

УДК 549.211

Ю.А. Литвин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
"Институт экспериментальной минералогии РАН"
143432, Моск. обл., г. Черноголовка, Россия, ул. Акад. Осипьяна, 4
E-mai: litvin@iem.ac.ru

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СИНГЕНЕЗИСА АЛМАЗА И ГЕТЕРОГЕННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ МАТЕРИНСКИХ РАСПЛАВАХ (ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ)

Способность карбонат-силикат-углеродных материнских сред алмаза кимберлитовых месторождений обеспечить его сингенезис с минералами первичных включений раскрывается в физико-химическом эксперименте, если состав исследуемых многокомпонентных систем и гетерогенных включений согласован. Экспериментально при давлении 7 ГПа изучены фазовые отношения при плавлении гетерогенной системы перидотит — карбонатит — алмаз, контролирующей эволюцию материнских сред в условиях перидотитового парагенезиса. Определена "диаграмма сингенезиса", которая характеризует физико-химические условия образования алмаза совместно с силикатными и карбонатными перидотитовыми минералами. В физико-химическом эксперименте при давлении 7 ГПа также исследована система перидотит₃₀карбонатит₇₀ — эклогит₃₅карбонатит₆₅. Она ограничивает состав материнских сред по линии концентрационного барьера нуклеации алмазной фазы. Обнаруживаются процессы карбонатизации магниезиальных компонентов перидотитов, с чем связан перидотит-эклогитовый парагенетический переход в материнских расплавах. Экспериментальные данные позволяют построить схематическую "диаграмму сингенезиса" алмаза и первичных включений обоих парагенезисов в режиме фракционной кристаллизации. Переход от перидотитового к эклогитовому парагенезису закономерный и последовательный, что минимизирует одновременный захват растущими алмазами фаз разных парагенезисов. На физико-химической основе рассмотрены особенности химической и парагенетической эволюции материнских сред и процессов образования алмазов и фаз-включений в мантийных очагах карбонатно-силикатных (карбонатитовых) магм.

Введение. В мантийно-карбонатитовой теории генезиса алмаза [7, 12, 31] результаты физико-химических экспериментальных исследований алмазообразующих систем сочетаются с данными аналитической минералогии сингенетических включений в алмазах кимберлитовых месторождений [3, 22, 24, 28—30, 35, 42]. В физико-химическом эксперименте граничный состав систем задан на основе многокомпонентного состава гетерогенных фаз герметических включений в алмазах верхнемантийного генезиса. В результате обнаруживается, что основу химически и парагенетически изменчивых материнских сред алмазов составляют полностью смесимые карбонатно-силикатные (карбонатитовые) расплавы с раство-

ренным углеродом. Материнские среды содержат все компоненты и фазы минералов, расплавов и летучих соединений, захваченных растущими алмазами. Одни из них растворимы в материнских расплавах и кристаллизуются в них, другие, физико-химически инертные, лишь механически проникают в них. Физико-химический эксперимент в *PT*-условиях стабильности алмаза раскрывает закономерности изменения химического состава и фазового состояния многокомпонентных материнских сред и обусловленные ими процессы образования алмаза и сингенетических включений. Первостепенными для проблемы генезиса алмаза становятся экспериментальные и аналитические исследования физико-химических факторов образования в материнских средах совместно с алмазами минераль-

© Ю.А. ЛИТВИН, 2013

ных ассоциаций перидотит-пироксенитового и эклогит-гроспидитового парагенезисов. Эти ассоциации служат источниками первичных включений в алмазах. Обобщенная оценка состава первичных включений дает отчетливое представление о химических условиях генезиса алмазов и их сингенетических включений.

Первые тестовые эксперименты по кристаллизации алмаза в многокомпонентных карбонат-углеродных системах $K_2Mg(CO_3)_2 - C$ и $K_2O - Na_2O - CaO - MgO - FeO - CO_2 - C$ [13, 17] были интерпретированы как показатель того, что карбонатсодержащие расплавы имеют определяющее значение в происхождении алмаза. Этот вывод поддерживался тем, что в эксперименте был воспроизведен состав многокомпонентной карбонатитовой составляющей карбонат-силикат-флюидных включений в алмазах Ботсваны [42]. Затем была показана высокая алмазообразующая эффективность расплавов с составом четырех характерных карбонат-силикатных включений (с вариацией содержания SiO_2 в пределах 13,6—45,1 мас. %) [14]. По сути, включения в алмазах Ботсваны были раскрыты как фрагменты затвердевших алмазообразующих расплавов гетерогенных материнских сред (что согласуется с выводами по результатам последующих физико-химических экспериментов [7, 12, 31]). В дальнейшем выяснилось [15], что силикатные компоненты материнских расплавов влияют на кинетику кристаллизации алмаза как ингибиторы нуклеации алмазной фазы в карбонатно-силикатных расплавах. В связи с этим при определенных предельных содержаниях силикатных составляющих возникают концентрационные барьеры нуклеации алмаза (КБНА). Их значения определены в многокомпонентных расплавах ключевых перидотит- и эклогит-карбонатитовых систем [1, 10].

В тестовых экспериментах по критерию нуклеации алмазной фазы раскрывается алмазообразующая эффективность расплава любого вещества, ассоциированного с природными алмазами (обзоры в [7, 12, 20, 31]). Кинетически эффективными оказались карбонатные, карбонатно-силикатные, хлоридные, сульфидные, металлические, некоторые щелочно-силикатные растворители углерода. Нуклеация алмазной фазы в них происходит на первых минутах и даже секундах [16] выдержки заданных *PT*-параметров, как только в экспе-

риментальных образцах формируются расплавы. Для нуклеации алмазной фазы с флюидными растворителями H_2O , CO_2 и их смесями требовались суточные выдержки (более 5 сут [20]). Благодаря тестовым экспериментам обнаружена нуклеация алмазной фазы в расплавах многих химически разных фаз-включений. Однако при этом не возникает оснований для достоверного выбора из них единственного вещества, которое можно было бы соотнести с природной материнской средой [6]. В этом ограниченность тестовых экспериментов. Неопределенность в интерпретации их результатов, как и в случае использования лишь минералогических фактов, ведет к малообоснованным предположениям о химическом и фазовом составе природных материнских сред алмазов и фаз-включений.

Методологической основой физико-химического эксперимента служит критерий сингенезиса алмазов и фаз-включений [7, 12, 31], которым, соответственно, поглощается критерий нуклеации алмазной фазы. По критерию сингенезиса требуется, чтобы физико-химические свойства материнской среды обеспечивали ей способность к образованию не только алмазов, но и всего разнообразия минералов, расплавов и летучих компонентов, первично включаемых в них. Остаточное давление в герметических включениях карбонатно-силикатных расплавов [37] и минеральных фаз [23] (как фрагментах гетерогенных материнских сред) свидетельствует о ростовом механизме захвата алмазами фаз-включений в гетерогенной материнской среде. Физико-химический эксперимент на основе критерия сингенезиса обеспечивает объективное обоснование мантийно-карбонатитовой теории генезиса алмаза.

В настоящей работе раскрыты новые особенности обобщенной диаграммы состава материнской среды алмазов и первичных фаз-включений [12], в том числе ее применимость к условиям фракционной кристаллизации материнских расплавов. Впервые экспериментально исследованы фазовые отношения при плавлении системы перидотит — карбонатит — алмаз и построена "диаграмма сингенезиса" алмаза и минеральных фаз перидотитового парагенезиса. На основе данных физико-химического эксперимента рассматривается проблема перидотит-эклогитового парагенетического перехода [8] в материнских карбо-

натно-силикатных расплавах. Выполненное впервые исследование фазовых отношений в системе перидотит₃₀карбонатит₇₀ — эклогит₃₅карбонатит₆₅ дает основание для построения диаграммы, раскрывающей физико-химические условия эволюции ультрабазит-базитовых материнских расплавов в режиме их фракционной кристаллизации. Это позволяет построить универсальную "диаграмму сингенезиса" алмаза и минеральных фаз перидотитового и эклогитового парагенезисов. Экспериментальные результаты приложены к характеристике физико-химической эволюции мантийных очагов алмазообразующих карбонатитовых магм, что было начато ранее [7, 9, 12].

Классификация включений и диаграмма материнской среды. Генетическая классификация сингенетических включений в алмазах [7] определяет физико-химические связи между первично включенными фазами и алмазом. В материнских средах, основой которых служат полностью смесимые карбонатно-силикатные (карбонатитовые) расплавы с растворенным углеродом, содержатся главные и второстепенные фазы и компоненты.

Главные фазы и компоненты создают саму возможность генезиса алмаза. Ими определяются химический состав и фазовое состояние материнских сред, их способность к образованию доминирующей массы алмазов и характеристических минералов перидотит-пироксенитового и эклогит-гроспидитового парагенезисов. К главным фазам и компонентам отнесены карбонаты K, Na, Ca, Mg, Fe, силикаты (оливин, орто-, клинопироксен), алюмосиликаты (гранат, жадеит), оксиды (кварц, коэсит, корунд, кианит) и углерод (алмаз, метастабильный графит, растворенные формы углерода). Возникновение материнских сред обеспечивается следующими физико-химическими эффектами: конгруэнтным плавлением карбонатов, полной жидкостной смесимостью карбонатно-силикатных расплавов и достаточно высокой растворимостью в них элементарного углерода. На этой равновесной по своей природе основе в определенных физических условиях возникают неравновесные лабильно пересыщенные расплавы-растворы углерода к алмазу как главный фактор нуклеации алмазной фазы. В этих же расплавах совместно с алмазами кристаллизуются парагенные силикатные, карбонатные и оксидные фазы-включения. Необходимо отме-

тить, что в физико-химическом эксперименте начаты исследования происхождения самих материнских сред в веществе верхней мантии [32, 33].

Второстепенные фазы и компоненты, содержание которых в материнских средах относительно невысоко, имеют ограниченное влияние на образование алмазов и фаз-включений. К ним принадлежат: 1 — парагенные с алмазом и растворимые в карбонатно-силикатных расплавах и характеристических фазах оксиды (FeFe₂O, FeCr₂O₄, FeTiO₃ и др.), силикаты (ZrSiO₄, NaCrSi₂O₆, Mg₃Cr₂Si₃O₁₂ и др.), соли (фосфат Ca, хлориды Na, K, Ca, карбонаты Ba, Sr), летучие (H₂O, CO₂, N₂, CH₄, H₂); 2 — ксеногенные — нерастворимые и несмесимые с карбонатно-силикатными расплавами, т. е. физико-химически инертные к главным и парагенным растворимым: сульфиды (FeS, (Fe, Ni)₉S₈, CuFeS₂, расплавы), металлы (Fe, Ni) и др.

