Виктор Константинович**, доктор геолого-минералогических наук, научный руководитель Минералогического музея им. А.Е. Ферсмана РАН.

**Ведущая организация**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН

Защита состоится 17 января 2016 г. В 13-00 на заседании диссертационного совета Д 003. 067. 02, созданного на базе ИГМ СО РАН, в конференц-зале.

Адрес 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга 3.

Факс: (383) 333-27-92; e-mail: [gaskova@igm.nsc.ru](mailto:gaskova@igm.nsc.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГМ СО РАН и на сайте <http://www.igm.nsc.ru> в разделе «образование». Автореферат разослан

« 1 » декабря 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.г.-м.н. Гаськова О.Л.



## **Введение**

### **Актуальность исследования**

Кимберлиты привлекают к себе пристальное внимание, поскольку они образованы наиболее глубинными мантийными магмами, которые транспортировали алмазы на земную поверхность. Зарождение кимберлитовых магм связывают либо с плавлением карбонатизированного лерцолита [Dawson, 1980; Mitchell, 1986, 1995; Dalton and Presnall, 1998; Becker and Le Roex, 2006; Kamenetsky, 2009; 2011], либо с взаимодействием глубинных летучих с породами литосферной мантии [Соболев В.С., 1973; Соболев Н.В., 1974. Wyllie, 1980, 1989, 1994, 1995; Green et al., 1987; Когарко 2008; Похиленко и др., 2015]. Современные представления о температурном и флюидном режиме этого процесса достаточно противоречивы. Слабо изученной также остается ранняя метасоматическая стадия проработки потенциальных протолитов кимберлитов с участием карбонатных расплавов и водных флюидов [Foley, 1992; Mitchell, 1995; Brey et al., 2009]. Методы экспериментальной минералогии и петрологии эффективно используются для решения широкого круга задач как непосредственно связанных с генезисом кимберлитов [Eggler and Wendlandt, 1979; Edgar et al., 1988; Ringwood et al., 1992; Edgar and Charbonneau, 1993; Brey et al., 2008; 2009; Foley 2009; Girniss et al., 1995; 2011; Гирнис и др., 2005; Ulmer, Sweeney, 2002; Litasov et al., 2013; Sokol et al., 2013; 2014; Шацкий и др. 2015; Сокол и Крук, 2015; Крук и др., 2016], так и с процессами метасоматоза, в которых участвуют карбонатные расплавы [Wallace and Green, 1988; Thibault, 1992; Kogarko et al., 1995; Sokol et al., 2016]. Однако, механизм и продукты реакционного взаимодействия карбонатных расплавов с мантийными перидотитами изучены недостаточно. Кроме того, влияние флюидного и температурного режима, а также минерального состава метасоматически измененного протолита на состав кимберлитоподобных магм, генерированных в условиях континентальной литосферной мантии, также требует дополнительного исследования.

Цель работы заключалась в экспериментальном моделировании минералообразующих процессов, осуществляющихся при взаимодействии щелочных карбонатных расплавов с мантийными перидотитами, а также в реконструкции температурного и флюидного режимов генерации

кимберлитоподобных расплавов в условиях основания континентальной литосферы (на примере кимберлита тр. Удачная).

### **Основные задачи**

Провести анализ предшествующих исследований, посвященных проблеме карбонатного метасоматоза пород литосферной мантии и генезиса кимберлитов. Экспериментально изучить закономерности взаимодействия карбонатных расплавов с перидотитами, выявить основные реакции и тренды изменения состава расплава, силикатных и карбонатных фаз.

Исследовать специфику фазовых отношений вблизи ликвидуса кимберлита тр. Удачная в зависимости от содержания  $H_2O$ , выявить состав равновесных с расплавом силикатных фаз и определить границы области мультифазного насыщения расплава. На основании полученных данных реконструировать возможные условия генерации кимберлитовой магмы. Сопоставить полученные экспериментальные данные с современными представлениями о процессах мантийного метасоматоза и генезисе кимберлитовых магм.

### **Фактический материал**

На многопуансонном аппарате типа «разрезная сфера» автором было выполнено более 30 экспериментов при мантийных P-T параметрах, получено 56 образцов, из которых изготовлено 40 аншлифов. Изучение фазовых отношений на сколах и аншлифах проведено методами оптической и электронной микроскопии (более 600 микрофотографий). Состав фаз изучен с помощью микронзондового анализа (более 1500 анализов). Исходный кимберлит исследован методами рентгенофазового и рентгенофлуоресцентного анализа, а также газовой хроматографии.

### **Защищаемые положения**

1. Взаимодействие карбонатных расплавов с гарцбургитом или лерцолитом при P-T параметрах основания литосферной мантии главным образом осуществляется посредством Mg-Ca обмена и приводит к образованию богатого щелочами и бедного  $SiO_2$  ( $\leq 7$  мас.%) карбонатного расплава, Ca# которого контролируется минеральным составом перидотита. При  $1200^\circ C$  реакция приводит к верлитизации и карбонатизации гарцбургита за счет расходования ортопироксена, кристаллизации клинопироксена и магнезита.

2. В результате взаимодействия между карбонатными расплавами и гарцбургитом при температуре 1200-1350°C кристаллизуются гранаты, вариации содержания CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в которых, воспроизводят основные закономерности эволюции состава гранатов из некоторых ксенолитов метасоматизированных перидотитов кимберлита трубки Удачная. Карбонатные расплавы, равновесные с перидотитами, близки по составу только к богатым магнием карбонатным включениям в алмазах.

3. При давлении 6.3 ГПа расплав кимберлита тр. Удачная вблизи ликвидуса равновесен с оливином, гранатом и клинопироксеном только при содержании воды от 6 до 8 мас.%, а при давлении 7.5 ГПа – более 9 мас.% H<sub>2</sub>O. Сопоставление имеющихся экспериментальных данных и результатов реконструкций состава первичных магм свидетельствует о том, что потенциальный гарцбургитовый протолит богатых кальцием кимберлитовых магм был существенно верлитизирован.

#### **Научная новизна**

Впервые экспериментально при P-T параметрах основания континентальной литосферы изучена специфика реакционного взаимодействия щелочных карбонатных расплавов с гарцбургитом и лерцолитом. В экспериментах длительностью 150 часов установлены особенности составов равновесных расплавов, силикатных фаз перидотита, а также определены границы стабильности магнезита. В гранате из реакционно измененного гарцбургита экспериментально воспроизведены основные закономерности эволюции состава гранатов из метасоматизированных перидотитов кимберлитовой трубки Удачная. Показано, что равновесные с перидотитом карбонатные расплавы по составу схожи только с высокомагнезиальной серией карбонатных включений в кристаллах алмаза с волокнистым строением. При этом большинство богатых кальцием и железом карбонатных включений в алмазах с перидотитом не равновесны. Впервые при мантийных давлениях и высоких концентрациях воды изучены фазовые отношения вблизи ликвидуса кимберлита трубки Удачная. Установлены зоны мультифазного насыщения и обосновано, что их границы зависят как от концентрации основных петрогенных компонентов, так и концентрации H<sub>2</sub>O в стартовом составе. Анализ полученных данных в целом позволил сделать вывод о важной роли как предварительной метасоматической переработки

протолитов, так и повышенных концентраций воды при генерации кимберлитовых магм I группы.

### **Практическая значимость работы**

Результаты диссертационного исследования могут послужить основой для построения петролого-геохимических моделей генерации алмазоносных кимберлитовых магм, которые будут полезны при разработке более совершенных критериев поиска алмазоносных кимберлитовых трубок.

### **Апробация работы**

Результаты работы представлены на международных и всероссийских конференциях The 3rd Deep Carbon Cycle International Workshop, 51-ой научной международной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», XVII Российском совещании по экспериментальной минералогии, Новосибирск, 2011, 2013, 2015, 10th International Kimberlite Conference, Bangalore (India) 2012, 1st European Mineralogical Conference. 2012, 30th International Conference on “Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism, Antalya 2014. Основные положения работы опубликованы в 8 статьях журналов из списка ВАК (Geochimica et Cosmochimica Acta, Lithos, American mineralogist, Геология и геофизика, Доклады академии наук).

### **Структура и объем работы**

Работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Диссертация изложена на 144 страницах и содержит 34 иллюстрации и 10 таблиц. Список литературы включает 141 наименование.

