

Ультрабазит-базитовая дифференциация мантийных магм и материнских расплавов природных алмазов по данным физико-химического эксперимента

Ю. А. Литвин¹, Н. Е. Анашкина²

¹Институт экспериментальной минералогии РАН, Черноголовка

²Геологический факультет МГУ, Москва

litvin@iem.ac.ru

В связи с проблемой физико-химических условий дифференциации верхне-мантийных ультрабазит-базитовых магм и формирования непрерывных серий перидотит-эклогитовых пород, а также сингенезисом алмаза и первичных включений перидотитового и эклогитового парагенезисов экспериментально при 7 ГПа исследованы фазовые отношения в двух сечениях системы гранатовый перидотит–эклогит–карбонатит. Построены диаграммы равновесной и фракционной кристаллизации граничной силикатной многокомпонентной системы перидотит–эклогит, при этом установлен новый эффект «перидотит–эклогитового тоннеля», которым обеспечивается формирование непрерывных серий перидотит–эклогитовых пород верхней мантии Земли. Также построены диаграммы равновесной и фракционной кристаллизации для политермического сечения перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅, при этом установлено совместное действие эффектов «перидотит–эклогитового тоннеля» и карбонатизации магнезиальных фаз перидотита, которыми обеспечивается последовательное формирование фаз перидотитового и эклогитового парагенезисов в процессах природного алмазообразования.

Ключевые слова: верхняя мантия, мантийный магматизм, генезис алмаза, перидотит, эклогит, карбонатит, сингенетические включения, фракционная кристаллизация, перидотит–эклогитовый тоннель, эксперимент

Ссылка: Литвин, Ю. А., Н. Е. Анашкина (2012), Ультрабазит-базитовая дифференциация мантийных магм и материнских сред природных алмазов по данным физико-химического эксперимента, *Вестник ОНЗ РАН*, 4 NZ9001, doi:10.2205/2012NZ_ASEMPG

В данной работе представлены материалы по двум докладам [Литвин, 2012; Анашкина, Литвин, 2012] на Ежегодном семинаре по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, ГЕОХИ–ИЭМ РАН, Москва, 2012.

1. Ликвидусные фазовые отношения верхне-мантийной системы перидотит–эклогит

В основе представлений о первичных гранат-перидотитовых или пиролитовых по А. Рингвуду [Ringwood, 1962] и дифференцированных перидотитовых и эклогитовых породах верхней мантии – ксенолиты перидотит-пироксенитовых и эклогит-гроспидитовых серий в кимберлитах. Гранатовые перидотиты и эклогиты являются главными породами верхней мантии Земли [Рингвуд, 1981]. Перидотиты статистически доминируют (95%) по отношению к эклогитам (5%). Установлены, однако, и обратные соотношения - для трубок Робертс-Виктор (80% эклогитов и 20% перидотитов), Боббеян, Ритфонтейн (ЮАР), Орапа (Ботсвана), Гарнет-Ридж, Мозес-Рок (США), Загадочная (РФ) и др. Биминеральные Сrx-Grt породы составляют 63% эклогитов. В случае первичных включений в природных алмазах определяющее их количество представлено минеральными фазами перидотитового и эклогитового парагенезисов [Соболев, 1974], которые практически не совмещаются в одном и том же кристалле, за исключением очень редких случаев. Петрохимические тренды демонстрируют непрерывные переходы между перидотитовыми и эклогитовыми породами [Маракушев, 1984] и составами минеральных включений в алмазах [Соболев, 1974]. Но прямые петрогенетические отношения перидотитов и эклогитов еще недостаточно ясны в физико-химическом отношении.

Данные физико-химического эксперимента свидетельствуют о том, что генерация первичной ультрабазитовой магмы в гранат-перидотитовой системе OI-Orx-Crx-Grt контролируется квази-нонвариантной перитектикой OI+Orx+Crx+Grt+L [Литвин, 1991]. При этом на основании экспериментальных данных установлена топология диаграммы равновесных