На рис. 1 представлена обобщенная диаграмма состава материнских сред алмаза и фаз-включений. В ней учтено базовое значение многокомпонентной гетерогенной и химически изменчивой системы карбонатит — перидотит — эклогит — растворимые компоненты — нерастворимые компоненты — углерод [12]. Несущим элементом диаграммы состава служит главный тетраэдр с вершинами в виде светлых кружков. Эти вершины лежат на вспомогательных тетраэдрах (с черными кружками), которыми представлены как главные компоненты материнской среды — карбонатитовые, перидотитовые и эклогитовые, так и второстепенные растворимые. Главный тетраэдр — это диаграмма состава всех парагенных фаз и компонентов. Символ углерода как компонента, общего для всех вспомогательных тетраэдров, вынесен за пределы диаграммы для упрощения рисунка. Вспомогательный тетраэдр второстепенных нерастворимых компонентов отделен от главного символической границей полной жидкостной несмесимости (г. п. ж. н.) и представляет ксеногенные фазы и компоненты. Таким образом, в обобщенной диаграмме учтены классификационные признаки всех сингенетических включений, в том числе второстепенных растворимых и нерастворимых компонентов.

Точки состава материнской среды в проекции на граничный треугольник карбонатит — перидотит — эклогит находятся в об-

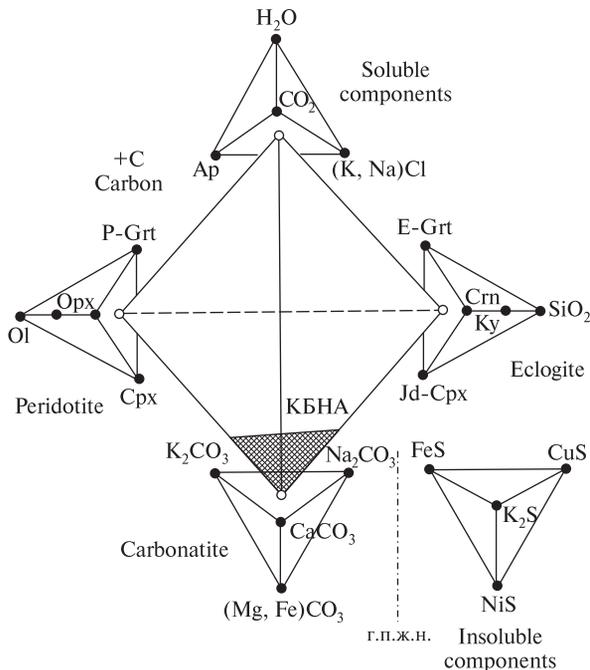


Рис. 1. Обобщенная диаграмма состава многокомпонентной материнской среды для алмаза и гетерогенного вещества сингенетических включений в *PT*-условиях верхней мантии Земли: *перидотит*: Cpx — клинопироксен, Ol — оливин, Opx — ортопироксен, P-Grt — гранат перидотитового парагенезиса; *эклогит*: Crn — корунд, E-Grt — гранат эклогитового парагенезиса, Jd-Cpx — омфацитовый богатый жадеитовым компонентом клинопироксен, Ky — кyanит; *растворимые компоненты*: Ap — апатит; КБНА — концентрационный барьер нуклеации алмаза; г. п. ж. н. — условная граница полной жидкостной несмешиваемости

Fig. 1. Generalized composition diagram for diamond and heterogeneous syngenetic inclusions under *PT*-conditions at the Earth's upper mantle: *peridotite*: Cpx — clinopyroxene, Ol — olivine, Opx — orthopyroxene, P-Grt — garnet of peridotite paragenesis; *eclogite*: Crn — corundum, E-Grt — garnet of eclogite paragenesis, Jd-Cpx — jadeite-rich clinopyroxene (omphacite), Ky — kyanite; *soluble components*: Ap — apatite; КБНА — concentration barrier of diamond nucleation; г. п. ж. н. — complete liquid immiscibility boundary

ласти состава, обогащенного карбонатитовой составляющей (обозначена штриховкой). Предельный по содержанию силикатной компоненты состав определен экспериментально [1, 10, 15] как КБНА. Он соответствует 30 мас. % перидотита для перидотит-карбонатитовых расплавов и 35 — эклогита для эклогит-карбонатитовых расплавов, т. е. состав материнских сред относится к концентрационному интервалу карбонатитов по существующим классификациям.

Изменчивость состава природной материнской среды алмазов и фаз-включений учтена на диаграмме тем, что каждая вершина главного тетраэдра не закреплена, а способна изменять положение на поверхности и в объеме "своего" вспомогательного тетраэдра. Это ведет к изменению соответствующего граничного состава, что корректирует состав материнской среды согласно последствиям ее плавления и кристаллизации. Естественно, в условиях верхней мантии адаптация природной материнской среды к граничному составу базовой системы происходит "автоматически". Учет изменчивости материнской среды — особенность обобщенной диаграммы ее состава. Это важно для планирования эксперимента по изучению закономерностей эволюции фазового состояния алмазообразующей системы в режиме фракционной кристаллизации. Фракционное удаление образующихся минералов из расплава ведет к непрерывному изменению общего состава системы. При этом изменяющийся состав системы и состав остаточных полных расплавов совпадают. В перитектической системе механизм фракционной кристаллизации способен радикально изменить состав расплавов. Наибольший интерес представляет непрерывный переход от ультрабазитовых к базитовым расплавам и, соответственно, от перидотитовых парагенезисов к эклогитовым. Напротив, равновесная кристаллизация сохраняет исходный состав постоянным от начала до конца кристаллизации (не выходя за границы диаграммы-симплекса состава данной системы, например, перидотитовой). Это делает парагенетический переход такого рода невозможным.

Прямое изучение фракционной кристаллизации в эксперименте при высоких значениях давления и температуры методически затруднено. Так, невозможно *in situ* удалить кристаллизующиеся фазы из образца. Однако результаты равновесного эксперимента могут быть приложены к интерпретации физико-химического поведения системы в условиях фракционной кристаллизации [36]. В этом плане большой интерес представляет проблема перидотит-эклогитового парагенетического перехода [8, 34] в материнских для алмазов карбонат-силикатных расплавах.

Методы физико-химического эксперимента. В физико-химическом эксперименте с *PT*-условиями верхней мантии исследованы фазо-

вые отношения в ходе плавления многокомпонентного гетерогенного вещества. В результате построены фазовые диаграммы в координатах температура — состав (при постоянном давлении). Такие диаграммы раскрывают закономерности плавления мантийных пород и эволюции мантийных магм. Методология физико-химического эксперимента охарактеризована в работах [12, 15]. При выполнении эксперимента комбинированная ячейка с нагревателем и исследуемым образцом сжимается в тороидном аппарате "наковальня с лункой". Ячейка с центральным отверстием диаметром 8 мм изготовлена из известняка Алгети, Грузия (*Georgia*). В отверстие вставлена втулка (внешний и внутренний диаметры 8 и 6 мм) из спрессованной смеси MgO : BN = 75 : 25 (мас. %). Внутри нее размещен графитовый нагреватель диаметром 6 и высотой 7,2 мм. Нагреватель защищен спрессованной втулкой от карбонатных расплавов, образующихся при плавлении известняка при температуре более 1400 °С и давлении 7 ГПа. Рабочая камера для исследуемого образца — это соосная полость в нагревателе диаметром и высотой по 2,0 мм. В экспериментальных режимах в образце возникает достаточно однородное распределение температуры, поскольку он попадает в центральную практически изотермическую зону высотой 2,5—3,0 мм ячейки и нагревателя. Спаи измерительных термо-

пар Pt₇₀Rh₃₀/Pt₉₄Rh₀₆ располагаются в центре исследуемого образца. При этом термоэлектроды диаметром 0,3 или 0,5 мм защищены трубчатой корундовой керамикой с внешним диаметром 1,5 мм. Статистическая погрешность температурных измерений составляет ±20 °С. После выдержки при заданных *PT*-параметрах осуществляется кратковременная закалка со скоростью около 300 °С/сек. Давление в образце при комнатной температуре определяется по реперным полиморфным превращениям в *Vi* (2,55, 2,70 и 7,70 ГПа) и *Va* (5,50 ГПа) [27]; статистическая погрешность ±0,1 ГПа. При высокой температуре отклонение давления от "комнатного" — в пределах погрешности.

Как стартовые материалы использованы синтетические гранатовый лерцолит и биминеральный эклогит (табл. 1), а также модельный многокомпонентный карбонатит (K₂CO₃)₂₅(MgCO₃)₅₀(CaCO₃)₂₅. В составе карбонатита учтены химические особенности включений в алмазах Ботсваны [13, 42]. Источником углерода служит особочистый графит МГОСЧ — термодинамически метастабильная, но кинетически устойчивая фаза в *PT*-условиях эксперимента, что позволяет имитировать им алмаз как граничный компонент (см. [12]).

Препараты для микрорентгеноспектрального анализа приготовлены *in situ*-полиров-

Таблица 1. Силикатные стартовые вещества в физико-химических экспериментах

Table 1. Silicate starting materials for the physicochemical experiments

| Оксид | Гранатовый лерцолит [33] | | | | | Биминеральный эклогит [3] | | |
|--------------------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------------|-------|-------|
| | Ol | Opx | Cpx | Grt | Per | Jd-Cpx | Grt | Ecl |
| SiO ₂ | 40,02 | 57,80 | 55,90 | 42,55 | 45,07 | 54,94 | 39,96 | 47,45 |
| Al ₂ O ₃ | — | 0,49 | 4,28 | 24,07 | 3,48 | 9,79 | 21,77 | 15,78 |
| MgO | 45,63 | 33,34 | 16,88 | 20,93 | 37,25 | 8,86 | 8,90 | 8,88 |
| FeO | 14,35 | 7,26 | 4,68 | 8,48 | 11,35 | 6,43 | 21,13 | 13,78 |
| CaO | — | 0,81 | 15,66 | 3,97 | 2,49 | 13,02 | 8,07 | 10,54 |
| Na ₂ O | — | 0,30 | 2,60 | — | 0,36 | 6,66 | 0,17 | 3,42 |
| K ₂ O | — | — | — | — | — | 0,30 | — | 0,15 |

Примечание. Символы минералов и пород: Cpx — клинопироксен, Ecl — биминеральный эклогит Jd-Cpx₅₀Grt₅₀, мас. %, Grt — гранат, Jd-Cpx — жадеитсодержащий клинопироксен (омфациит), Ol — оливин, Opx — ортопироксен, Per — модельный перидотит (гранатовый лерцолит Ol₆₀Opx₁₆Cpx₁₂Grt₁₂, мас. %). Содержание компонентов и фаз, мас. %. Сумма каждого состава приведена к 100 мас. %.

Note. Symbols of minerals and rocks: Cpx — clinopyroxene, Ecl — bimineral eclogite Jd-Cpx₅₀Grt₅₀, wt. %, Grt — garnet, Jd-Cpx — jadeite-bearing clinopyroxene (omphacite), Ol — olivine, Opx — orthopyroxene, Per — model peridotite (garnet lherzolite Ol₆₀Opx₁₆Cpx₁₂Grt₁₂, wt. %). All contents of components and phases are given in wt. %. Sums of all compositions are reduced to 100 wt. %.