### **Благодарности**

Работа выполнена в лаборатории экспериментальной минералогии и кристаллогенезиса ИГМ СО РАН под руководством д.г.-м.н Сокола А.Г., которому автор выражает свою глубокую признательность. Автор благодарит зав. лаб., д.г.-м.н. Ю.Н. Пальянова, к.г.-м.н. Ю.М. Броздова, к.г.-м.н. Ю.В. Баталеву, д.г.-м.н. А.Ф. Хохрякова за помощь в выполнении работы, к.г.-м.н. Е.Н. Нигматулину, к.г.-м.н. В.Н. Королюка и М.В. Хлестова – за содействие в проведении аналитических работ. Отдельную благодарность автор выражает Е.А. Крук и Н.Н. Круку за помощь в работе с рукописью. Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 11-05-00429) и Российского научного фонда (№14-27-00054).

## **Глава 1. Проблемы мантийного кимберлитобразования: анализ предшествующих исследований**

Кимберлитовый вулканизм – уникальное явление, включающее в себя генерацию в субкратонных частях мантии богатой летучими низковязкой ультраосновной магмы, ее подъем с очень высокими скоростями к поверхности и мощное эксплозивное извержение [Sparks et al., 2006; 2009; Mitchell 2008]. Ключевыми вопросами генезиса кимберлитов являются определение физико-химических условий, необходимых для их генерации, составов первичных магм и мантийных протолитов. Решение этих вопросов осложняется тем, что химическое разнообразие кимберлитовых магм в значительной мере определяли процессы смешения и ассимиляции ксенолитов лерцолитов и гарцбургитов, а также кристаллизационная дифференциация [Mitchell, 1986; 2008; Sparks et al., 2006].

Имеющиеся геохимические данные свидетельствуют о многостадийности формирования кимберлитовых расплавов. Причем финальной стадии генерации магмы предшествовало внедрение в протолит метасоматических агентов - карбонатных расплавов/флюидов [Erlank et al., 1987; Becker and le Roex 2006; Coe et al., 2008; Tappe et al., 2008; Agashev et al., 2009; Похиленко и др., 2015]. Геохимические исследования кимберлитов и экспериментальные данные показывают, что источником таких расплавов/флюидов могли выступать как субдуцированные на мантийные глубины карбонатсодержащие породы [Hammouda and Laporte 2000; Becker and le Roex 2006; Coe et al., 2008; Grassi and Schmidt 2011; Litasov et al., 2013; Shatsky et al., 2013a,b], так и окисленные домены астеносферы, возникающие в восходящих потоках вещества за счет потери стабильности скиагитового граната и высвобождении значительных количеств  $Fe^{3+}$  [Becker and le Roex 2006; Rohrbach and Schmidt 2011; Dasgupta et al., 2013; Stagno et al., 2013]. Конкретные условия генерации кимберлитов I и II групп [Smith et al., 1985] в мантийных протолитах и, прежде всего, роль летучих остаются дискуссионными [Ulmer and Sweeney, 2002; Brey et al., 2008; 2009; Foley et al., 2009; Kamenetsky et al., 2009; Sokol et al., 2013a, b, 2014; Соболев и др., 2015]. Анализ имеющихся данных показывает, что на сегодняшний момент слабо изученными остаются как механизмы метасоматической трансформации

потенциальных литосферных протолитов кимберлитов, так и физико-химические условия генерации самих сверхглубинных магм. В тоже время в экспериментальной петрологии разработаны и широко применяются методы изучения как реакционного взаимодействия расплавов, (в том числе и карбонатных) с перидотитами, так и механизмов генерации мантийных расплавов. Это свидетельствует об актуальности и важности экспериментального исследования процессов, обеспечивших генерацию глубинных кимберлитовых магм в субкратонной литосферной мантии.

## **Глава 2. Методика исследований**

Эксперименты были выполнены на многопуансонном беспрессовом аппарате «разрезная сфера», разработанном в Институте геологии и геофизики СО АН СССР. В работе использовали ячейки высокого давления в форме тетрагональной призмы. Детали ячеек изготавливали из тугоплавких оксидов, не имеющих фазовых переходов при параметрах экспериментов и обладающих низкой теплопроводностью. Ячейки высокого давления имели размеры 21.1×21.1×25.4 мм и 19×19×22 мм для экспериментов при 5.5-6.3 и 7.0-7.5 ГПа, соответственно. Платиновые и графитовые ампулы с исследуемым веществом размещались в малоградиентной зоне ячейки высокого давления. Измерения температур проводились в каждом эксперименте с помощью термопары PtRh<sub>6</sub>/PtRh<sub>30</sub>. Проведенные ранее калибровки обеспечивали погрешность определения РТ-параметров на уровне ± 0.1 ГПа и ± 20°C [Pal'yanov et al., 2002; Sokol et al., 2015]. Градиент температуры в образцах составлял менее 10 град/мм.

Весь объем экспериментальных исследований, выполненных в рамках диссертации, может быть разделен на две части. В первой части работы решались задачи по экспериментальному моделированию реакционного взаимодействия между различными по составу карбонатными расплавами и мантийными перидотитами при P=5.5-7.0 ГПа и T=1200-1350°C с использованием сэндвич-метода. Соотношение слоев подбирали таким образом, чтобы расплав образовал значительную по объему область, которая после закалки была бы пригодна для микронзондового анализа. Составы модельных гарцбургита и лерцолита, а также карбонатных расплавов приведены в таблице 1. Исходные карбонатные расплавы по составу моделировали выплавки, которые могли образовываться в различных геодинамических обстановках из



Таблица 1. Составы стартовых смесей лерцолита (LC), гарцбургита (HC) и карбонатных расплавов (C, GS, B6 и B10), мас. %

	LC	HC	GS	C	B6	B10
SiO <sub>2</sub>	45.75	45.78	0.62	5.00	8.03	16.01
TiO <sub>2</sub>	0.18	-	0.02	2.46	0.27	0.19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.06	2.65	0.73	1.45	0.46	0.30
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.47	1.05	-	-	0.00	0.11
FeO	7.53	7.67	3.97	7.38	7.42	18.31
MnO	0.11	0.11	-	0.17	0.23	0.34
NiO	0.35	0.33	-	-	0.05	0.08
MgO	37.73	41.51	4.77	13.83	23.29	22.21
CaO	3.21	0.57	15.67	22.69	13.25	8.30
Na <sub>2</sub> O	0.33	-	0.18	4.65	0.80	0.47
K <sub>2</sub> O	-	-	31.30	3.58	10.04	5.80
Сумма	99.69	99.67	57.26	61.21	63.84	72.12

карбонатизированных пелита и гарцбургита. Уникальные по длительности эксперименты в 150 часов способствовали образованию в образцах равновесных ассоциаций.

Вторая часть работы посвящена исследованию фазовых отношений вблизи ликвидуса водосодержащего кимберлита тр. Удачная при давлениях 6,3-7,5 ГПа и T=1300-1670°C. В экспериментах определены температуры и флюидный режим, при которых расплав вблизи ликвидуса должен находиться в равновесии с реститом, состоящим из оливина, пироксена и граната, т.е. должен быть мультифазно насыщен. Такие условия традиционно используются для реконструкции параметров образования кимберлитовых магм. Образец природного кимберлита (Таблица 2) помещали в платиновые ампулы с графитовым контейнером, что позволило (1) минимизировать потери железа вследствие его контаминации Pt ампулой и (2) поддерживать фугитивность кислорода на уровне буфера EMOG/D.

Изучение взаимоотношений фаз и оценка их количественных соотношений выполнены с помощью оптических микроскопов МБС – 9 и Carl Zeiss Stemi 2000-с и электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3 LMU. Химический состав фаз исследовали с использованием микрозондовых анализаторов (Camebax Micro и Jeol JXA-8100)

Таблица 2. Составы кимберлита тр. Удачная, мас.%

	Исходный кимберлит тр.		Кимберлит тр. Удачная с повышенным содержанием H <sub>2</sub> O					
	Удачная							
SiO <sub>2</sub>	27.52	26.54	26.40	25.78	25.56	25.39	25.11	24.97
TiO <sub>2</sub>	1.35	1.30	1.30	1.27	1.26	1.25	1.23	1.23
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.12	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.93	2.82	2.81	2.74	2.72	2.70	2.67	2.65
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.10	2.99	2.97	2.90	2.88	2.86	2.83	2.81
FeO	5.04	4.86	4.84	4.72	4.68	4.65	4.60	4.57
MnO	0.15	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
MgO	27.68	26.70	26.56	25.93	25.70	25.53	25.24	25.10
NiO	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19
CaO	13.32	12.85	12.78	12.48	12.37	12.29	12.15	12.08
Na <sub>2</sub> O	2.56	2.46	2.45	2.39	2.37	2.36	2.33	2.32
K <sub>2</sub> O	1.84	1.78	1.77	1.73	1.71	1.70	1.68	1.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.41	0.40	0.39	0.38	0.38	0.38	0.37	0.37
H <sub>2</sub> O	2.49	6.00	6.50	8.70	9.50	10.10	11.10	11.60
CO <sub>2</sub>	9.43	9.10	9.05	8.83	8.76	8.70	8.60	8.56
S	0.33	0.32	0.32	0.31	0.31	0.31	0.30	0.30
F	0.14	0.14	0.14	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
Cl	1.32	1.28	1.27	1.24	1.23	1.22	1.21	1.20
Сумма	99.94	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

и энергодисперсионной приставки к сканирующему микроскопу (TESCAN MIRA 3 LMU). Массовые пропорции новообразованных фаз рассчитывали методом баланса масс.