ЛИТВИН И ДР.: УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

фазовых отношений при плавлении перидотит-эклогитовой системы $Ol-Crx-Crn-Coes$, что позволяет определить принципиальное строение ее ликвидусной структуры [Литвин, 1991]. Выяснилось, что $Ol-Orx-Crx-Grt$ -перидотитовая и $Coes-Orx-Crx-Grt$ -эклогитовая перитектики физико-химически связаны моновариантной кривой $Orx+Crx+Grt+L$, которая имеет температурный максимум в точке «протыкания» ею пограничной плоскости $Orx-Crx-Grt$ между перидотитовым (оливин-насыщенным) и эклогитовыми (кремнезем-насыщенными) тетраэдрами составов. Этот максимум представляет собой термальный эклогитовый барьер между Ol -насыщенными перидотитовыми и SiO_2 -насыщенными $Orx-Qtz/Cs$ - и Ky/Crn -эклогитовыми составами и является непреодолимым препятствием для ультрабазит-базитовой дифференциации ультрабазитовых магм в случаях как равновесной, так и фракционной кристаллизации. «Эклогитовый барьер» сохраняет свое значение и для менее глубоких условий и обсуждался в контексте базальтового магматизма [O'Hara, 1968].

Другая нонвариантная кривая $Ol+Crx+Grt+L$ связывает перидотитовую перитектику $Ol-Orx-Crx-Grt-L$ и эвтектику оливиновых эклогитов при понижении температуры без какого-либо температурного максимума. Известно, что оливиновые эклогиты чрезвычайно редки среди ксенолитов мантийных пород в кимберлитах [Дуэсон, 1983], в то же время они достаточно широко представлены в ксенолитах щелочных базальтов [O'Hara, 1968]. Существование моновариантной кривой $Ol+Crx+Grt+L$ без температурного максимума, которая связывает гранат-перидотитовый и оливин-эклогитовый симплексы, представляет принципиальный интерес ввиду того факта, что Ol может разрушаться и выводиться из системы в реакции с Jd компонентом, при этом в результате формируются Grt , Orx и $Na-Mg$ -силикат выше 4.5 ГПа [Gasparik, Litvin, 1997]. Данная реакция «гранатизации оливина» в равновесном процессе кристаллизации ультрабазитовых расплавов минимизирована и может заметно не проявляться, к тому же фигуративная точка состава системы не может выйти за пределы перидотитового симплекса составов. Однако можно ожидать, что в условиях фракционной кристаллизации в связи с накоплением жадеитового компонента в остаточных расплавах эффективность данной реакции существенно возрастает, при этом важно, что фигуративная точка состава системы может естественным физико-химическим путем перемещаться в оливин-эклогитовый симплекс составов, т.е. выйти за пределы перидотитового симплекса составов.

После экспериментального открытия реакции между оливином и жадеитом, которая приводит к исчезновению оливина [Gasparik, Litvin, 1997], приобрел смысл экспериментальный поиск физико-химического механизма, способного осуществить непрерывную ультрабазит-базитовую дифференциацию мантийных магм и в итоге обеспечить петрогенные связи при формировании пород перидотит-эклогитовых серий. В связи с разработкой мантийно-карбонатитовой теории генезиса алмаза [Litvin, 2007; Литвин 2009] и ее развитием [Литвин, 2010а,б; Литвин и др., 2012] приобрел актуальное значение вопрос о физико-химических условиях формирования минеральных фаз перидотитового и эклогитового парагенезисов, представленных в виде первичных включений в природных алмазах. Несомненно, эта задача может быть решена исключительно в физико-химическом эксперименте.

Настоящая работа посвящена исследованию физико-химических условий алмазообразования в верхне-мантийных перидотит-эклогит-карбонатит-углеродных материнских средах с многокомпонентными и изменчивыми составами, границы базовых составов которых характеризует система перидотит₃₀карбонатит₇₀-эклогит₃₅карбонатит₆₅-карбонатит [Литвин, 2010б; Литвин и др., 2012]. Система материнских сред алмазов и первичных включений в них является частью системы перидотит-эклогит-карбонатит (рис. 1).