Таблица 2. Условия и результаты экспериментов в системе перидотит — карбонатит — алмаз при давлении 7 ГПа (представительный состав экспериментальных фаз)

Table 2. Conditions and results of experiments in the system peridotite — carbonatite — diamond at 7 GPa (representative composition of the experimental phases)

| Номер опыта | Стартовый состав | Температура, T, °C | Выдержка, τ, мин | Фаза | Состав экспериментальных фаз | | | | | | | | Фазовая ассоциация |
|-------------|--|--------------------|------------------|-------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ | |
| 2045 | Per ₃₀ Carb ₇₀ | 1700 | 30 | L | 13,87 | 0,99 | 17,05 | 14,22 | 11,01 | 1,03 | 12,22 | 29,61 | L, Ol |
| | | | | Ol | 42,17 | — | 55,84 | 1,99 | — | — | — | | |
| 2044 | " | 1600 | 30 | L | 14,64 | 4,26 | 28,79 | 2,15 | 4,40 | 0,21 | 2,99 | 42,56 | L, Ol, Opx |
| | | | | Ol | 42,40 | — | 55,65 | 1,95 | — | — | — | | |
| | | | | Opx | 58,02 | 0,95 | 37,98 | 1,18 | 1,38 | 0,23 | 0,20 | — | |
| 2473 | " | 1550 | 30 | L | 5,27 | 3,35 | 12,84 | 1,39 | 39,29 | 0,26 | 2,99 | 34,41 | L, Ol, Opx, Grt |
| | | | | Ol | 43,07 | — | 54,32 | 2,61 | — | — | — | | |
| | | | | Opx | 57,19 | 1,40 | 28,30 | 0,78 | 12,01 | 0,21 | 0,20 | — | |
| | | | | Grt | 42,68 | 22,36 | 21,47 | 3,60 | 9,49 | 0,36 | — | — | |
| 2043 | " | 1500 | 40 | L | 13,14 | 1,95 | 7,78 | 10,47 | 12,91 | 0,97 | 9,86 | 45,92 | L, Ol, Opx, Grt, Cpx |
| | | | | Ol | 40,69 | — | 55,08 | 4,23 | — | — | — | | |
| | | | | Opx | 58,32 | 1,20 | 37,55 | 1,27 | 1,94 | 0,23 | — | — | |
| | | | | Grt | 43,75 | 21,79 | 20,73 | 10,87 | 2,57 | 0,30 | — | — | |
| | | | | Cpx | 55,04 | 1,85 | 22,16 | 0,52 | 19,77 | 0,15 | 0,51 | — | |
| 2630 | " | 1440 | 15 | L | 8,00 | 1,09 | 13,92 | 14,50 | 11,97 | 1,36 | 15,02 | 34,14 | L, Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Ol | 42,17 | — | 55,84 | 1,99 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 57,50 | 1,08 | 33,69 | 6,68 | 0,56 | 0,32 | 0,17 | — | |
| | | | | Grt | 43,82 | 21,33 | 21,08 | 9,82 | 3,54 | 0,41 | — | — | |
| | | | | Cpx | 54,41 | 2,61 | 16,91 | 0,91 | 23,67 | 1,05 | 0,44 | — | |
| | | | | Carb* | — | — | 46,15 | 2,27 | 2,98 | — | — | 48,60 | |
| 2629 | " | 1400 | 20 | L | 13,48 | 1,74 | 8,69 | 10,63 | 12,30 | 1,17 | 9,71 | 42,28 | L, Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, D |
| | | | | Ol | 40,65 | — | 49,31 | 10,04 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 57,28 | 1,10 | 33,05 | 7,46 | 0,52 | 0,59 | — | — | |
| | | | | Grt | 43,90 | 21,87 | 19,17 | 11,29 | 3,17 | 0,61 | — | — | |
| | | | | Cpx | 54,61 | 2,69 | 16,22 | 1,37 | 23,65 | 1,12 | 0,34 | — | |
| | | | | Ms | — | — | 47,89 | 13,08 | 1,99 | 0,29 | — | 36,75 | |
| | | | | Carb* | — | — | 17,03 | 20,54 | 26,27 | 2,37 | 4,23 | 47,56 | |
| 2628 | " | 1300 | 30 | Ol | 41,89 | — | 46,23 | 11,88 | — | — | — | — | Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, D |
| | | | | Opx | 57,83 | 0,46 | 31,81 | 8,80 | 0,82 | 0,10 | 0,18 | — | |
| | | | | Grt | 43,25 | 18,81 | 15,96 | 14,51 | 7,12 | 0,35 | — | — | |
| | | | | Cpx | 52,62 | 2,16 | 18,48 | 2,23 | 21,74 | 2,14 | 0,63 | — | |
| | | | | Ms | 1,17 | 0,30 | 28,23 | 19,77 | 16,08 | 0,50 | — | — | |
| | | | | Carb* | 2,61 | 0,41 | 29,85 | 26,50 | 1,42 | 2,46 | 3,93 | 32,82 | |
| 2598 | Per ₁₈ Carb ₄₂ C ₄₀ | 1800 | 15 | L | 13,05 | 1,84 | 17,79 | 12,02 | 14,08 | 1,89 | 9,68 | 29,65 | L, D |
| 2597 | " | 1750 | 15 | L | 12,57 | 2,97 | 18,64 | 12,76 | 13,46 | 1,74 | 8,67 | 29,19 | L, D |
| 2596 | " | 1700 | 20 | L | 12,99 | 2,34 | 18,00 | 13,44 | 12,88 | 1,55 | 10,09 | 28,71 | L, Ol, D |
| | | | | Ol | 42,17 | — | — | 1,99 | — | — | — | — | |
| 2595 | " | 1600 | 20 | L | 13,46 | 3,62 | 18,97 | 12,22 | 14,32 | 1,51 | 5,87 | 30,09 | L, Ol, D |
| | | | | Ol | 42,40 | — | — | 1,95 | — | — | — | — | |
| 2594 | " | 1540 | 20 | L | 8,27 | 2,85 | 10,61 | 16,27 | 19,19 | 1,27 | 6,99 | 34,55 | L, Ol, Opx, D |
| | | | | Ol | 42,66 | — | — | 4,51 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 57,19 | 1,40 | 28,30 | 0,78 | 12,01 | 0,21 | 0,20 | — | |
| 2593 | " | 1480 | 20 | L | 12,26 | 1,79 | 7,93 | 12,31 | 12,77 | 1,04 | 9,99 | 41,91 | L, Ol, Opx, Grt, D |
| | | | | Ol | 41,24 | — | 53,37 | 5,39 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 57,14 | 1,29 | 35,84 | 2,71 | 2,59 | 0,43 | — | — | |
| | | | | Grt | 42,58 | 21,04 | 21,89 | 10,97 | 3,17 | 0,35 | — | — | |

Окончание табл. 2
End of Table 2

| Номер опыта | Стартовый состав | Температура, T, °C | Выдержка, т, мин | Фаза | Состав экспериментальных фаз | | | | | | | | Фазовая ассоциация |
|-------------|--|--------------------|------------------|-------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------------------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ | |
| 2620 | Per ₁₈ Carb ₄₂ C ₄₀ | 1440 | 30 | L | 11,46 | 1,38 | 8,17 | 19,97 | 13,11 | 1,87 | 10,06 | 33,98 | L, Ol, Opx, Grt, Cpx, D |
| | | | | Ol | 40,83 | — | 52,86 | 6,31 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 56,38 | 1,17 | 34,41 | 3,77 | 3,34 | 0,93 | — | — | |
| | | | | Grt | 41,70 | 20,38 | 21,57 | 11,53 | 4,50 | 0,32 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,15 | 2,20 | 20,33 | 1,56 | 20,93 | 1,23 | 0,60 | — | |
| 2619 | " | 1400 | 30 | L | 13,51 | 1,32 | 7,60 | 10,56 | 13,02 | 0,99 | 10,51 | 42,79 | L, Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, D |
| | | | | Ol | 41,14 | — | 48,53 | 10,33 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 55,14 | 0,74 | 29,56 | 7,50 | 4,62 | 1,36 | 1,08 | — | |
| | | | | Grt | 41,52 | 20,05 | 16,14 | 14,26 | 7,69 | 0,34 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,04 | 2,24 | 18,08 | 2,13 | 21,67 | 2,48 | 0,36 | — | |
| | | | | Ms | — | — | 39,17 | 8,37 | 4,09 | — | — | 48,37 | |
| 2618 | " | 1350 | 40 | Carb* | 2,63 | — | 22,45 | 19,47 | 24,72 | 1,73 | 3,89 | 25,11 | Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, D |
| | | | | Ol | 40,54 | — | 50,02 | 9,44 | — | — | — | — | |
| | | | | Opx | 55,20 | 0,64 | 29,60 | 7,52 | 4,60 | 1,34 | 1,10 | — | |
| | | | | Grt | 42,17 | 19,41 | 16,23 | 14,65 | 7,24 | 0,30 | — | — | |
| | | | | Cpx | 52,40 | 2,12 | 18,68 | 2,32 | 21,94 | 2,11 | 0,43 | — | |
| | | | | Ms | — | — | 38,83 | 7,74 | 3,89 | — | — | 49,54 | |
| Carb* | 3,03 | — | 17,03 | 20,54 | 26,27 | 2,37 | 4,23 | 26,53 | | | | | |

Примечание (тут и в табл. 3). Символы расплавов, минералов и пород: L — полностью смесимый карбонатно-силикатный расплав, Carb* — обобщенная карбонатная фаза (в обозначении фазовой ассоциации включает также магнезит), Cpx — клинопироксен, Ecl — биминеральный эклогит Jd-Cpx₅₀Grt₅₀, мас. %, Grt — гранат, Jd-Cpx — жадеитсодержащий клинопироксен (омфациит), Ms — магнезит, Ol — оливин, Opx — ортопироксен, Per — модельный перидотит (гранатовый лерцолит Ol₆₀Opx₁₆Cpx₁₂Grt₁₂, мас. %). CO₂* — расчетное значение. Содержание компонентов и фаз, мас. %. Сумма каждого состава приведена к 100 мас. %.

Note (here and in Table 3). Symbols of melts, minerals and rocks: L — completely miscible carbonate-silicate melt, Carb* — generalized carbonate phase (magnesite is also included in designation of phase assemblage), Cpx — clinopyroxene, Ecl — bimineraleclogite Jd-Cpx₅₀Grt₅₀, wt. %, Grt — garnet, Jd-Cpx — jadeite-bearing clinopyroxene (omphacite), Ms — magnesite, Ol — olivine, Opx — orthopyroxene, Per — model peridotite (garnet lherzolite Ol₆₀Opx₁₆Cpx₁₂Grt₁₂, wt. %). CO₂* — calculated value. All contents of components and phases are given in wt. %. Sums of all compositions are reduced to 100 wt. %.

кой [12] путем нанесения на исследуемое вещество зеркальноплоских отпечатков граниами алмазных монокристаллов размером 0,5—0,6 мм, помещаемых внутри образца в каждом опыте. Анализы выполнены на электронном микроскопе CamScanMV2300 (VEGATS 5130MM) с энергодисперсионным микроанализатором INCA-Energy-250 в Институте экспериментальной минералогии РАН.