### **Глава 3. Результаты экспериментов по моделированию процессов взаимодействия карбонатных расплавов с перидотитами при 5.5-7.0 ГПа и 1200-1350°C.**

Выполнено две серии экспериментов при 1200°C и 1350°C, длительностью 150 часов. С помощью гранат-ортопироксенового барометра, [Nickel and Green, 1985], а также двупироксенового и Са-Орх термометров [Brey and Kohler, 1990]. Показано, что для большей части полученных силикатных ассоциаций разница между расчетными и реальными экспериментальными РТ-параметрами незначительна. Это, наряду с отсутствием зональности и значимых различий в составе фаз,

свидетельствует в пользу достижения равновесия в полученных ассоциациях.

Образцы после экспериментов при 5.5-7.0 ГПа и температуре 1200°C сохраняют послойное строение. В большинстве из них матрица состоит из Ol – Grt – Crx – Mgs. Итоговый объем закаленного расплава либо равен, либо значительно меньше объема стартового карбонатного расплава. При этом в матрице имеется характерная текстурная особенность – присутствие линзообразных обособлений магнезита. В образцах, полученных при температуре 1350°C, расплав сосредоточен в горячей зоне. Силикатные фазы перидотитовой матрицы из горячей части полностью или частично перекристаллизовывались в холодную часть контейнера. При этом образовывались крупные (до 1 мм) индивиды оливина, клинопироксена и граната. В некоторых образцах расплав оставался в центральной части, а в нем вырастали кристаллы оливина, клинопироксена и граната, размером до 700 мкм.

Фазовый состав образцов после экспериментов приведен на рис. 1. При температуре 1200°C перидотитовая матрица, измененная воздействием карбонатных расплавов, состоит из оливина и клинопироксена, а также содержит до 16 % магнезита и граната. Ортопироксен, как правило, отсутствует. Таким образом, в результате реакции перидотит – карбонатный расплав образуется ассоциация Ol – Grt – Crx ± Орх ± Mgs. При температуре 1350°C количество клинопироксена и магнезита в матрице резко падает, а содержание ортопироксена, напротив, растет, вследствие чего формируется итоговая ассоциация Ol – Grt – Орх ± Crx ± Mgs.

При температурах 1200°C и 1350°C характерной чертой равновесных с перидотитовой матрицей закаленных расплавов являются узкие диапазоны концентрации в них СаО и MgO, не зависящие от составов исходных карбонатных расплавов. При этом содержание SiO<sub>2</sub> в расплаве при 1350°C не превышает 7 мас.%, а при 1200°C – 5 мас.%. Таким образом, при 1200 и 1350°C равновесные с перидотитом расплавы остаются существенно карбонатными. Оливины, возникшие при взаимодействии карбонатных расплавов с лерцолитом и гарцбургитом, характеризуется величиной Mg# от 86 до 91. Оливины, полученные в экспериментах с богатым железом карбонатным расплавом В10, имеют

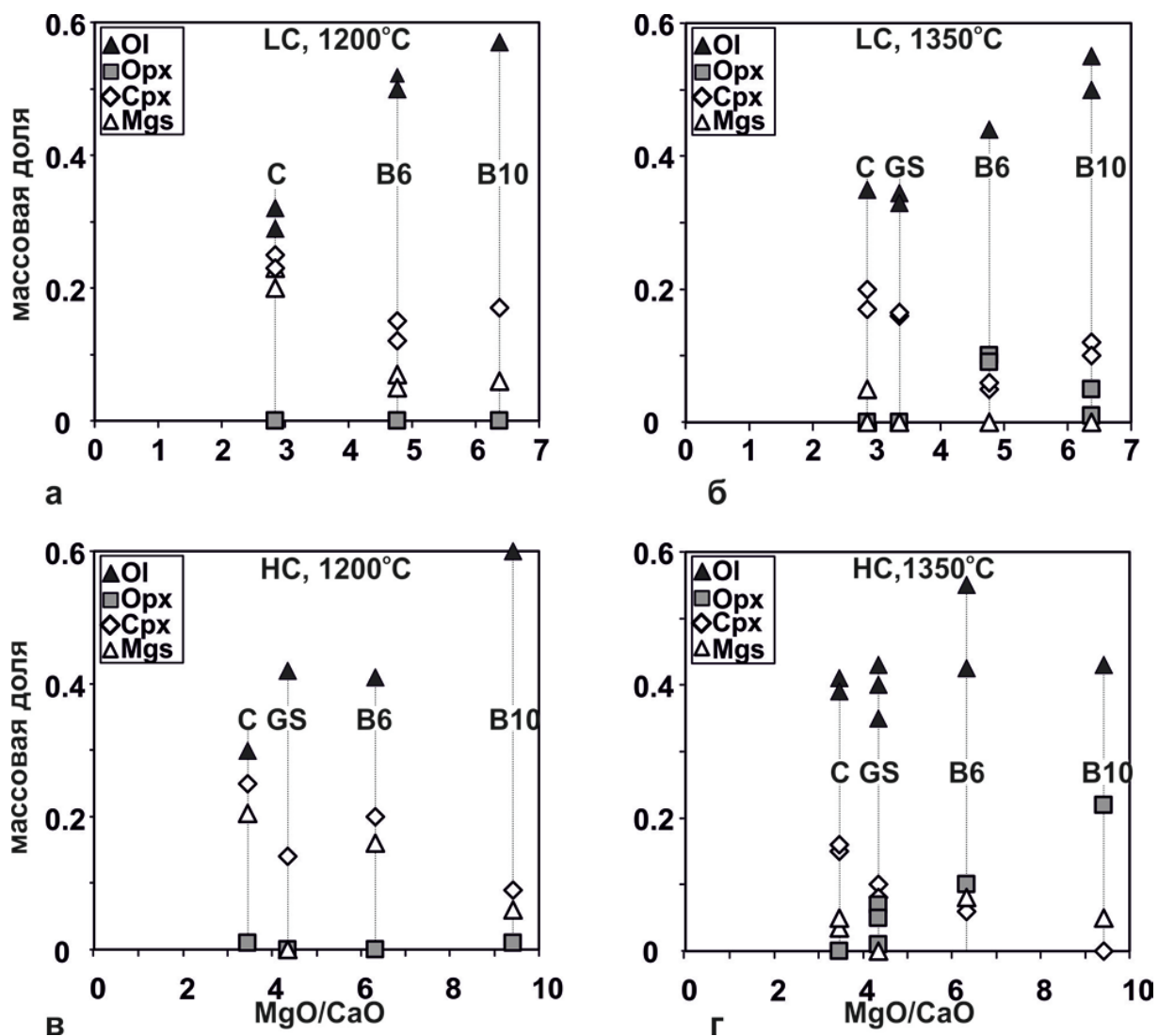


Рис. 1. Массовая доля оливина, ортопироксена, клинопироксена и магнетита в экспериментах с лерцолитом (а, б) и гарцбургитом (в, г) в зависимости от отношения MgO / CaO в стартовом составе «перидотит-карбонатный расплав» сэндвичей при 1200°C (а, в) и 1350°C (б, г).

более низкий Mg#, от 82 до 85. Коэффициент распределения Fe и Mg между оливином и расплавом близок к таковому, определенному в работе [Dasgupta and Hirschmann 2007a] для системы перидотит-CO<sub>2</sub>. Величина Ca# клинопироксенов незначительно снижается с ростом температуры. При этом наиболее железистые клинопироксены кристаллизовались в образцах с богатым железом карбонатным расплавом B10. Отношение Cr/(Cr+Al) в них заметно выше в образцах, полученных в результате экспериментов с гарцбургитом. Содержание K<sub>2</sub>O в клинопироксенах, равновесных с

ультращелочным карбонатным расплавом (31 мас.%  $K_2O$ ) достигало 0.5-0.6 мас.%, тогда как в прочих образцах не превышало 0.3 мас.%.