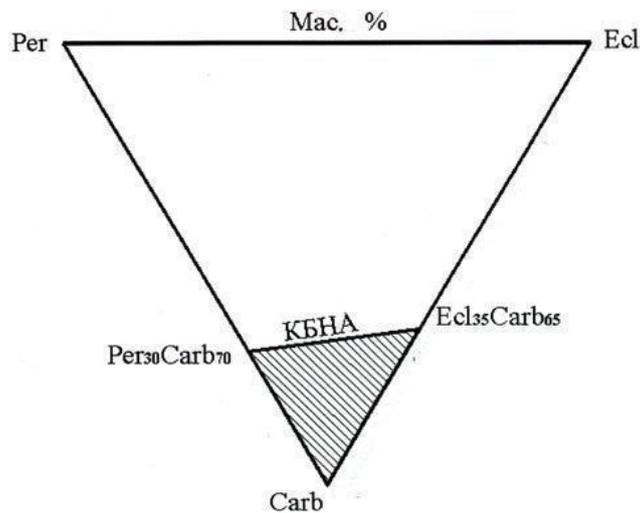


Рис. 1. Система перидотит Per–эклогит Ecl–карбонатит Carb. Линия концентрационного барьера нуклеации алмаза (КБНА) ограничивает поле материнских сред природных алмазов и первичных минеральных включений в них [Литвин, 2010]. Примечание: составы граничных фаз в подписях к рис.2 и 5

Главной задачей является исследование в физико-химическом эксперименте при 7 ГПа фазовых отношений при плавлении системы перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅, которая является фазовой границей диаграммы составов материнских сред с максимальными содержаниями силикатных составляющих. Вспомогательной в данном случае задачей является исследование фазовых отношений при плавлении системы перидотит–эклогит при 7 ГПа.

2. Механизм «перидотит–эклогитового тоннеля»

Фракционная кристаллизация первичной ультрабазитовой (коматиитовой) магмы сопровождается возрастанием концентрации жадеитового компонента в остаточных расплавах. Это активизирует механизм дифференциации ультрабазит–базитовой магмы с образованием непрерывных серий перидотит–эклогитовых пород. По данным физико-химического эксперимент механизм «перидотит–эклогитового тоннеля» [Litvin, 2012] обеспечивается реакцией между Ol- and Jd-компонентами [Gasparik, Litvin, 1997; Litvin e tal., 2000]. При экспериментальном изучении модельной системы форстерит (Fo)–диопсид (Di)–жадеит (Jd) при 7 ГПа установлена невариантная перитектика Fo + Jd–Di–Cpx + Grt + L, обусловленная форстерит – жадеитовой реакцией [Butvina, Litvin, 2010], действие которой эффективно уменьшает содержание Ol в системе при дифференциации вдоль моновариантной кривой Ol+Cpx+Grt+L. Это приводит с понижением температуры к перемещению фигуративной точки состава ультрабазит–базитовой магмы из перидотитового Fo + Di–Jd–Cpx + L дивариантного поля в эклогитово eGrt + Jd–Di–Cpx + L.

Работа «перидотит–эклогитового тоннеля» при фракционной кристаллизации ультрабазит–базитовых магм наглядно раскрывается равновесной фазовой диаграммой системы перидотит (Ol₆₀Opх₁₆Cpx₁₂Grt₁₂) – эклогит (Cpx₅₀Grt₅₀), исследованной экспериментально при 7 ГПа (рис. 2) и построенной на ее основе диаграммой фракционной кристаллизации этой же системы (рис. 3). Ликвидусной фазой в обоих случаях является оливин.