Система перидотит — карбонатит — алмаз при давлении 7 ГПа: диаграмма сингенезиса. Считается, что сингенетические включения и захватывающие их минералы (в данном случае — алмаз) образованы одновременно и в результате одних и тех же физико-химических процессов. Одновременность роста фаз-включений и минералов-хозяев, вероятно, может быть оценена по внешним морфологическим признакам и некоторым особенностям

состава фаз [22]. Однако такого рода критерии неоднозначны в отношении физико-химических связей включенных и включающих минералов. Например, октаэдрические формы сульфидных включений в алмазах (т. е. отрицательные формы включающих алмазов) были восприняты как свидетельства их сингенетичности в смысле физико-химической общности происхождения с алмазами [2]. Между тем, по данным физико-химического эксперимента [12, 43], включения сульфидных минералов и расплавов в алмазах следует отнести к ксеногенным.

В настоящей работе под термином сингенетичность подразумеваем только одновременность захвата фаз-включений и роста кристаллов алмаза. Этим подчеркивается лишь первичность захвата включения независимо от его происхождения. В таком случае к син-

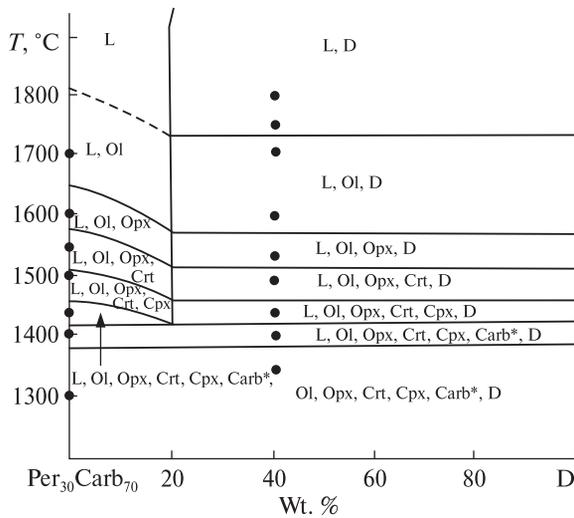


Рис. 2. Фазовая диаграмма сингенезиса алмаза и минеральных фаз перидотитового парагенезиса в политермическом сечении перидотит₃₀карбонатит₇₀ (Per₃₀ × Carb₇₀) — алмаз (D) при давлении 7,0 ГПа (усл. обозначения см. в табл. 2)

Fig. 2. Syngenesis diagram for diamond and mineral phases of peridotite paragenesis over the polythermal section peridotite₃₀carbonatite₇₀ (Per₃₀Carb₇₀) — diamond (D) at 7.0 GPa (symbols see in Table 2)

генетическим фазам могут принадлежать как парагенные, образованные в единых физико-химических процессах с алмазами, так и ксеногенные, проникшие в материнские расплавы как продукты независимых физико-химических процессов. Это учитывается также в генетической классификации сингенетических включений в алмазах [7] и определяет смысл терминов "критерий сингенезиса" и "диаграмма сингенезиса". Соответствие изменчивых природных материнских сред критерию сингенезиса раскрывают диаграммы сингенезиса. Способность материнских сред к сингенезису алмаза и определенной совокупности фаз-включений заложена в граничных условиях алмазообразующей системы. Эти граничные условия в физико-химическом эксперименте могут быть установлены с определенной степенью приближения к реальным (по минералогическим данным). Согласование состава, обоснованного минералогически, с граничным составом систем, исследуемых в физико-химическом эксперименте, ведет к достоверному решению проблемы генезиса алмаза.

Система перидотит — карбонатит — алмаз — это частное сечение обобщенной диаграммы

состава материнской среды (рис. 1). В условиях образования алмаза карбонатные и силикатные расплавы полностью смесимы, т. е. образуют одну карбонатно-силикатную жидкую фазу. В табл. 2 указаны условия и результаты экспериментальных исследований системы перидотит — карбонатит — алмаз при давлении 7 ГПа. Ее фазовая диаграмма плавления в политермическом сечении перидотит₄₀карбонатит₆₀ (Per₄₀Carb₆₀) — алмаз (D) представлена на рис. 2 и является "диаграммой сингенезиса" алмазов и исключительно парагенных силикатных и карбонатных фаз-включений. Вместе с тем, ее несложно превратить в общую диаграмму сингенезиса алмаза с пара- и ксеногенными (сульфидными) фазами, воспользовавшись фазовой диаграммой системы сульфид (Sul) — алмаз (D), исследованной ранее [12]. В физико-химическом эксперименте установлено [43], что гомогенные карбонатно-силикатные расплавы полностью несмесимы с сульфидными при *PT*-параметрах стабильности алмаза. При этом сульфидные твердые фазы не растворимы в карбонатно-силикатных расплавах, а силикатные и карбонатные фазы в сульфидных расплавах. Это позволило раздельно исследовать эклогит-карбонатитовую Ecl₄₀Carb₆₀ — D и сульфидную Sul — D системы (где Sul — это смесь пирротина (Po), пентландита (Pn) и халькопирита (Csp) с представительным составом Po₄₀Pn₄₀Csp₄₀, мас. %). Затем полученные фазовые диаграммы были представлены в виде общей диаграммы сингенезиса эклогит-карбонатит-сульфид-алмазной системы (Ecl₄₀Carb₆₀)₅₀Sul₅₀ — D [12]. Подобным образом может быть получена общая диаграмма сингенезиса перидотит-карбонатит-сульфид-алмазной системы (Per₄₀Carb₆₀)₅₀ × Sul₅₀ — D с пара- и ксеногенными фазами. Поскольку физико-химическая роль сульфидов в генезисе алмаза раскрыта ранее [11, 12], в настоящей работе этот вопрос не рассматривается.

При полном или частичном плавлении перидотит-карбонатитового граничного состава формируются полностью смесимые карбонатно-силикатные расплавы (L). Закалка превращает их в гетерогенный твердый материал с закалочными карбонатными и силикатными фазами (рис. 3, а). Ликвидусная кривая состоит из двух участков L, Ol и L, Ol, D (алмаз). Рост содержания углерода в системе и, соответственно, растворенного углерода в

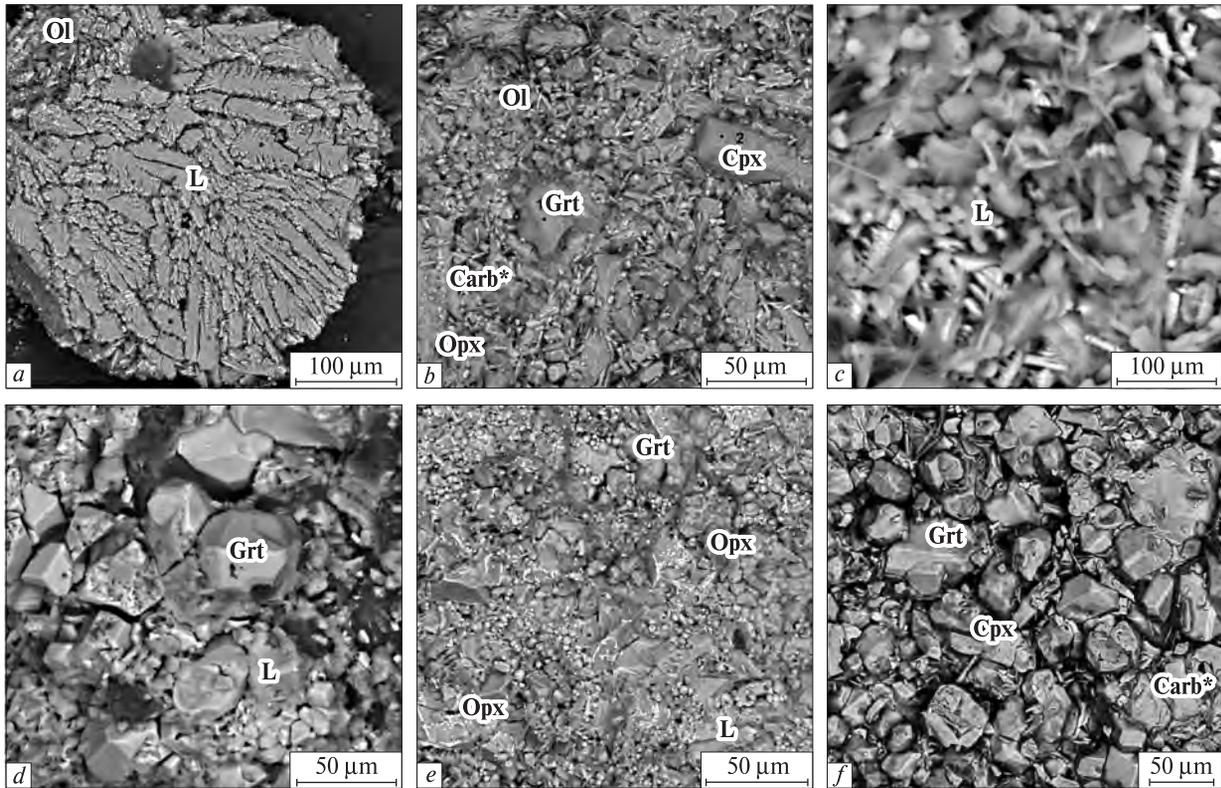


Рис. 3. СЭМ-снимки экспериментальных образцов систем $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70} - \text{D}$ и $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70} - \text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$: *a* — полностью смешиваемый перидотит-карбонатитовый расплав после закалки превращается в тесно сросшиеся дендриты силикатных и карбонатных фаз (состав расплава определяется по микрозондовому анализу на площадке) — участок ассоциации L, Ol, обр. 2045, состав $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$, 7 ГПа, 1700 °С; *b* — субсолидусная ассоциация Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, обр. 2628, состав $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$, 7 ГПа, 1300 °С; *c* — полностью смешиваемый эклогит-карбонатитовый расплав (поле L) после закалки — обр. 2486, состав $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$, 7 ГПа, 1720 °С; *d* — ликвидусный гранат в эклогит-карбонатитовом расплаве после закалки — ассоциация L, Grt, обр. 2503, состав $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$, 7 ГПа, 1680 °С; *e* — ассоциация L, Opx, Grt, обр. 2635, состав $\text{Per}_{16,5}\text{Ecl}_{16,5}\text{Carb}_{67}$, 7 ГПа, 1500 °С; *f* — ассоциация Grt, Cpx, Carb*, обр. 2428, состав $\text{Per}_6\text{Ecl}_{28}\text{Carb}_{66}$, 7 ГПа, 1300 °С