Ортопироксены, содержащие до 0,5 мас.%  $Cr_2O_3$ , кристаллизовались преимущественно в экспериментах, выполненных при  $T=1350^\circ C$ . Кристаллы, равновесные с наиболее железистым карбонатным расплавом, характеризуются низкими величинами  $Mg\#$  от 86 до 88. С ростом температуры концентрация  $CaO$  в ортопироксенах увеличивается незначительно. При этом  $Al_2O_3$  в них достигает максимума при 5.5 ГПа и  $1350^\circ C$  и минимума при 7.0 ГПа и  $1350^\circ C$ .

Гранаты, кристаллизовавшиеся при  $1200^\circ C$  в системе карбонатный расплав-гарцбургит, на 3-4 мас.% богаче  $CaO$ , чем гранаты из исходного гарцбургита. При этом они сохранили высокое содержание  $Cr_2O_3$  (5.5-10 мас.%). На классификационной диаграмме  $CaO - Cr_2O_3$  Н.В. Соболева [Соболев, 1971; 1974] (рис. 2) составы новообразованных гранатов

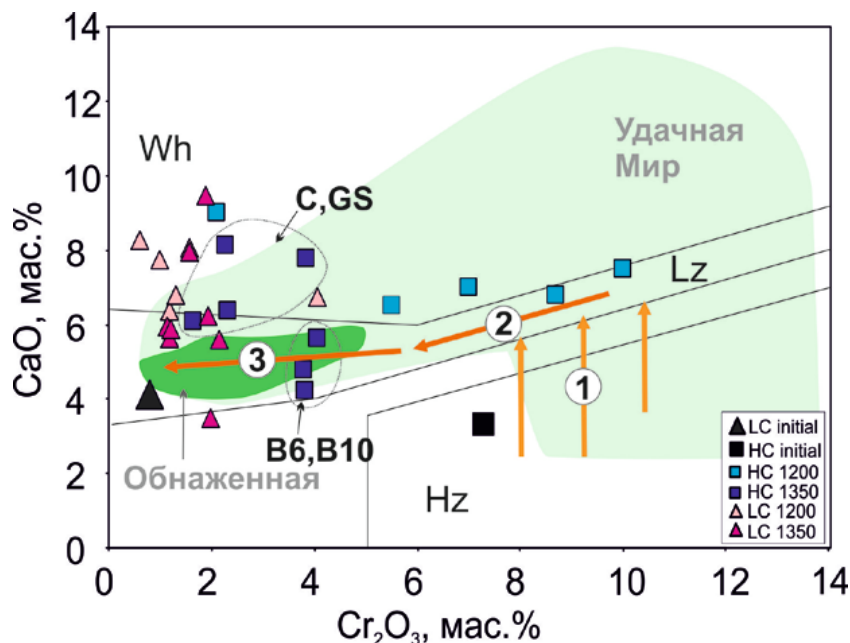


Рис 2. Составы гранатов на классификационной диаграмме  $CaO-Cr_2O_3$  [Соболев и др., 1971; 1974]. Светло-зеленое поле - вариации составов гранатов из ксенолитов метасоматизированных перидотитов тр. Удачная и тр. Мир [Соболев, 1974; Howarth et al., 2014]. Темно-зеленое поле - из тр. Обнаженная [Howarth et al., 2014]. Треугольниками и квадратами показаны составы гранатов из полученных нами образцов. Стрелками на диаграмме показаны тренды изменения составов гранатов, реконструированные в работе [Howarth et al., 2014]: 1 = переход от гарцбургитового к лерцолитовому парагенезису в результате рефертилизации перидотитов из-за циркуляции низкотемпературных флюидов/расплавов до начала частичного плавления литосферной мантии; 2 и 3 = высокотемпературная метасоматическая стадия ( $>1200^\circ C$ ) с последующим частичным плавлением литосферной мантии под воздействием плюма.

преимущественно располагаются в поле лерцолитов. В образцах с богатыми кальцием расплавами с ростом температуры до 1350°C содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в гранатах падает до 2-4 мас.%, а  $\text{CaO}$  возрастает до 8 мас.%. В других системах при близком содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в гранатах содержание  $\text{CaO}$  не превышает 6 мас.%. Анализ составов силикатных фаз, полученных экспериментально при взаимодействии карбонатного расплава и перидотита, показывает, что они, как правило, сходны с составами мантийных минералов и особенно высокотемпературных перидотитов (рис. 3). На этом основании можно сделать вывод, что в экспериментах получены мультифазно насыщенные карбонатные расплавы, которые должны быть стабильны в основании континентальной литосферной мантии.

#### Глава 4. Результаты экспериментов по изучению фазовых отношений кимберлита трубки Удачная при 6.3-7.5 ГПа и 1300-1700°C

Анализ текстур полученных образцов и химического состава фаз показал, что при 6.3 и 7.5 ГПа во всем исследованном интервале температур и концентраций воды в образцах кимберлита тр. Удачная стабилен карбонатно-силикатный расплав. С ростом температуры число

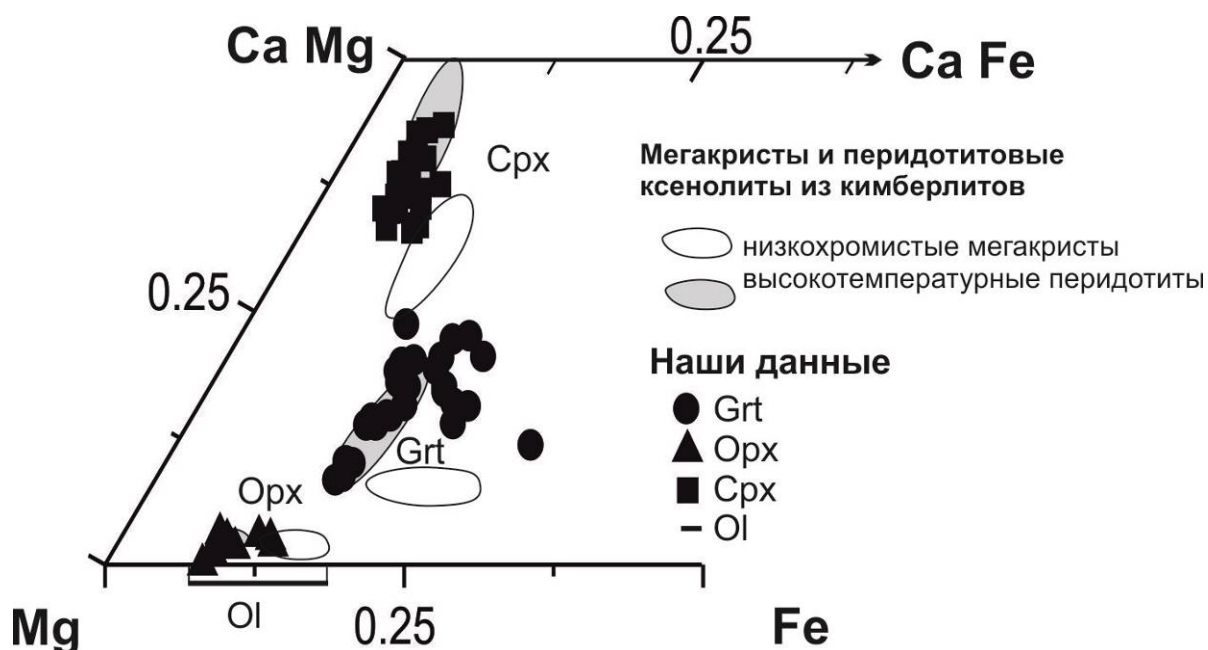


Рис 3. Составы экспериментально полученных оливина, ортопироксена, граната и клинопироксена на Mg - Fe – Ca диаграмме, в сравнении с составами минералов в мантийных парагенезисов [Haggerty, 1995].

силикатных фаз, сосуществующих с расплавом, уменьшается, тогда как доля расплава увеличивается. Продуктами закалки расплавов являются агрегаты, состоящие из дендритных кристаллов силикатов и карбонатов. Химический состав расплава зависит в основном от степени плавления образца, которая, в свою очередь, увеличивается с ростом содержания воды и повышением температуры. При относительно низких температурах (1300-1470°C) и содержании воды 2.5-6 мас.%, расплав имеет преимущественно карбонатный состав. Содержание в нем SiO<sub>2</sub> не превышает 10 мас.%, при этом он обогащен щелочами (до 6 мас.% Na<sub>2</sub>O и до 5 мас.% K<sub>2</sub>O). Закалочный агрегат имеет серый цвет из-за высокого содержания в нем чешуек метастабильного графита. С ростом температуры и концентрации H<sub>2</sub>O содержание SiO<sub>2</sub> в расплаве увеличивается до 28-30 мас.%, растет концентрация MgO, падает содержание CaO и щелочей, а содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> остается практически постоянным. Состав расплава приближается к составу исходного кимберлита при содержаниях H<sub>2</sub>O 2.5-6 мас.%, T=1570-1600°C. При этом количество расплава в образце достигает 60-90 мас.%. С ростом содержания воды в системе до ≥8 мас.% состав расплава приближается к кимберлитовому уже при T=1450-1500°C. При 6.3 ГПа ликвидус системы с 6 мас.% H<sub>2</sub>O находится при 1670°C, а при увеличении концентрации H<sub>2</sub>O до 11.4 мас.% его температура снижается до 1470°C. При 7.5 ГПа ликвидус кимберлита с 6 мас.% H<sub>2</sub>O находится при той же температуре 1670°C и снижается до 1600°C при увеличении концентрации H<sub>2</sub>O до 11.4 мас.%.