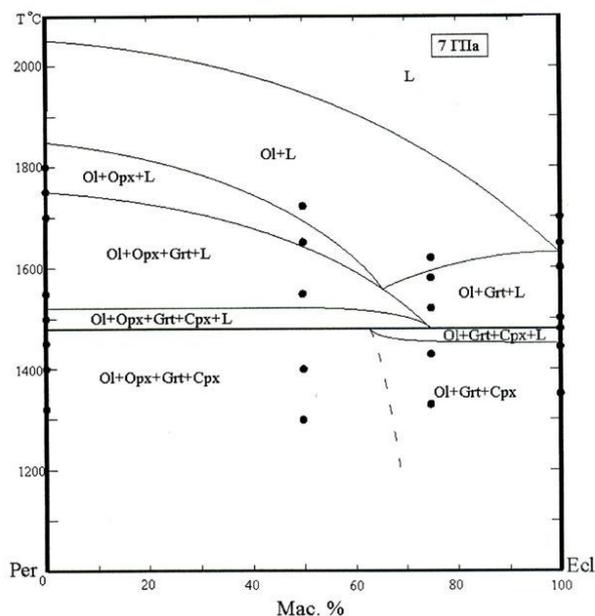


Рис. 2. Диаграмма равновесной кристаллизации системы перидотит–эклогит при 7 ГПа; стартовые составы: (1) перидотит Per ($Ol_{60}Opx_{16}Cpx_{12}Grt_{12}$) = Na₂O 0.52, MgO 37.12, FeO 11.35, CaO 2.49, Al₂O₃ 3.48, SiO₂ 45.04 и, соответственно, перидотитовые оливин Ol = MgO 45.63, FeO 14.35, SiO₂ 40.02, ортопироксен Opx = Na₂O 0.30, MgO 33.34, FeO 7.26, CaO 0.21, Al₂O₃ 0.49, SiO₂ 57.80, клинопироксен Cpx = Na₂O 2.60, MgO 16.88, FeO 4.68, CaO 15.66, Al₂O₃ 4.28, SiO₂ 55.92, гранат Grt = MgO 20.93, FeO 8.48, CaO 3.97, Al₂O₃ 24.07, SiO₂ 42.55; (2) эклогит Ecl ($Cpx_{50}Grt_{50}$) = Na₂O 3.71, MgO 8.51, FeO 15.24, CaO 9.04, Al₂O₃ 15.76, SiO₂ 47.74 и, соответственно, эклогитовые клинопироксен Cpx = Na₂O 7.41, MgO 8.50, FeO 6.40, CaO 12.09, Al₂O₃ 9.52, SiO₂ 56.31, гранат Grt = MgO 8.51, FeO 24.08, CaO 5.98, Al₂O₃ 22.19, SiO₂ 39.23. Черные кружки – экспериментальные точки.

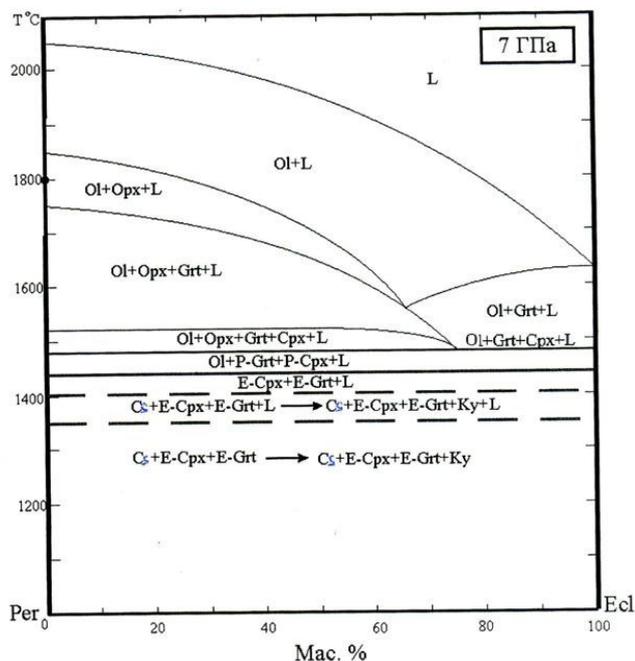


Рис. 3. Диаграмма фракционной кристаллизации системы перидотит ($Ol_{60}Opx_{16}Cpx_{12}Grt_{12}$)–эклогит ($Cpx_{50}Grt_{50}$) при 7 ГПа в условиях перидотит–эклогитового тоннеля. Примечание: знаки P и E относятся, соответственно, к обозначениям одноименных перидотитовых и эклогитовых фаз

Для равновесного случая в солидусной перитектической точке теряется ортопироксен, в результате субсолидус представлен двумя ассоциациями с оливином Ol+Opx+Cpx+Grt и

Ol+Cpx+Grt. Для случая фракционной кристаллизации в результате действия эффекта «перидотит-эклогитового тоннеля» теряется также оливин, и дальнейшая кристаллизация остаточных расплавов определяется перемещением фигуративной точки расплава с линии Cpx–Grt по элементам ликвидуса эклогитовых систем.

Рис. 4 схематически представляет поверхность ликвидуса верхне-мантийной перидотит-эклогитовой системы в проекции на пограничную плоскость Ol–Cs–Crn комплексного тетраэдра составов Ol–Cs–Crn–Cpx так, что линия составов Cpx–Grt (по которой соприкасаются перидотитовый и все эклогитовые симплексы, т.е. она является общей для всех систем) занимает перпендикулярное положение к плоскости Ol–Cs–Crn.