Fig. 3. SEM images of experimental samples for systems $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70} - \text{D}$ and $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70} - \text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$: *a* — completely miscible peridotite-carbonatite melt after quenching is turned into closely intergrown dendrites of silicate and carbonate phases (the melt composition is determined by microprobe analysis over the sample area) — a section of the assemblage L, Ol, sample 2045, composition $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$, 7 GPa, 1700 °C; *b* — subsolidus assemblage Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb*, sample 2628, composition $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$, 7 GPa, 1300 °C; *c* — completely miscible eclogite-carbonatite melt (field L) after quenching — sample 2486, composition $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$, 7 GPa, 1720 °C; *d* — liquidus garnet in eclogite-carbonatite melt after quenching — assemblage L, Grt, sample 2503, composition $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$, 7 GPa, 1680 °C; *e* — assemblage L, Opx, Grt, sample 2635, composition $\text{Per}_{16,5}\text{Ecl}_{16,5}\text{Carb}_{67}$, 7 GPa, 1500 °C; *f* — assemblage Grt, Cpx, Carb*, sample 2428, composition $\text{Per}_6\text{Ecl}_{28}\text{Carb}_{66}$, 7 GPa, 1300 °C

карбонатно-силикатном расплаве L понижает температуру ликвидусной кривой на участке L, Ol. Поскольку растворы не насыщены углеродом по отношению к алмазу, расположенные в контакте с ними монокристаллические алмазы-"индикаторы" растворяются. С другой стороны, на участке L, Ol, D на гранях алмазов-"индикаторов" появляются слои роста или приросшие монокристаллики как признак пересыщенных "алмазом" растворов [12]. Это позволяет определить положение кривой растворимости алмаза, т. е. состояние насы-

щения растворов углеродом в полностью смешиваемых карбонатно-силикатных расплавах (20—22 мас. %). В высокотемпературной области ее продолжением является участок ликвидусной кривой L, D. Таким образом, равновесной кривой растворимости алмаза создаются насыщенные углеродом карбонат-силикатные расплавы. Этим определяется сама возможность генезиса алмаза. С понижением температуры насыщенные углеродом расплавы превращаются в неравновесные лабильно пересыщенные расплавы-растворы углерода,

Таблица 3. Условия и результаты экспериментов в системе перидотит — эклогит — карбонатит при давлении 7 ГПа (представительный состав экспериментальных фаз)

Table 3. Conditions and results of experiments in the system peridotite — eclogite — carbonatite at 7 GPa (representative composition of the experimental phases)

| Номер опыта | Стартовый состав | Температура, T, °C | Выдержка, τ, мин | Фаза | Состав экспериментальных фаз | | | | | | | | Фазовая ассоциация |
|-------------|--|--------------------|------------------|-------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------|--------------------------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ * | |
| 2517 | Per _{19,5} Ecl _{12,25} Carb _{68,25} | 1700 | 10 | L | 18,03 | 3,14 | 9,87 | 13,00 | 13,31 | 2,04 | 9,93 | 30,68 | L |
| 2516 | " | 1650 | 10 | L | 17,90 | 3,37 | 9,11 | 12,35 | 13,28 | 1,70 | 11,03 | 31,26 | L, Ol |
| | | | | Ol | 41,43 | — | 45,69 | 12,88 | — | — | — | | |
| 2515 | " | 1600 | 15 | L | 17,49 | 3,29 | 9,21 | 12,83 | 13,02 | 1,84 | 10,65 | 31,67 | L, Ol, Opx |
| | | | | Ol | 40,95 | — | 44,96 | 14,09 | — | — | — | | |
| | | | | Opx | 58,13 | 1,16 | 33,25 | 3,43 | 3,23 | 0,80 | — | — | |
| 2581 | " | 1450 | 20 | L | 17,82 | 3,42 | 9,39 | 12,53 | 13,19 | 1,95 | — | — | L, Ol, Opx, Grt, Cpx |
| | | | | Ol | 39,30 | 0,05 | 44,58 | 15,93 | 0,14 | — | — | | |
| | | | | Opx | 56,42 | 1,14 | 35,82 | 2,14 | 3,86 | 0,62 | — | — | |
| | | | | Gr | 42,97 | 22,11 | 21,54 | 3,25 | 9,84 | 0,29 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,94 | 2,07 | 18,92 | 1,13 | 22,78 | 0,87 | 0,29 | — | |
| 2582 | " | 1400 | 20 | Ol | 41,29 | — | 45,28 | 13,43 | — | — | — | — | Ol, Opx, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Opx | 58,03 | 1,16 | 34,76 | 3,89 | 1,91 | 0,25 | — | — | |
| | | | | Grt | 40,95 | 20,88 | 20,55 | 13,18 | 4,27 | 0,17 | — | — | |
| | | | | Cpx | 55,73 | 1,19 | 17,94 | 2,05 | 21,62 | 1,09 | 0,34 | — | |
| | | | | Carb* | 10,52 | 0,82 | 46,76 | 12,56 | 5,98 | 3,30 | 25,48 | 37,81 | |
| 2477 | Per _{16,5} Ecl _{16,5} Carb ₆₇ | 1650 | 30 | L | 17,08 | 3,45 | 8,08 | 10,13 | 15,16 | 1,61 | 7,92 | 36,57 | L |
| 2476 | " | 1600 | 20 | L | 15,87 | 3,19 | 8,25 | 12,23 | 11,67 | 1,88 | 9,31 | 39,20 | L, Opx |
| | | | | Opx | 58,40 | 0,83 | 33,60 | 6,60 | 0,56 | — | — | — | |
| 2475 | " | 1550 | 30 | L | 13,46 | 3,60 | 10,04 | 8,88 | 13,20 | 1,36 | 11,90 | 37,56 | L, Opx |
| | | | | Opx | 56,08 | 0,94 | 38,03 | 1,15 | 3,41 | 0,21 | 0,18 | — | |
| 2635 | " | 1500 | 15 | L | 5,76 | 0,62 | 20,35 | 14,20 | 20,86 | 0,32 | 4,02 | 43,58 | L, Opx, Grt |
| | | | | Opx | 57,28 | 1,12 | 29,51 | 9,70 | 1,73 | 0,48 | 0,18 | — | |
| | | | | Grt | 42,82 | 21,77 | 17,94 | 12,33 | 4,55 | 0,59 | — | — | |
| 2554 | " | 1450 | 30 | L | 10,52 | 0,82 | 9,82 | 12,56 | 5,98 | 3,30 | 25,48 | — | L, Opx, Grt, Cpx |
| | | | | Opx | 57,09 | 1,18 | 34,77 | 3,89 | 2,84 | 0,23 | — | — | |
| | | | | Grt | 41,22 | 22,27 | 20,01 | 11,17 | 5,14 | 0,14 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,61 | 0,90 | 17,93 | 9,11 | 16,89 | 0,16 | — | — | |
| 2474 | " | 1400 | 40 | L | 8,18 | 1,51 | 4,29 | 7,98 | 14,97 | 0,35 | 8,68 | 54,04 | L, Opx, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Opx | 56,18 | 0,85 | 35,64 | 4,26 | 3,07 | — | — | — | |
| | | | | Grt | 42,02 | 22,33 | 18,14 | 12,15 | 5,06 | 0,30 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,61 | 2,44 | 16,33 | 11,85 | 14,93 | 0,84 | — | — | |
| | | | | Ms | 7,26 | — | 36,38 | 7,37 | 2,31 | 0,31 | — | 53,63 | |
| | | | | Carb* | 2,78 | 1,96 | 7,01 | 6,14 | 7,74 | 4,86 | 20,90 | 51,39 | |
| | | | | — | — | — | — | — | — | — | — | — | |
| 2553 | Per _{16,5} Ecl _{16,5} Carb ₆₇ | 1350 | 60 | Opx | 56,03 | 1,30 | 34,97 | 4,43 | 3,25 | — | — | — | Opx, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Grt | 41,76 | 21,19 | 17,81 | 14,30 | 4,73 | 0,21 | — | — | |
| | | | | Cpx | 52,77 | 1,36 | 14,75 | 12,43 | 17,67 | 0,58 | — | — | |
| | | | | Ms | — | — | 36,14 | 8,17 | 2,14 | — | — | 53,55 | |
| | | | | Carb* | 12,44 | 2,04 | 7,25 | 6,17 | 8,07 | 5,12 | 26,01 | 36,80 | |
| 2634 | " | 1300 | 30 | Opx | 57,24 | 1,51 | 33,37 | 4,23 | 3,44 | 0,21 | — | — | Opx, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Grt | 42,48 | 20,25 | 16,23 | 15,60 | 5,00 | 0,42 | — | — | |
| | | | | Cpx | 54,30 | 1,70 | 16,88 | 7,43 | 17,76 | 1,30 | 0,64 | — | |
| | | | | Ms | — | — | 36,50 | 7,26 | 3,49 | — | — | 52,75 | |
| | | | | Carb* | 12,28 | 2,07 | 6,14 | 7,32 | 10,47 | 5,32 | 23,59 | 37,63 | |
| 2623 | Per _{10,5} Ecl _{22,75} Carb _{66,75} | 1450 | 30 | L | 11,38 | 1,16 | 4,15 | 15,15 | 9,66 | 1,40 | 25,07 | 33,19 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 42,01 | 17,71 | 10,40 | 21,18 | 8,37 | 0,33 | — | — | |
| | | | | Cpx | 51,96 | 4,72 | 14,19 | 5,22 | 20,88 | 2,03 | — | — | |