Кристаллизация оливина зафиксирована во всем исследованном диапазоне температур и давлений. Его индивиды, выросшие в кимберлите с содержанием H<sub>2</sub>O от 2,5 до 6 мас.% при 1300-1470°C, бесцветны, ксеноморфны и не превышают 50 мкм. При температуре 1500-1600°C и содержании воды до 6 мас.% оливин укрупняется до 100-500 мкм, приобретает светло-зеленый цвет и образует округлые зерна или, реже, призматические кристаллы с элементами огранки. Содержание минала Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> в них варьируется от Fo<sub>90</sub> до Fo<sub>97</sub>. Зональное распределение железа в кристаллах оливина наблюдалось только в низкотемпературных экспериментах (T= 1300°C). В большинстве экспериментов оливин ассоциирует с гранатом. При температуре 1470°C и концентрации H<sub>2</sub>O 2.5 мас.%, содержание CaO в гранате достигает 22 мас.%, а Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

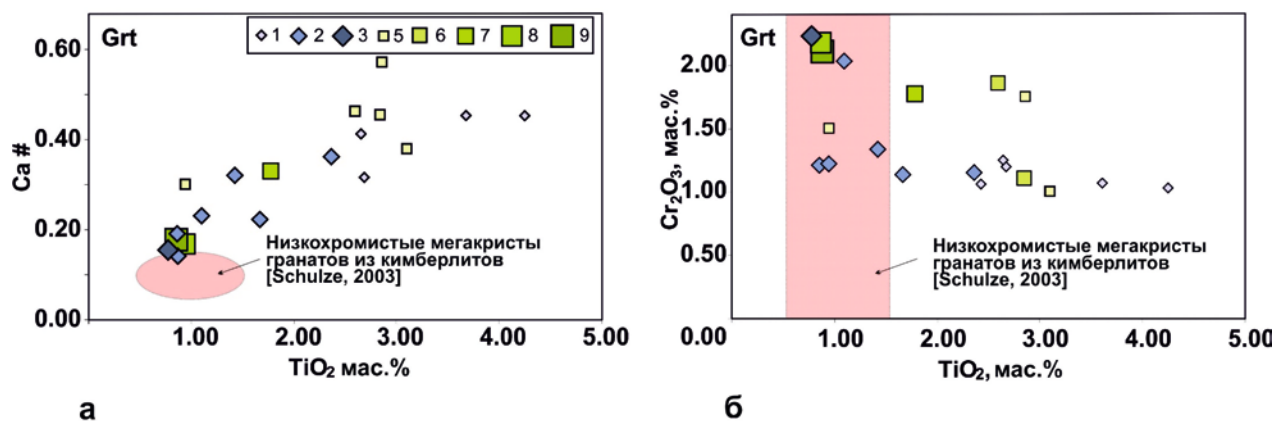


Рис. 4. Составы гранатов в полученных образцах. Ca # (а) и содержание Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (б) как функция содержания TiO<sub>2</sub>. Составы бедных хромом гранатовых мегаакристов [Schulze, 2003] приведены для сравнения. 1 - эксперименты при 6,3 ГПа, 2,5 мас.% H<sub>2</sub>O; 2 - 6,3 ГПа, 6 мас.% H<sub>2</sub>O; 3 - 6,3 ГПа, 8.3-8.7 мас.% H<sub>2</sub>O; 4 - 6,3 ГПа, 11,1 мас.% H<sub>2</sub>O; 5 - 7,5 ГПа, 2,5 мас.% H<sub>2</sub>O; 6 - 7,5 ГПа, 6 мас.% H<sub>2</sub>O; 7 - 7,5 ГПа, 6,5 мас.% H<sub>2</sub>O; 8 - 7,5 ГПа, 9,5 мас.% H<sub>2</sub>O; 9 - 7,5 ГПа, 10,1 мас.% H<sub>2</sub>O; 10 - 7,5 ГПа, 11,6 мас.% H<sub>2</sub>O. Увеличение размера символов соответствует увеличению концентрации H<sub>2</sub>O.

незначительно превышает 1 мас.%. С ростом температуры и концентрации воды в исходных образцах количество Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в гранатах остается постоянным, а содержание CaO снижается до 6-8 мас.%. По составу они схожи с гранатами верлитового парагенезиса по классификации Н.В. Соболева [1969, 1971]. Содержание TiO<sub>2</sub> в гранате значительно снижается с ростом температуры и содержания воды (рис. 4). В экспериментах при T=1300°C и 2.5 мас.% H<sub>2</sub>O, содержание этого компонента в гранатах достигает 5 мас.%. Однако при увеличении температуры и количества воды, содержание в них TiO<sub>2</sub> снижается до 1.5-2 мас.% и попадает в диапазон, характерный для титанистых гранатов из кимберлитов.

Ликвидусные клинопироксены по составу близки к диопсиду с незначительным содержанием жадеита. С ростом содержания H<sub>2</sub>O в них отмечен незначительный рост содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. По концентрации Na<sub>2</sub>O и CaO, эти пироксены сходны с клинопироксенами из включений в фенокристаллах оливина из кимберлита тр. Удачная [Kametetsky et al., 2009].

Одной из важнейших задач нашей работы была реконструкция T-X(H<sub>2</sub>O) условий образования расплавов при фиксированных давлениях, отвечающих уровням захвата наиболее глубоких мантийных ксенолитов [Pearson et al., 2014]. При этих условиях расплавы вблизи ликвидуса



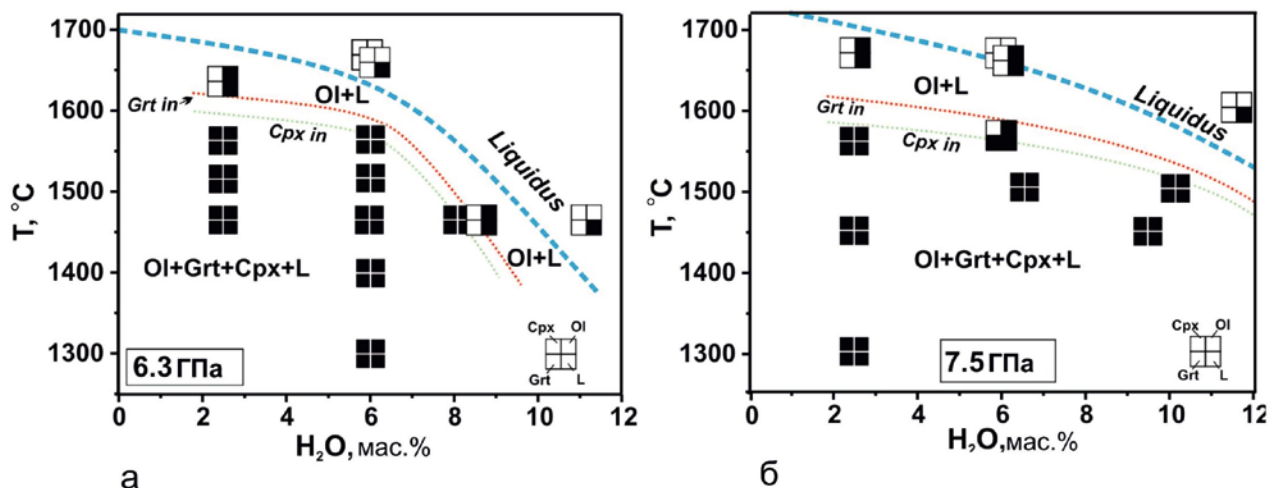


Рис. 5 Фазовая диаграмма кимберлита тр. Удачная в координатах «температура – концентрация  $H_2O$ » при  $P=6,3$  ГПа (а) и  $7,5$  ГПа. Залитый черным сектор квадрата означает присутствие соответствующей фазы, пустой – ее отсутствие.