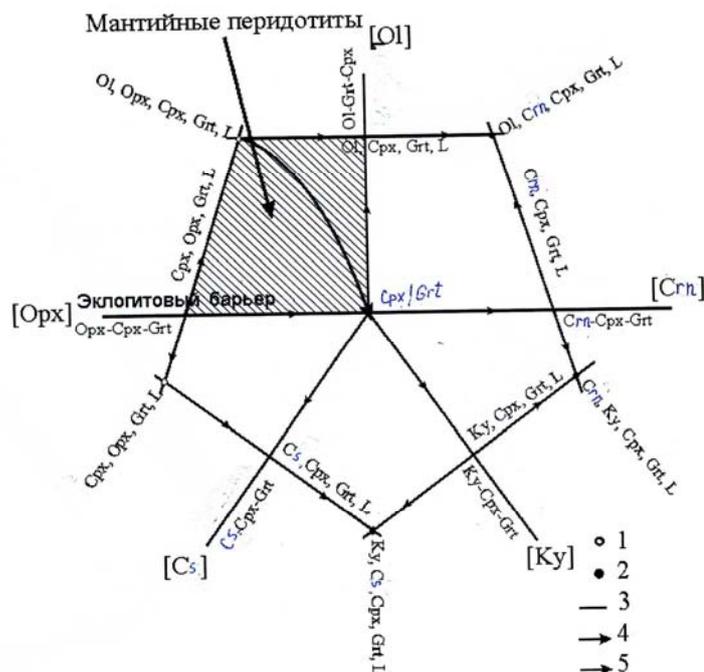


Рис. 4. Дивариантное ликвидусное поле Cpx+Grt+L (вид из вершины Cpx). Обозначения: 1, 2 – квази-инвариантные перитектические и эвтектические точки, соответственно; 3 – тонкие линии – моновариантные кривые со стрелками 4, показывающие направления понижения температуры; 5 – толстая линия со стрелкой в конце на линии Cpx–Grt показывает изменение направления моновариантной кривой Ol+Cpx+Grt+L в условиях фракционной кристаллизации и действия механизма «перидотит–эклогитового тоннеля»

Рис. 4 демонстрирует, что благодаря оливин–жадеитовой реакции фигуративные точки составов остаточных расплавов перемещаются к системе Cpx-Grt (трасса перемещения фигуративных точек остаточных расплавов от квази-инвариантной точки Ol+Orx+Cpx+Grt+L до линии составов Cpx-Grt обозначена толстой искривленной линией на заштрихованном участке ликвидусной поверхности гранатового перидотита). Тем самым открывается путь для перемещения фигуративной точки по ликвидусной поверхности любой кремнезем-насыщенной эклогитовой системы, при этом выбор направления дальнейшей фракционной кристаллизации определяется соотношением компонентов в исходном составе ультрабазитового расплава в начале его фракционной кристаллизации. В итоге рассмотренный механизм «перидотит–эклогитового тоннеля» позволяет пройти мимо термального эклогитового барьера и, соответственно, проложить путь для непрерывной фракционной кристаллизации ультрабазит-базитовых магм с переходом от формирования Ol-содержащих перидотитовых к Cs-содержащим эклогитовым породам.

3. Дифференциация силикат-карбонатных расплавов, материнских для алмаза и минералов перидотитового и эклогитового парагенезисов

Согласно экспериментальным данным изменчивые составы перидотит–эклогит–карбонатитовых материнских расплавов для алмазов и минеральных включений в них

ЛИТВИН И ДР.: УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

относятся к системе перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅–карбонатит. На рис. 5 и 6 представлены, соответственно, равновесная диаграмма граничной системы перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅ и диаграмма фракционной кристаллизации.