| Номер опыта | Стартовый состав | Температура, T, °C | Выдержка, τ, мин | Фаза | Состав экспериментальных фаз | | | | | | | | Фазовая ассоциация |
|-------------|---|--------------------|------------------|-------|------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| | | | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | FeO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | CO ₂ * | |
| 2552 | " | 1400 | 40 | L | 10,87 | 1,67 | 3,83 | 14,69 | 9,19 | 2,16 | 24,88 | 32,71 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 41,90 | 18,11 | 11,03 | 20,99 | 7,60 | 0,37 | — | — | |
| | | | | Cpx | 52,13 | 5,16 | 15,04 | 5,05 | 21,07 | 2,21 | — | — | |
| 2622 | " | 1300 | 20 | Grt | 41,94 | 18,75 | 9,96 | 21,15 | 7,86 | 0,34 | — | — | Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Cpx | 52,93 | 5,68 | 14,37 | 4,64 | 20,24 | 2,14 | — | — | |
| | | | | Ms | — | — | 38,01 | 9,16 | 2,27 | — | — | 49,86 | |
| | | | | Carb* | 3,21 | 0,60 | 4,56 | 8,11 | 9,76 | 3,08 | 15,04 | 55,64 | |
| 2485 | Per ₆ Ecl ₂₈ Carb ₆₆ | 1600 | 20 | L | 10,87 | 0,99 | 3,48 | 14,80 | 10,75 | 0,33 | 27,81 | 30,88 | L, Grt |
| | | | | Grt | 41,58 | 16,55 | 9,32 | 24,78 | 8,40 | 0,31 | — | — | |
| 2431 | " | 1500 | 30 | L | 13,37 | 1,51 | 5,26 | 13,94 | 9,16 | 0,42 | 22,70 | 33,66 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 41,06 | 17,13 | 9,08 | 24,02 | 8,33 | 0,38 | — | — | |
| | | | | Cpx | 54,51 | 21,97 | 7,31 | 10,60 | 4,59 | 1,02 | — | — | |
| 2432 | " | 1400 | 20 | L | — | — | 4,00 | 7,32 | 0,33 | 6,77 | 39,08 | 42,50 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 40,82 | 16,97 | 9,05 | 24,41 | 8,38 | 0,37 | — | — | |
| | | | | Cpx | 53,73 | 5,91 | 14,62 | 3,57 | 19,62 | 2,07 | — | — | |
| 2533 | " | 1350 | 30 | L | 14,52 | 1,14 | 8,06 | 12,54 | 12,66 | 4,21 | 16,43 | 30,44 | L, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Grt | 41,31 | 18,18 | 9,55 | 23,12 | 7,44 | 0,40 | — | — | |
| | | | | Cpx | 51,45 | 5,60 | 14,53 | 5,18 | 21,70 | 1,54 | — | — | |
| | | | | Ms | — | — | 39,10 | 7,61 | 2,81 | — | — | 50,48 | |
| 2428 | " | 1300 | 15 | Grt | 41,32 | 17,87 | 8,99 | 24,47 | 7,98 | 0,38 | — | — | Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Cpx | 51,34 | 5,81 | 14,43 | 5,38 | 21,40 | 1,64 | — | — | |
| | | | | Ms | — | — | 38,40 | 8,71 | 2,56 | — | — | 50,23 | |
| | | | | Carb* | 4,24 | 0,58 | 4,05 | 7,52 | 9,36 | 2,35 | 14,71 | 57,19 | |
| 2486 | Ecl ₃₅ Carb ₆₅ | 1720 | 30 | L | 6,91 | 2,37 | 14,22 | 18,65 | 28,13 | 0,40 | 6,04 | 30,19 | L |
| 2503 | " | 1680 | 20 | L | 0,57 | 0,37 | 12,76 | 24,33 | 27,20 | 0,97 | 5,20 | 29,80 | L, Grt |
| | | | | Grt | 43,45 | 18,53 | 9,33 | 22,17 | 6,07 | 0,45 | — | — | |
| 2556 | " | 1650 | | L | 1,78 | 1,04 | 11,64 | 21,87 | 26,00 | 0,54 | 7,39 | 29,74 | L, Grt |
| | | | | Grt | 42,43 | 19,55 | 9,87 | 21,13 | 6,54 | 0,48 | — | — | |
| 2493 | " | 1600 | 30 | L | 12,52 | 0,43 | 8,85 | 11,24 | 15,82 | 1,98 | 18,03 | 30,93 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 40,82 | 16,47 | 9,05 | 24,41 | 8,38 | 0,37 | — | — | |
| | | | | Cpx | 56,33 | 2,74 | 18,53 | 3,63 | 16,83 | 1,88 | — | — | |
| 2501 | " | 1500 | 30 | L | 15,01 | 3,08 | 5,16 | 13,61 | 10,44 | — | 18,06 | 34,64 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 42,55 | 18,60 | 8,79 | 22,83 | 6,85 | 0,38 | — | — | |
| | | | | Cpx | 55,86 | 7,26 | 10,67 | 5,71 | 15,44 | 4,96 | — | — | |
| 2518 | " | 1400 | 20 | L | 13,48 | 1,20 | 7,83 | 12,76 | 13,05 | 2,58 | 17,53 | 31,57 | L, Grt, Cpx |
| | | | | Grt | 35,49 | 13,45 | 8,15 | 28,94 | 13,59 | 0,38 | — | — | |
| | | | | Cpx | 47,34 | 1,76 | 11,14 | 21,29 | 16,83 | 1,64 | — | — | |
| 2502 | " | 1350 | 50 | L | 12,42 | 0,90 | 8,93 | 11,26 | 14,35 | 2,28 | 19,03 | 30,93 | L, Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Grt | 42,76 | 19,08 | 10,02 | 21,02 | 6,81 | 0,31 | — | — | |
| | | | | Cpx | 55,23 | 8,20 | 9,31 | 6,12 | 15,79 | 4,73 | 0,62 | — | |
| | | | | Ms | 1,02 | 0,30 | 37,03 | 12,50 | 3,59 | 0,14 | — | 45,42 | |
| 2484 | " | 1300 | 25 | Grt | 39,85 | 20,16 | 5,41 | 22,08 | 12,09 | 0,41 | — | 34,64 | Grt, Cpx, Carb* |
| | | | | Cpx | 55,29 | 8,17 | 9,81 | 9,81 | 15,76 | 4,83 | 0,52 | — | |
| | | | | Ms | 0,49 | 0,09 | 17,89 | 17,89 | 7,01 | 0,18 | 0,65 | 49,83 | |
| | | | | Carb* | 9,33 | 0,72 | 7,35 | 7,35 | 14,11 | 1,12 | 18,15 | 37,14 | |

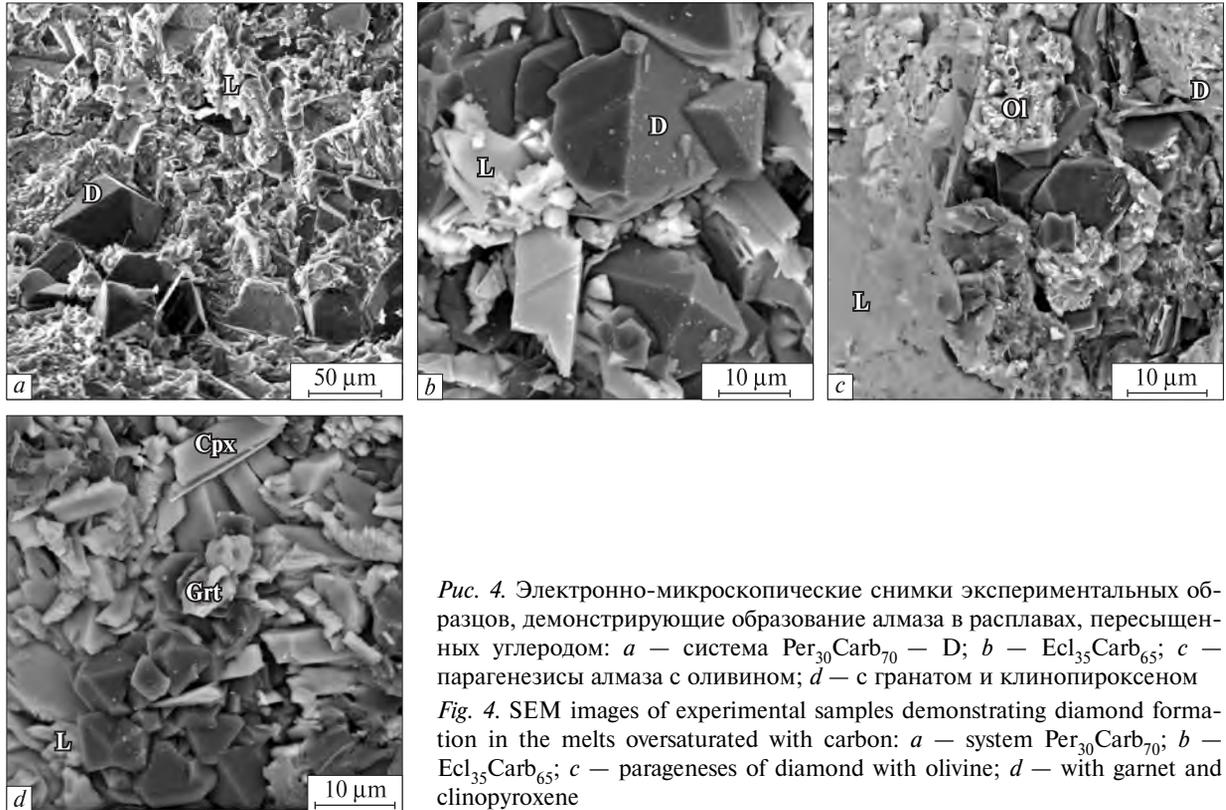


Рис. 4. Электронно-микроскопические снимки экспериментальных образцов, демонстрирующие образование алмаза в расплавах, пересыщенных углеродом: *a* — система $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$ — D; *b* — $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$; *c* — парагенезисы алмаза с оливином; *d* — с гранатом и клинопироксеном

Fig. 4. SEM images of experimental samples demonstrating diamond formation in the melts oversaturated with carbon: *a* — system $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$; *b* — $\text{Ecl}_{35}\text{Carb}_{65}$; *c* — parageneses of diamond with olivine; *d* — with garnet and clinopyroxene

что обеспечивает его нуклеацию и массовую кристаллизацию алмазной фазы. Кривая растворимости алмаза пересекает все фазовые поля системы перидотит — карбонатит — алмаз. Она служит естественной границей между областями ненасыщенных "алмазом" карбонатно-силикатных расплавов (образование алмаза невозможно) и насыщенных, создающих пересыщение при понижении температуры (результат которого — кристаллизация алмазной фазы).

Диаграмма сингенезиса перидотит-карбонатит-алмазной системы (рис. 2) дает представление о последовательности формирования парагенных силикатных и карбонатных фаз с понижением температуры в областях ненасыщенных и пересыщенных углеродом карбонатно-силикатных расплавов, начиная от ликвидусных оливина и алмаза. Последовательно в фазовых ассоциациях появляются Орх, Grt, Срх и Carb*, совместно с оливином создающие субсолидусную ассоциацию (на рис. 3, *b* дан пример для граничного состава $\text{Per}_{30}\text{Carb}_{70}$). Carb* — это объединяющий символ для всех твердых карбонатных фаз, который использован также в [12]. Так, карбонатный минерал магнезит (Ms) достаточно прос-

то идентифицируется и представлен в табл. 2 и 3. Вместе с тем, на фазовой диаграмме он "поглощен" символом Carb*, что упрощает геометрию диаграммы, поскольку уменьшает число фазовых полей с карбонатами при постоянстве силикатной ассоциации. При этом не искажаются главные особенности фазовых отношений применительно к рассматриваемой проблеме генезиса алмаза. Солидусная ассоциация L, Ol, Орх, Grt, Срх, Carb*, D в данном случае представлена узким фазовым полем. Оно создается "дивариантной точкой" (иногда употребляемый термин), т. е. коротким отрезком дивариантной кривой, что согласуется с правилом фаз Райнза—Палатника для многокомпонентных систем [19, 21]. Удобно мысленно сжать это поле в псевдолинию с "псевдононвариантной точкой". Это облегчает восприятие, поскольку создает аналогию с неинвариантными точками, которые соответствуют правилу фаз Гиббса в диаграммах бинарных систем. В поле L, Ol, Орх, Grt, Срх, Carb* (с ненасыщенными углеродом карбонатно-силикатными расплавами) фигуративная точка состава расплава при понижении температуры перемещается вдоль верхней фазовой границы и выходит к псевдононва-

риантной точке L, Ol, Орх, Grt, Срх, Carb*, D. В результате ассоциации солидуса (L, Ol, Орх, Grt, Срх, Carb*, D) и субсолидуса (Ol, Орх, Grt, Срх, Carb*, D) становятся одинаковыми для полей с ненасыщенными и насыщенными углеродом расплавами. Необходимо отметить, что положение кривой растворимости определено по эффектам растворения и роста монокристаллов алмаза в полностью смешимых перидотит-карбонатитовых расплавах. "Диаграмма сингенезиса" эклогит-карбонатит-алмазной системы исследована ранее [12] и воспроизводится на рис. 4. В ней работают те же физико-химические факторы, что и в перидотит-карбонатит-алмазной системе. На рис. 5, a, b приведены примеры кристаллизации алмаза в расплавах перидотит-карбонатит-углеродной системы, в том числе в парагенезисе с оливином (рис. 5, b). На рис. 5, c, d — примеры для расплавов эклогит-карбонатит-углеродной системы, включая парагенезис с гранатом и клинопироксеном (рис. 5, d).