должны быть равновесны с ассоциацией  $Ol + Grt + Px$ . На основе результатов двух серий экспериментов при  $6.3$  и  $7.5$  ГПа, в координатах температура - концентрация воды были построены фазовые диаграммы для кимберлита тр. Удачная (рис. 5). Анализ полученных данных позволил сделать вывод, что при  $6.3$  ГПа вблизи ликвидуса расплав находится в равновесии с  $Ol + Grt + Cpx$  ассоциацией при содержании воды  $6-8$  мас.%. С увеличением давления до  $7.5$  ГПа эта трехфазная ассоциация становится стабильной только при концентрации воды  $\geq 9$  мас.%.

### Глава 5. Анализ полученных экспериментальных данных

Проведенные исследования главным образом были направлены на изучение процессов реакционного взаимодействия карбонатных расплавов с мантийными гарцбургитами и лерцолитами, а также на реконструкцию условий генерации кимберлитовых магм и их связи с карбонатным метасоматозом в континентальной литосферной мантии. Новые экспериментальные данные фактически позволяют реконструировать, как метасоматоз под воздействием карбонатных расплавов может приводить к изменению минерального состава потенциальных протолитов и при разном составе летучих влиять на состав и параметры генерации кимберлитовых магм.

Применение многоампульсной методики для экспериментального изучения реакционного взаимодействия между карбонатным расплавом и перидотитом позволило использовать широкий спектр составов

карбонатных расплавов (богатый CaO и K<sub>2</sub>O - GS; C, с относительно высоким содержанием CaO и Na<sub>2</sub>O, MgO и богатые K<sub>2</sub>O и FeO - B6 и B10) и перидотитов (лерцолит LC и гарцбургит HC). Полученные данные позволяют детально рассмотреть механизм взаимодействия в образцах (рис. 6). Характерной чертой синтезированных при взаимодействии карбонатных расплавов с перидотитами жидкостей является то, что, несмотря на широкий диапазон вариаций исходных составов, концентрация CaO и MgO в них, как при 1200 °С, так и при 1350°С, варьировала в узких пределах. При этом содержание SiO<sub>2</sub> в расплавах при 1350°С (≤7 мас.%) было лишь незначительно выше, чем при 1200°С (≤5 мас.%) и, фактически, расплавы оставались существенно карбонатными.

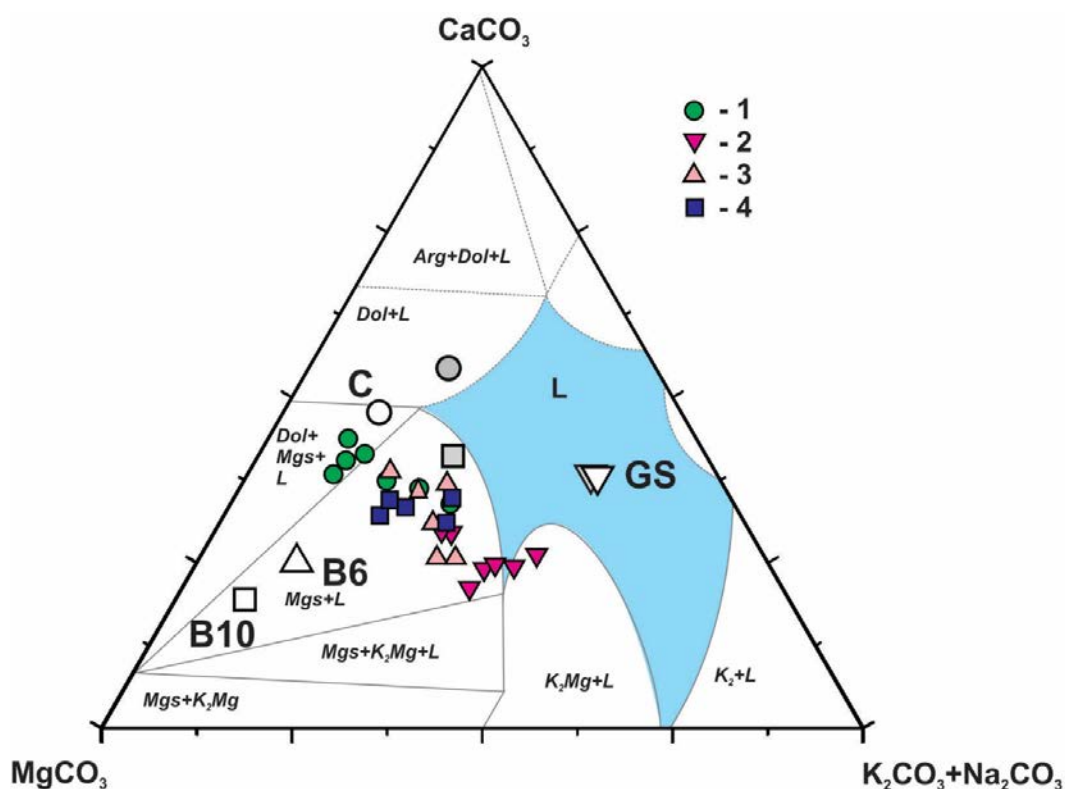
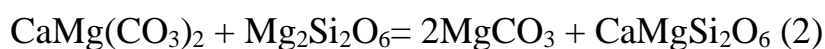


Рис 6. Положение точек карбонатных составов расплавов, полученных в сэндвич-экспериментах на диаграмме MgCO<sub>3</sub>– K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>+Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>– CaCO<sub>3</sub>. Карбонатные составы: 1 – C, 2 – GS, 3 – B6, 4 – B10. Незакрашенные символы – стартовые составы. Серые символы – расплавы, полученные при плавлении карбонатных составов [Sokol et al., 2015a]. Поля кристаллизации отображены в соответствии с данными по плавлению псевдо-бинарной системы K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> -Ca<sub>0.5</sub>Mg<sub>0.5</sub>CO<sub>3</sub>, при 6 ГПа и 1200°С [Шацкий и др., 2015]. L = расплав, K<sub>2</sub> = K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>; K<sub>2</sub>Mg = K<sub>2</sub>Mg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>; Mgs = магнезит; Dol = доломит; Arg = арагонит.

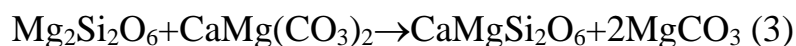
Исходный ультракалиевый карбонатный состав GS был наиболее богат CaO и полностью плавился при 1200°C. Взаимодействие с ним приводило к полному расходу ортопироксена в матрице и обогащению расплава магнием. Ca-Mg обмен осуществлялся по реакции:



Карбонатный состав C при 5,5 ГПа и 1200°C плавился частично с образованием доломита, который затем реагировал с ортопироксеном с образованием магнезита:



Взаимодействие с карбонатными расплавами B6 и B10 приводило к уменьшению количества расплава, росту его Ca# и кристаллизации магнезита:



В полученных образцах финальный состав измененного перидотита при 1200°C был практически идентичен - Ol – Grt – Cpx ± Mgs.

Увеличение температуры с 1200 до 1350°C приводило к плавлению магнезитсодержащей перидотитовой матрицы по реакции (3), идущей справа налево. Это обеспечивало гибридизацию исходного карбонатного расплава с выплавкой из магнезитсодержащего перидотита. В результате Ca# образующегося за счет этого расплава оставался практически неизменным, магнезит исчезал, а ортопироксен кристаллизовался.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что карбонатные расплавы с массовым отношением MgO/CaO >0.3, возникшие в результате плавления карбонатизированных перидотитов при 6-10 ГПа, при их проникновении из более горячей астеносферы (~1400°C) в более холодную (~1200°C) континентальную литосферу могут метасоматически изменять гарцбургиты в магнезитсодержащие лерцолиты или верлиты. Проникновение обогащенных калием и кальцием карбонатных расплавов, образующихся при высоких давлениях и температурах ≤1100°C в результате плавления субдуцированных карбонатизированных пелитов,

при взаимодействии с литосферными перидотитами, должны приводить к образованию безмагнетитовых, обогащенных клинопироксеном лерцолитов или верлитов.