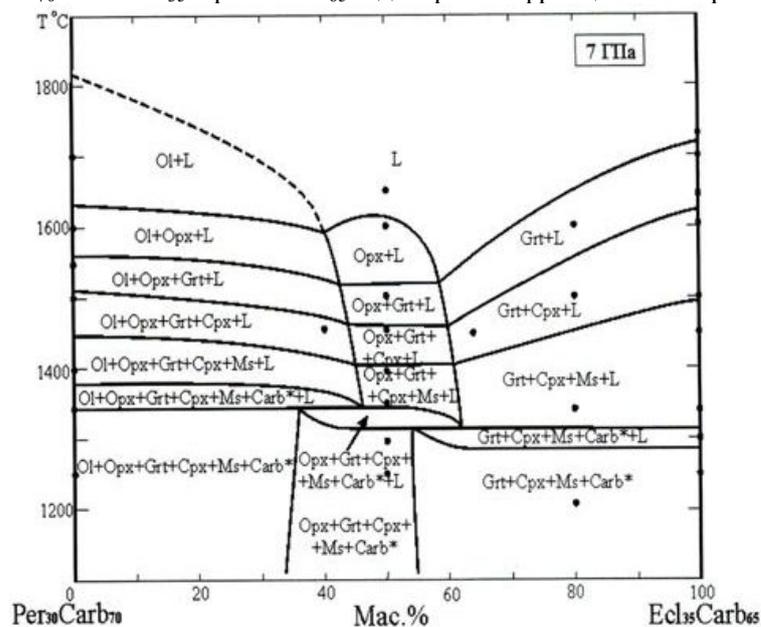


Рис. 5. Предварительная диаграмма равновесной кристаллизации системы перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅ при 7 ГПа; стартовые составы: (1) карбонатит – K₂O 18.55, Na₂O 1.69, MgO 8.30, FeO 15.89, CaO 15.08, CO₂40.49, (2) перидотит Per (Ol₆₀Opx₁₆Cpx₁₂Grt₁₂) – см. подпись к рис. 2; (3) эклогит Ecl (Cpx₅₀Grt₅₀) – см. подпись к рис. 2. Черные кружки – экспериментальные точки. Карбонатные фазы – выделен магнетит Ms, а остальные карбонаты Ca, Fe, Na и K обозначены как Carb* для упрощения диаграммы.

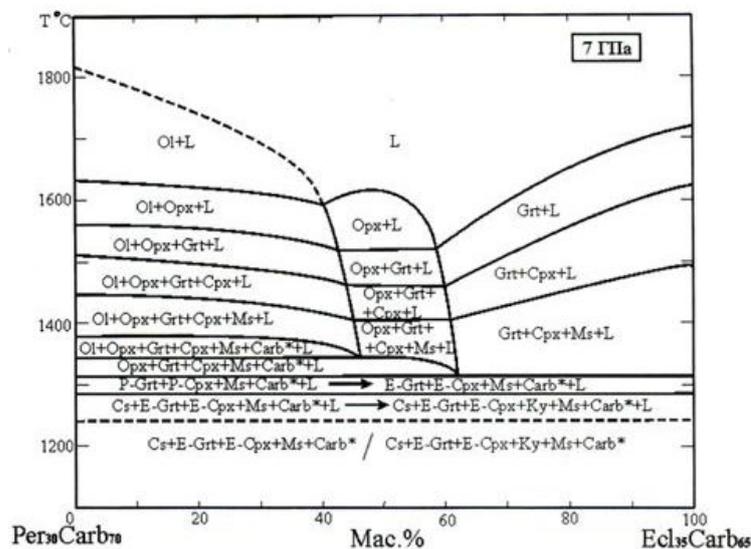


Рис. 6. Предварительная диаграмма фракционной кристаллизации системы перидотит₃₀карбонатит₇₀–эклогит₃₅карбонатит₆₅ при 7 ГПа

По предварительным данным на дифференциацию материнских расплавов определенное влияние оказывает механизм «перидотит–эклогитового тоннеля». Однако возникает дополнительный фактор, связанный с эффектами карбонатизации Mg-компонентов перидотита. Ликвидусными фазами в обоих случаях являются оливин, ортопироксен и гранат, при этом проявляется действие процессов карбонатизации. Для равновесного случая в первой солидусной перитектической точке теряется оливин, во второй – ортопироксен, в результате

ЛИТВИН И ДР.: УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

субсолидус представлен одной ассоциацией с оливином $Ol+Orx+Cpx+Grt+Ms+Carb^*$ и двумя ассоциациями без оливина – $Orx+Cpx+Grt+Ms+Carb^*$ и $Cpx+Grt+Ms+Carb^*$. Тем не менее, в случае равновесной кристаллизации клинопироксены и гранаты отличаются перидотитовой специализацией и, вероятно, приобретают эклогитовые составы только в условиях фракционной кристаллизации. В результате фракционной кристаллизации в субсолидусных ассоциациях появляются коэсит и кианит.

На рис. 7 приведена схематическая диаграмма ликвидуса системы перидотит–эклогит–карбонатит, свидетельствующая о том, что роль процесса карбонатизации Mg-компонентов возрастает с увеличением содержания карбонатной составляющей, а значение механизма «перидотит–эклогитового тоннеля» – с повышением относительного содержания силикатной составляющей.