На диаграммах сингенезиса перидотит — карбонатит — алмаз и эклогит — карбонатит — алмаз раскрываются физико-химические механизмы и *PT*-условия образования природного алмаза, формирования парагенных силикатных и карбонатных минералов. В этих же условиях происходит захват растущими алмазами парагенных фаз. В отношении ксеногенных фаз обе системы ведут себя физико-химически инертно, как это раскрыто на "диаграмме сингенезиса" системы $(\text{Ec}_{40}\text{Carb}_{60})_{50}\text{Sul}_{50} - \text{D}$ с пара- и ксеногенными фазами [12].

Проблема перидотит-эклогитового парагенетического перехода. Обобщенная диаграмма материнской среды (рис. 1) характеризует источники ее компонентов и пределы изменчивого состава, обеспечивающих нуклеацию алмазной фазы. Диаграммы сингенезиса перидотит-карбонатит-алмазной (рис. 2) и эклогит-карбонатит-алмазной (рис. 4) систем раскрывают физико-химические условия формирования алмазов, а также образования и захвата алмазами первичных включений соответствующих парагенезисов. Дальнейшие задачи физико-химического эксперимента направлены на исследование состава материнских сред, переходных между граничными системами с перидотитовой и эклогитовой специализацией. Существенное значение приобретает изучение фазовых отношений при плав-

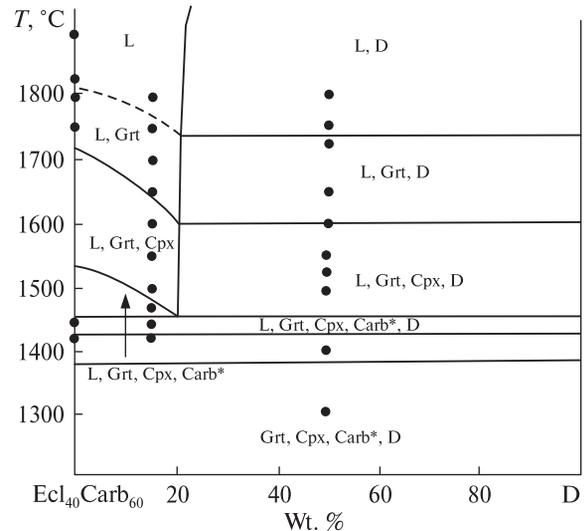


Рис. 5. Фазовая диаграмма сингенезиса алмаза и минеральных фаз эклогитового парагенезиса в гетерогенном политермическом сечении эклогит₄₀карбонатит₆₀ ($\text{Ec}_{40}\text{Carb}_{60}$) — алмаз (D) при давлении 7,0 ГПа, по данным [3]. Условия опытов обозначены экспериментальными точками, стартовый состав — в табл. 1, состав фаз дан в [3]

Fig. 5. Phase diagram for syngenesis of diamond with mineral phases of eclogite paragenesis over heterogeneous polythermal section eclogite₄₀carbonate₆₀ ($\text{Ec}_{40}\text{Carb}_{60}$) — diamond (D) at 7.0 GPa by data of [3]. The terms of experiments are marked by experimental points, starting composition — in Table 1, composition of phases is given in [3]

лении системы перидотит₃₀карбонатит₇₀ — эклогит₃₅карбонатит₆₅. Она разграничивает материнские среды с максимальным содержанием силикатных составляющих по линии КБНА. О возможности перидотит-эклогитового парагенетического перехода в генезисе алмаза и фаз-включений косвенно свидетельствуют некоторые минералогические данные. Так, характер распределения Mg и Fe между гранатами и клинопироксенами минералов мантийных перидотитов и эклогитов, а также включений в алмазах [22] может быть результатом непрерывной ультрабазит-базитовой эволюции материнских сред. В кимберлитах перидотитовые ксенолиты сосуществуют с эклогитовыми, причем состав гранатов и клинопироксенов свидетельствует о непрерывных переходах между ними [18]. Однако физико-химически это не очевидно. Известно [4, 34], что прямая связь нонвариантных пятифазовых перитектик мантийных перидотитов (Ol + Орх + Срх + Grt + L) и коэсит-энстатитовых эклогитов (Cs + Орх + Срх + Grt + L) осу-

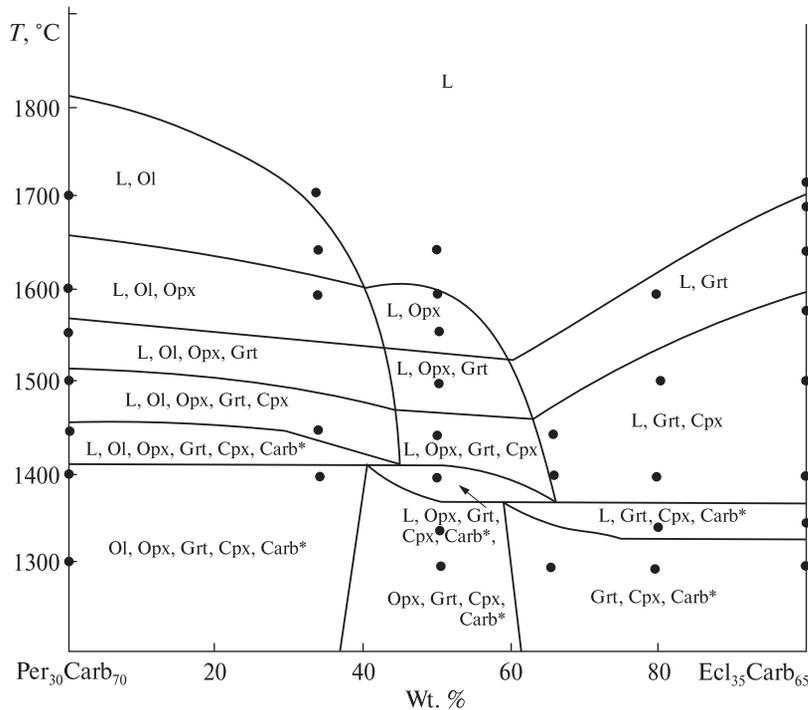


Рис. 6. Фазовые отношения при плавлении системы перидотит₃₀-карбонатит₇₀ — эклогит₃₅-карбонатит₆₅ при давлении 7 ГПа (усл. обозначения см. в табл. 3)

Fig. 6. Melting phase relations for the system peridotite₃₀carbonatite₇₀ — eclogite₃₅carbonatite₆₅ at 7 GPa (legend see in Table 3)

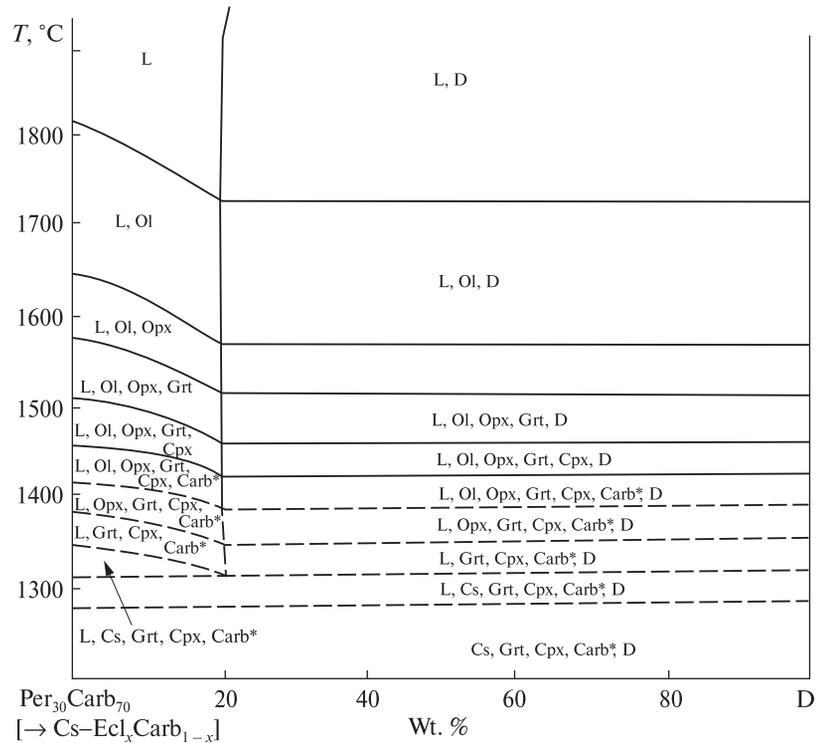
ществляется моновариантной котектикой Оpx + Сpx + Grt + L. Но в точке прохождения (*piercing point*) сквозь плоскость системы Оpx — Сpx — Grt, пограничной между перидотитовым (оливиннасыщенным) и эклогитовым (кремнеземнасыщенным) тетраэдрами-симплексами состава, котектическая кривая имеет температурный максимум. Этот максимум соответствует "эклогитовому термальному барьеру", установленному при исследовании базальтового магматизма [38]. Барьер — непреодолимое препятствие для непрерывной дифференциации ультрабазит-базитовых расплавов в условиях не только равновесной, но и фракционной кристаллизации. Реальность такого барьера повлияла на объяснение сосуществования перидотитов с эклогитами в кимберлитах, когда была предложена версия, что мантийные эклогиты — это продукты превращения океанической коры в зонах субдукции [41]. Вместе с тем, сомнения в справедливости такого объяснения оставались, поэтому не исключалось и множественное происхождение эклогитов, в том числе в процессах фракционирования мантийного вещества [40]. В физико-химическом эксперименте раскрыт механизм "перидотит-эклогитового тоннеля" [8, 34], которым в условиях фракционной кристаллизации (с возрастанием концентрации жадеитового компонента в остаточных расплавах) обеспечивается дифференциация

ультрабазит-базитовых расплавов с формированием непрерывных серий мантийных перидотит-эклогитовых пород. Основу этого механизма образует эффект гранатизации оливина в реакции с жадеитовым компонентом, установленный экспериментально при давлении более 4,5 ГПа [25].