Гранат, в силу своих кристаллохимических особенностей, содержит наиболее важную генетическую информацию и представляет наибольший интерес для реконструкции условий кристаллизации мантийных парагенезисов. Нами экспериментально показано, что состав гарцбургитового граната может быть индикатором, как состава карбонатного агента, так и температуры метасоматоза в мантии [Сокол и др., 2015в; Sokol et al., 2016]. А именно, гранаты кристаллизовавшиеся при 1200°C в результате взаимодействия в образцах «карбонатный расплав-гарцбургит» имели на 3-4 мас.% больше СаО чем в исходных гарцбургитах и при этом сохраняли достаточно высокие содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (от 5,5 до 10 мас.%). На диаграмме СаО -  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  [Соболев и др., 1969; Соболев, 1971], составы этих новообразованных гранатов находятся преимущественно в пределах лерцолитового поля (рис. 2). Взаимодействие «перидотит-карбонатный расплав» при температуре 1350°C приводило к заметному уменьшению в гранатах содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (до 2-4 мас.%), в то время как концентрация СаО в них зависела от состава исходного карбонатного расплава и варьировала от 6 до 8 мас.% в гранатах из образцов с карбонатным расплавом GS и С, и от 4 до 6 мас.% с карбонатными расплавами В6 и В10. Составы этих гранатов на диаграмме СаО -  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  располагаются в пределах верлитового и лерцолитового полей, что согласуется с конечным фазовым составом перидотитовой матрицы после завершения взаимодействия «карбонатный расплав-гарцбургит». Выявленные тенденции воспроизводят основные этапы эволюции состава гранатов, из некоторых метасоматизированных перидотитовых ксенолитов трубки Удачная [Howarth et al., 2014; Соловьева и др., 2014]. По данным [Howarth et al., 2014] для этих ксенолитов низкотемпературный этап метасоматоза приводил к обогащению гранатов СаО при постоянном содержании  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . На следующей высокотемпературной стадии в гранатах происходило снижение концентраций СаО и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Таким образом, тренды изменения концентраций СаО и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в экспериментально полученных гранатах аналогичны трендам в гранатах из некоторых мантийных метасоматизированных перидотитов. Это можно рассматривать, как

свидетельство метасоматоза гарцбургитов континентальной литосферной мантии под воздействием карбонатных расплавов.

Богатый щелочами карбонатный расплав является эффективной средой роста алмаза [Palyanov et al., 2007; Palyanov and Sokol, 2009; Пальянов и др., 2015]. Кристаллизацию алмазов с фибриллярным строением обычно связывают с воздействием метасоматических агентов на субкратонную литосферу и генерацией кимберлитов [Navon, 1999]. Микровключения в таких алмазах имеют преимущественно карбонатный состав [Klein-BenDavid et al., 2007, 2009; Logvinova et al., 2008; Zedgenizov et al., 2009; Корулова et al., 2010]. Нами показано, что в результате взаимодействия карбонатного расплава с перидотитом в экспериментах образуется равновесный мультифазно насыщенный расплав. В нем содержание Са и Mg буферизуется перидотитовой матрицей, а щелочей и железа определяются составом исходного карбонатного расплава. Нами показано, что равновесные с перидотитом расплавы попадают только в поля высокомагнезиальных карбонатитовых включений (рис. 7). Это позволяет сделать вывод, что большинство из богатых кальцием и железом карбонатитовых включений в момент захвата были неравновесны с перидотитом.

Экспериментальное исследование процессов генерации кимберлитовых магм имеет долгую историю. Нами выполнен анализ полей стабильности ликвидусных фаз в зависимости от валового состава мультикомпонентных систем и флюидного режима магмогенерации для всего спектра исследованных экспериментально кимберлитовых и кимберлитоподобных составов [Eggler, Wendlandt, 1979; Edgar, Charbonneau, 1993; Girnis et al., 1995; Ulmer, Sweeney, 2002; Mitchell, 2004; Girnis et al., 2011; Шарыгин и др., 2013; Sokol et al., 2014]. Полное плавление модельных кимберлитоподобных систем при давлениях, характерных для нижних частей литосферной мантии, фиксируется в диапазоне температур от 1470°C до >1700°C. Причем, при увеличении доли CO<sub>2</sub> в исходных составах температура их ликвидуса растет на ~200°C. Вблизи ликвидуса кимберлитоподобных систем границы стабильности отдельных фаз и мультифазного насыщения в целом зависят как от концентрации главных петрогенных компонентов, так и от  $X_{CO_2}(CO_2/(CO_2+H_2O))$  в стартовом составе. Ликвидусный оливин стабилен

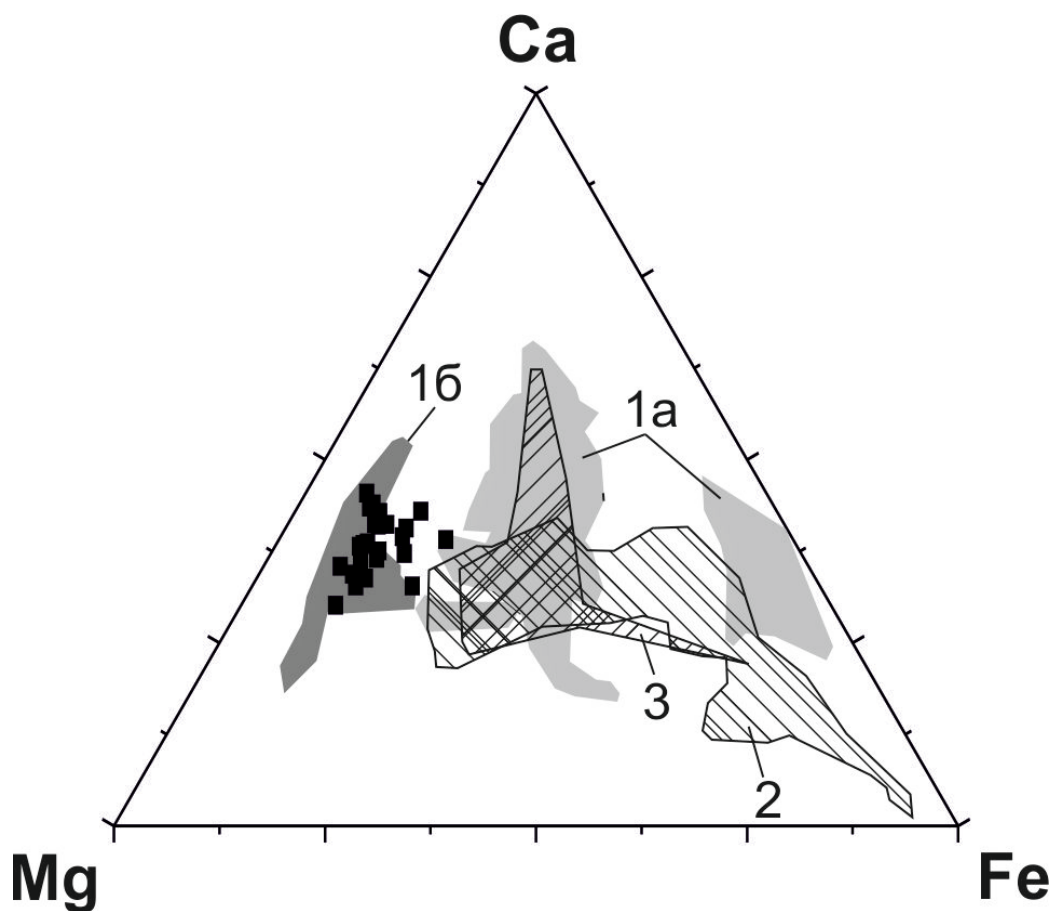


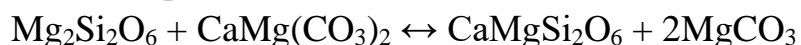
Рис. 7. Mg-Fe-Ca диаграмма (мол.%) с составами равновесных с перидотитом карбонатных расплавов (прямоугольники), и включений в волокнистых алмазах. 1a и 16 – по данным [Klein-Ben David et al., 2009]; 2 – по данным [Zedgenizov et al., 2009]; 3 – по данным [Kopylova et al., 2010].

при  $X_{\text{CO}_2} < 0.5$ . Причем при увеличении MgO/CaO в составах от 1.8 до  $>4.0$  вблизи ликвидуса происходит смена равновесных с расплавом ассоциаций: Ol - Grt - Cpx  $\rightarrow$  Ol - Grt - Opx - Cpx  $\rightarrow$  Ol - Grt - Opx. Согласно подходу, сформулированному в работах [Wyllie, 1977a,b; Eggler, Wendlandt, 1979], эксперименты с составами первичных кимберлитов должны воспроизводить вблизи ликвидуса равновесную фазовую ассоциацию, аналогичную перидотиту при фиксированном давлении. Таким образом, минеральный состав потенциального перидотитового источника при увеличении магнезиальности расплава, который он генерирует, изменяется в последовательности Ol - Grt - Cpx  $\rightarrow$  Ol - Grt - Opx - Cpx  $\rightarrow$  Ol - Grt - Opx. Полученные данные позволяют сделать вывод, что низкие отношения MgO/CaO ( $<3$ ), которые, как правило, реконструируют для составов первичной кимберлитовой магмы [le Roex et al., 2003; Harris et al., 2004; Becker and le Roex, 2006; Kopylova et al., 2007; Kjarsgaard et al., 2009],

исключают их генерацию из карбонатизированного гарцбургита в условиях литосферы.