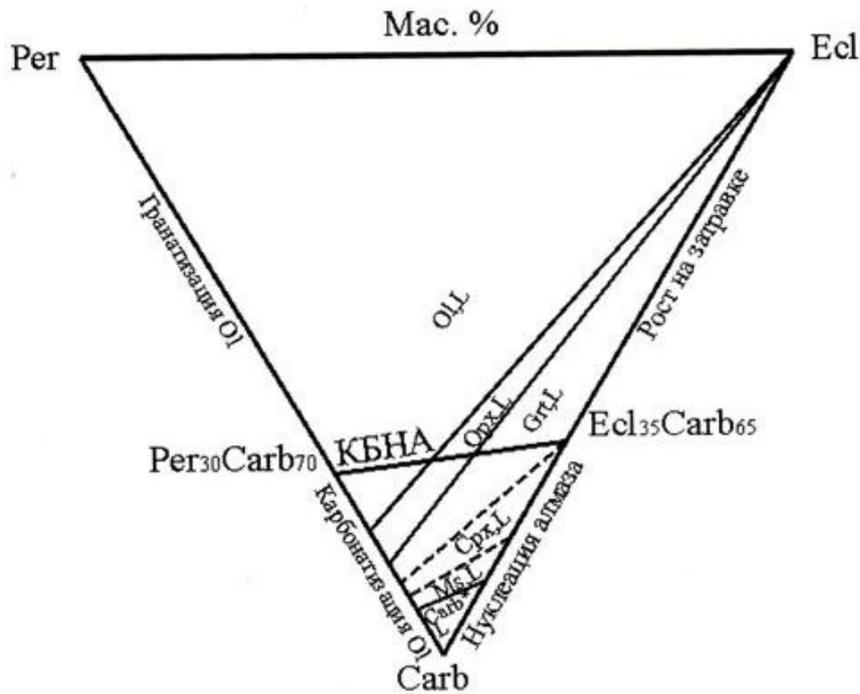


Рис. 7. Схематический ликвидус системы перидотит–эклогит–карбонатит

Фракционная кристаллизация ответственна за формирование в алмазах минеральных включений как перидотитового, так и эклогитового парагенезисов. Однако существование закономерного перехода при фракционной кристаллизации сингенетических минералов от перидотитового парагенезиса к эклогитовому свидетельствует о последовательной смене соответствующих условий, что исключает их суперпозицию и, как следствие, одновременный захват растущими алмазами фаз, принадлежащих к разным парагенезисам. Имеющиеся в литературе сообщения о включениях в одном и том же кристалле алмаза минералов различной парагенетической принадлежности следует относить к категории случайных явлений, не имеющих физико-химической основы.

На рис. 8 и 9 представлены примеры сингенетической кристаллизации алмаза и минералов, соответственно, перидотитового и эклогитового парагенезисов, по результатам тестовых экспериментов при 8.5 ГПа.



Рис. 8. Сингенетическая кристаллизация алмаза с оливином в перидотит-карбонатитовой системе: D = алмаз; Ol = оливин

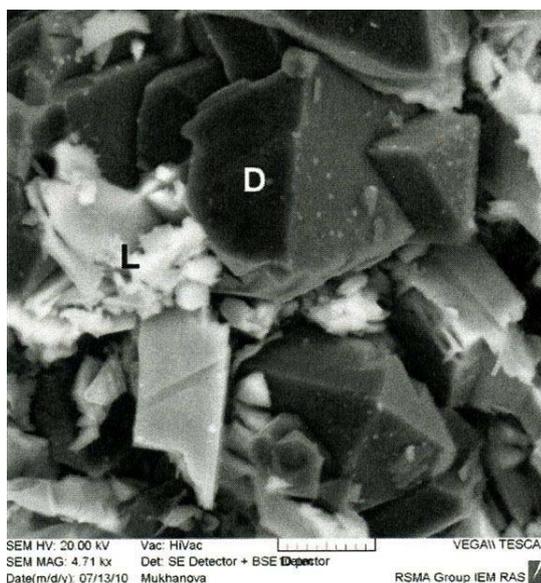


Рис. 9. Сингенетическая кристаллизация алмаза с Cpx и Grt в эклогит-карбонатитовой системе [Покровская, Литвин, 2011]: D = алмаз; Cpx = клинопироксен; Grt = гранат; L = расплав (после закалки)

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 05-00401 и НШ-3654-2012-5.

Литература

Анашкина, Н. Е., Ю. А. Литвин (2012). Парагенетические отношения алмазов и минералов включений по экспериментальным данным. В кн. «Тезисы докладов Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ЕСЭМПГ-2012)», 17–18 апреля 2012 г., Москва, ГЕОХИ и ИЭМ РАН, с. 3.

Доусон, Дж. (1983). *Кимберлиты и ксенолиты в них*. Москва: Мир. 300 с.

Литвин, Ю. А. (1991). *Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли*. Москва: Наука. 312 с.

ЛИТВИН И ДР.: УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ

Литвин, Ю. А. (2009). Экспериментальные исследования физико-химических условий образования алмаза в мантийном веществе. *Геология и геофизика*, 50 (12), 1530–1546.

Литвин, Ю. А. (2010а). Происхождение алмаза и сингенетических включений по данным физико-химического эксперимента. В сб. *Труды XXI Международной научной конференции «Фундаментальные проблемы геологии месторождений полезных ископаемых и металлогении» к 100-летию академика В.И. Смирнова*. М., МГУ, 26–28 января 2010 г., т. 2, с. 208–226

Литвин, Ю. А. (2010б). Физико-химические условия образования природного алмаза и гетерогенного вещества первичных включений в нем. В кн. *«XI Съезд РМО – Современная минералогия: от теории к практике. Материалы Международной научной конференции»*, Санкт-Петербург, Россия, 12–15 октября 2010 г., с. 77–78.

Литвин, Ю. А. (2012). Петрогенные связи гранатовых перидотитов и эклогитов: дифференциация мантийных ультрабазит-базитовых магм в физико-химическом эксперименте. В кн. *«Тезисы докладов Ежегодного семинара по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии (ЕСЭМПГ-2012)»*, 17–18 апреля 2012 г., Москва, ГЕОХИ и ИЭМ РАН, с. 58.

Литвин, Ю. А., П. Г. Васильев, А. В. Бобров, В. Ю. Окоемова, А. В. Кузюра (2012). Материнские среды природных алмазов и первичных минеральных включений в них по данным физико-химического эксперимента. *Геохимия*, 50, №7.

Маракушев, А. А. (1984). Нодули перидотитов в кимберлитах как показатели глубинного строения литосферы. В кн.: *Доклады советских геологов на 27-ой сессии Международного геологического конгресса. Петрология*. Москва: Наука, с. 153–160.

Покровская, Н. Е., Ю. А. Литвин (2011). Экспериментальное моделирование сингенезиса алмаза и минералов перидотитового и эклогитового парагенезисов. *Вестник ОНЗ РАН*, том 3, 2011. NZ6079, doi: 10.2205/2011 NZ000209.

Рингвуд, А. Е. (1981). *Состав и петрология мантии Земли*. М.: Недра. 584 с.

Соболев, Н. В. (1974). *Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии*. Новосибирск: Наука, 1974. 264 с.

Butvina, V. G., Yu. A. Litvin (2010). Physico-chemical transition from peridotite assemblage to the eclogite one (experimental data at 7.0 GPa). *Geophysical Research Abstracts*. Vol. 12. EGU2010 3717-1, 2010. European Geosciences Union General Assembly 2010.

Gasparik, T., Yu. A. Litvin (1997). Stability of $\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ and melting relations on The forsterite-jadeite join at pressures up to 22 GPa. *Eur. J. Mineral.*, 9, 311–326.

Litvin, Yu. A. (2007). High-pressure mineralogy of diamond genesis. In: *Advances in High Pressure Mineralogy (edited by Eiji Ohtani)*, Geological Society of America Special paper 421, 83–103.

Litvin, Yu. A. (2012). Ultrabasic-basic evolution of upper mantle magma: petrogenetic links between diamond-bearing peridotites and eclogites (on evidence of physico-chemical experiments). *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 14, EGU2012-3610-1, 2012. EGU General Assembly 2012.

Litvin, V. Yu., T. Gasparik, Yu. A. Litvin (2000). The enstatite-nepheline system in experiments at 6.5 - 13.5 GPa: an importance of $\text{Na}_2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ for melting of the nepheline-normative mantle. *Geochemistry International*, 38, Issue 1, 100–107.

O'Hara, M. J. (1968). The bearing of phase equilibria in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth-Sci. Rev.*, vol. 4, 69–133.

Ringwood, A. E. (1962). A model for the upper mantle. *J. Geophys. Res.*, 67, 857–866.