### Заключение

Проведенные исследования позволили показать, что взаимодействие карбонатных расплавов с гарцбургитом или лерцолитом при P-T параметрах основания литосферной мантии, в основном осуществляется через Mg-Ca обмен по реакции:



и приводит к образованию богатого щелочами, но бедного  $\text{SiO}_2$  ( $\leq 7$  мас.%) карбонатного расплава. Его Ca# варьирует от 37 до 50 и контролируется минеральным составом перидотита. Взаимодействие при  $1200^\circ\text{C}$  приводит к верлитизации перидотита за счет расходования ортопироксена и кристаллизации клинопироксена и магнезита. С увеличением температуры до  $1350^\circ\text{C}$  этот процесс прекращается, концентрация клинопироксена и магнезита в перидотите падает, а ортопироксена увеличивается. Таким образом, метасоматоз сухими карбонатными расплавами может вызвать образование карбонатизированных лерцолитов или иногда верлитов, которые могут выступать потенциальным источником кимберлитовых магм. Однако метасоматоз такого типа не может приводить к образованию магнезитсодержащих гарцбургитов. Силикатные фазы, образующиеся в результате взаимодействия карбонатных расплавов и перидотитов имеют составы, схожие с составами минералов высокотемпературных перидотитов, но заметно отличаются от мегакристов из кимберлитов. Гранаты, кристаллизующиеся в результате реакционного взаимодействия между карбонатными расплавами и гарцбургитом, с увеличением температуры от  $1200$  до  $1350^\circ\text{C}$ , демонстрируют изменение содержания CaO и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , воспроизводящее основные закономерности эволюции состава гранатов из некоторых ксенолитов метасоматизированных перидотитов кимберлита трубки Удачная. Экспериментально установлено, что равновесные с перидотитами карбонатные расплавы, которые могли быть средой кристаллизации литосферных алмазов, близки по составу только к богатым магнием карбонатным включениям в алмазах из кимберлитов. Это позволяет предположить, что алмазы, содержащие обогащенные кальцием и железом карбонатные включения, кристаллизовались в равновесии эклогитами.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что вариации составов уже исследованных экспериментально модельных систем практически перекрывают составы первичных кимберлитовых магм, реконструированных на основе петрологических данных. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что температуры ликвидуса практически всех изученных модельных систем ( $>1470^{\circ}\text{C}$ ) превышают максимальные температуры ( $\sim 1400^{\circ}\text{C}$ ), фиксируемые термометрией для наиболее глубоких ксенолитов из кимберлитов. Снижение температуры ликвидуса исследованных составов при уменьшении в них  $X_{\text{CO}_2}$  свидетельствует о том, что для генерации богатых водой кимберлитовых магм требуется существенно менее мощный дополнительный источник тепла. Генерация первичных магм с повышенным содержанием кальция ( $\text{MgO}/\text{CaO} < 3$ ) и  $X_{\text{CO}_2} < 0,5$  возможна из карбонатизированного гранатсодержащего верлита или лерцолита. В диапазоне проанализированных давлений реконструированные составы первичных магм не попадают в область генерации из карбонатизированного гарцбургита. Расплавы с высокой долей  $\text{CO}_2$  ( $X_{\text{CO}_2} > 0,5$ ) гипотетически могут образовываться в безоливиновых породах - карбонатизированных гранатовых ортопироксенитах или вебстеритах. Вопрос о том, в какой мере реакции с участием карбонатов и водосодержащих фаз буферировали процесс генерации кимберлитовой магмы, остается открытым. Имеющиеся геохимические и петрологические данные свидетельствуют о том, что источником  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  для процессов генерации кимберлитовых расплавов выступали метасоматические расплавы/флюиды, обеспечивавшие многостадийное преобразование протолита. Важным, а возможно и главным, источником воды могли быть номинально безводные минералы, содержащие ОН дефекты в своей структуре.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации:**

##### Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК:

1. Sokol, A.G., Kupriyanov, I.N., Palyanov, Y.N., **Kruk, A.N.**, Sobolev, N.V. Melting experiments on the Udachnaya kimberlite at 6.3-7.5 GPa: Implications for the role of  $\text{H}_2\text{O}$  in magma generation and formation of hydrous olivine // **Geochimica Et Cosmochimica Acta**, **2013**, V: 101, P: 133-155.



2. Sokol, A.G., **Kruk, A.N.**, Palyanov, Yu.N. The role of water in generation of group II kimberlite magmas: constraints from multiple saturation experiments // **American Mineralogist**, 2014, v. 99, p. 2292–2302.
3. А.Г. Сокол, **А.Н. Крук**. Условия генерации кимберлитовых магм: обзор экспериментальных данных // **Геология и геофизика**, 2015, т. 56, № 1—2, с. 316—336.
4. Сокол А.Г., **Крук А.Н.**, Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. Условия образования флогопита при взаимодействии карбонатитовых расплавов с перидотитами субкратонной литосферы // **Доклады академии наук**, 2015, т.462, №6, с. 696-700.
5. Сокол А.Г., **Крук А.Н.**, Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. Состав гранатов как индикатор условий взаимодействия перидотит-карбонатит в субкратонной литосфере (по экспериментальным данным) // **Доклады академии наук**, 2015, т. 463, № 3, с. 331-336.
6. Сокол А.Г., **Крук А.Н.**, Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. Условия карбонатизации и верлитизации литосферных перидотитов при их взаимодействии с карбонатитовыми расплавами // **Доклады академии наук**, 2015, т. 465, № 5, с. 577-582.
7. **Крук А.Н.**, Сокол А.Г., Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н., Соболев Н.В. Состав карбонатитового расплава, равновесного с лерцолитом при 5.5-6.3 ГПа, 1350°C // **Доклады академии наук**, 2016, т. 467, №3, с. 324-328.
8. A.G. Sokol, **A. N. Kruk**, D. A. Chebotarev, Y. N. Palyanov. Carbonatite melt–peridotite interaction at 5.5–7.0 GPa: Implications for metasomatism in lithospheric mantle // **Lithos**, 2016, v:248-251, p. 66-79.

Материалы, тезисы конференций и совещаний:

1. Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Yu.N., **Kruk A.N.** Fluid regime in subcratonic mantle and formation of kimberlite magmas: constrains from experiments // The 3rd Deep Carbon Cycle International Workshop (DCO-3), Novosibirsk, Denisova Cave, Altai, Russia, August 25 - 30, 2011, p. 44.
2. Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Yu.N., **Kruk A.N.** Water activity in kimberlite magmas: constrains from melting experiments at 6.3 and 7.5 GPa // Long abstracts of 10th International Kimberlite Conference, Bangalore (India) 2012.
3. Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Yu.N., **Kruk A.N.** and Sobolev N.V. Melting experiments on the Udachnaya kimberlite at 6.3-7.5 GPa: implications

for the role of H<sub>2</sub>O in magma generation and formation of hydrous olivine // 1st European Mineralogical Conference. 2012. Vol. 1, EMC2012-287.

4. **Крук А.Н.** Экспериментальное изучение фазообразования в водосодержащих кимберлитах I и II группы при P=6,3-7,5 ГПа, и T=1300-1670°C // Материалы 51-й научной международной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс»: геология. Новосибирск, 2013, с 81.
5. Sokol A.G., Palyanov Yu.A., **Kruk A.N.**, Chebotarev D.A. Interaction of the carbonate melts and lherzolite: constraints from sandwich experiments at 5.5 GPa and 1200°C // Abstract 30th International Conference on “Ore Potential of Alkaline, Kimberlite and Carbonatite Magmatism” (Eds: N. Ilbely and M.G. Yalcin). P. 183.
6. Сокол А.Г., **Крук А.Н.** и Чеботарев Д.А. Взаимодействие карбонатного расплава с лерцолитом: экспериментальное исследование при 5,5 ГПа и 1200°C // Материалы Годичного собрания Российского минералогического общества, 2014, с. 209.
7. **Крук А.Н.**, Сокол А.Г., Чеботарев Д.А. Условия образования флогопита в системе перидотит-карбонатит при 5,5-7,5 ГПа и 1200-1450°C // XVII Всероссийское совещание по экспериментальной минералогии, 2015, Тезисы; с.23.
8. Сокол А.Г., **Крук А.Н.**, Чеботарев Д.А., Пальянов Ю.Н. Мантийный метасоматоз под воздействием карбонатитовых расплавов: анализ экспериментальных данных // XVII Всероссийское совещание по экспериментальной минералогии, 2015, Тезисы, с.35.