Система перидотит₃₀карбонатит₇₀ — эклогит₃₅карбонатит₆₅ при давлении 7,0 ГПа: реакции карбонатизации. Система Per₃₀Carb₇₀ — Ecl₃₅Carb₆₅ совпадает с линией КБНА (рис. 1), которая служит границей материнских сред с максимальным содержанием силикатных составляющих. Результаты ее исследования при давлении 7 ГПа в условиях равновесной кристаллизации приведены в табл. 3, по результатам которых построена фазовая диаграмма (рис. 6). Ликвидусные минералы — оливин, ортопироксен и гранат. Солидусные отношения исследуемой системы характеризуются перитектическими реакциями карбонатизации магнезиальных минералов перидотита. Эти реакции обеспечивают последовательно переход оливинсодержащих ассоциаций к ортопироксенсодержащим, а затем и к гранат-клинопироксеновым. Согласно предварительным данным, на дифференциацию материнских расплавов определенное влияние оказывает механизм "перидотит-эклогитового тоннеля". Однако возникает дополнительный фактор, связанный с эффектами карбонатизации Mg-

Рис. 7. Схематическая фазовая диаграмма сингенезиса алмаза и минеральных фаз перидотитового и эклогитового парагенезиса в условиях фракционной кристаллизации для гетерогенного политермического сечения перидотит₃₀карбонатит₇₀ (Per₃₀Carb₇₀)(→ Cs-Ecl_x × Carb_{1-x}) — алмаз (D) при давлении 7,0 ГПа (условные обозначения: см. в табл. 3, а также: Cs — коэзит). Граничные условия в форме (Per₃₀Carb₇₀)(→ Cs-Ecl_xCarb_{1-x}) определяют стартовый состав (Per₃₀ × Carb₇₀) системы, испытывающей фракционную кристаллизацию (символизируется стрелкой); также представлен прогнозируемый итог — субсолидусная ассоциация коэзитового эклогита (индекс *x* может быть определен только в эксперименте)

Fig. 7. Schematic phase diagram for syngensis of diamond with mineral phases of peridotite and eclogite paragenesis in conditions of fractional crystallization over heterogeneous polythermal section peridotite₃₀carbonatite₇₀ (Per₃₀Carb₇₀)(→ Cs-Ecl_xCarb_{1-x}) — diamond (D) at 7.0 GPa (legend see in Table 3 and also: Cs — coesite). Boundary conditions in the form (Per₃₀Carb₇₀)(→ Cs-Ecl_xCarb_{1-x}) determine a starting composition Per₃₀Carb₇₀ for the system under fractional crystallization (that is symbolized by an arrow); a forecasted result — the subsolidus assemblage of coesite eclogite (index *x* may be only determined in the experiments)



компонентов перидотита. Действие процессов карбонатизации и гранатизации оливина и ортопироксена проявляется также в том, что ликвидусными фазами становятся оливин, ортопироксен и гранат. Для равновесного случая в первой солидусной перитектической точке теряется оливин, во второй — ортопироксен, в результате субсолидус представлен одной ассоциацией с оливином Ol + Opx + Cpx + Grt + Carb* (рис. 3, b) и двумя ассоциациями без оливина — Opx + Cpx + Grt + Ms + Carb* и Cpx + Grt + Carb* (рис. 3, f). Тем не менее, в случае равновесной кристаллизации клинопироксены и гранаты практически сохраняют перидотитовую специализацию (табл. 3) и, вероятно, приобретают выраженный эклогитовый состав только в условиях фракционной кристаллизации.

Диаграмма сингенезиса в режиме фракционной кристаллизации: система перидотит (→ Cs-эклогит) — карбонатит — алмаз. По результатам физико-химических экспериментов построена диаграмма сингенезиса алмаза и парагенных включений перидотит-карбонатитовой системы в условиях фракционной

кристаллизации (рис. 7). При этом задан только исходный состав системы, который непрерывно изменяется в результате фракционной кристаллизации с удалением образующихся твердых фаз. Диаграммы фракционной кристаллизации становятся информативнее, если в них обозначены как начальный, так и конечный состав. Поэтому целесообразно использовать следующие обозначения как для самой системы, так и ее диаграммы (рис. 7): система перидотит₃₀карбонатит₇₀ (→ Cs-эклогит_xкарбонатит_{1-x}) — алмаз, соответственно, Per₃₀Carb₇₀ (→ Cs-Ecl_xCarb_{1-x}) — D. Экспериментально обоснованная информация, заложенная в диаграмме сингенезиса алмаза и фаз обоих парагенезисов при фракционной кристаллизации, непосредственно приложима к анализу процессов образования алмазов и включений в мантийных очагах материнских карбонатно-силикатных (карбонатитовых) магм в режиме постепенного охлаждения. Раскрывается непрерывный ультрабазит-базитовый переход ростовых карбонатитовых расплавов с последовательной заменой кристаллизации перидотитовых минералов эклогитовыми вплоть

до коэзитсодержащих. В результате становится понятно, почему первичные включения минералов перидотитового и эклогитового парагенезисов в природных алмазах представлены контрастно, отдельно, не смешиваясь. Это обусловлено тем, что за формирование в алмазах минеральных включений как перидотитового, так и эклогитового парагенезисов ответственна фракционная кристаллизация. Закономерный переход сингенетических минералов от перидотитового парагенезиса к эклогитовому свидетельствует о последовательной смене соответствующих физико-химических условий. Это исключает суперпозицию различных условий 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 разной парагенетической [39, 44] принадлежности следует относить к категории случайных явлений, не имеющих физико-химической основы. Вероятно, совмещенные включения разных парагенезисов возникают в условиях изменчивой материнской среды из-за локальных и случайных событий второстепенного значения.

Заключение. Гетерогенные карбонатно-силикатные материнские среды алмазов и включений представляют собой самостоятельные стационарные магматические тела, образовавшиеся во вмещающей перидотитовой верхней мантии [32, 33]. Вероятно, K-Na-Mg-Ca-Fe-карбонатитовые расплавы (основа материнских сред) возникли при воздействии на мантийный гранатовый лерцолит мобильного высокотемпературного "метасоматического агента", богатого CO_2 , K-Na-щелочными карбонатами и силикатами, несовместимыми и редкими элементами [5, 26, 45]. В таких карбонатитовых расплавах растворялись минералы мантийного перидотита, рассеянный углерод и его твердые фазы, второстепенные растворимые минералы, а также в них проникали нерастворимые ксеногенные фазы. Продуктивностью мантийного резервуара метасоматических агентов контролировалось количество карбонатитовых расплавов и, соответственно, размеры очагов материнских магм алмазов и включений. Невысокая вязкость карбонатитовых магм — важный фактор их фракционной кристаллизации. Алмазообразующая способность очагов материнских магм

приобретается при их охлаждении, когда достигается насыщение и затем пересыщение растворенным углеродом с нуклеацией алмазной фазы. Эти процессы в карбонат-силикат-углеродных расплавах контролируются кривой растворимости алмаза, которая имеет положительный наклон, во всем температурном интервале функционирования очага. Процесс кристаллизации алмаза в режиме фракционной кристаллизации материнских расплавов может начинаться при любой температуре (рис. 7) и сопровождать сопряженную эволюцию их фазового состояния. С охлаждением очага реализуется перидотит-эклогитовый парагенетический переход: сначала формируются минеральные ассоциации перидотитового парагенезиса, а затем — эклогитового. Сингенезис алмаза и фаз-включений — это результат процессов кристаллизации алмаза, совмещенных с образованием силикатных и карбонатных минералов в той же карбонат-силикат-углеродной материнской среде. При этом неизбежен захват растущими алмазами ксеногенных фаз, проникших в материнские среды извне. Время роста кристаллов алмаза не может превышать время функционирования магматического очага алмазообразующих расплавов.

Кристаллизующиеся из материнских сред минералы, естественно, подобны минералам вмещающих пород, растворенных в них на стадии формирования. Следует подчеркнуть, что алмазы захватывают в виде включений не минералы вмещающей мантии, а их аналоги, в которые они перекристаллизовались в карбонатитовых материнских расплавах. Таким образом, отождествлять минералы из включений в алмазах с минералами вмещающих пород верхней мантии нет оснований. Химическая и парагенетическая изменчивость материнских расплавов отражается в перидотит-пироксенитовых и эклогит-гроспидитовых парагенезисах включенных в них минеральных фаз. Два физико-химических механизма могут совместно контролировать перидотит-эклогитовый парагенетический переход в режиме фракционной эволюции материнских магм — карбонатизация магнезиальных минералов перидотита и гранатизация оливина в реакции с жадеитовым компонентом [8].

Автор благодарен Российскому фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку выполненных работ (грант № 11-05-00401).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бобров А.В., Литвин Ю.А. Перидотит-эклогит-карбонатитовые системы при 7,0–8,5 ГПа : концентрационный барьер нуклеации алмаза и сингенезис его силикатных и карбонатных включений // Геология и геофизика. — 2009. — **50**, № 12. — С. 1571–1587.
2. Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. — 1983. — **92**, № 3. — С. 300–310.
3. Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. и др. Карбонатные и силикатные среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2011. — **52**, № 11. — С. 1665–1666.
4. Литвин Ю.А. Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. — М. : Наука, 1991. — 312 с.
5. Литвин Ю.А. Горячие точки мантии и эксперимент до 10 ГПа : щелочные реакции, карбонатизация литосферы, новые алмазообразующие системы // Геология и геофизика. — 1998. — **39**, № 12. — С. 1772–1779.
6. Литвин Ю.А. Эксперимент в решении проблемы генезиса алмаза // Зап. Рос. минерал. об-ва. — 2007. — **136**, № 7. — С. 138–158.
7. Литвин Ю.А. Экспериментальные исследования физико-химических условий образования алмаза в мантийном веществе // Геология и геофизика. — 2009. — **50**, № 12. — С. 1530–1546.
8. Литвин Ю.А. Перидотит-эклогитовый парагенетический переход в материнских для алмаза и включений карбонат-силикатных расплавах // Годичное собрание РМО и Федоровская сессия 2012 "Минералогия во всем пространстве сего слова" : Материалы конф. — СПб., 2012. — С. 175–178. <http://www.minsoc.ru/2012-1-63-0>.
9. Литвин Ю.А. Экспериментальные исследования физико-химических условий образования природного алмаза // Геология руд. месторождений. — 2012. — **54**, № 6. — С. 523–539.
10. Литвин Ю.А., Бобров А.В. Экспериментальные исследования кристаллизации алмаза в карбонатно-перидотитовых расплавах при 8,5 ГПа // Докл. Акад. наук. — 2008. — № 4. — С. 528–532.
11. Литвин Ю.А., Бутвина В.Г., Бобров А.В., Жариков В.А. Первые синтезы алмаза в сульфид-углеродных системах : роль сульфидов в генезисе алмаза // Там же. — 2002. — **382**, № 1. — С. 106–109.
12. Литвин Ю.А., Васильев П.Г., Бобров А.В. и др. Материнские среды природных алмазов и первичных минеральных включений в них по данным физико-химического эксперимента // Геохимия. — 2012. — **50**, № 9. — С. 811–847.
13. Литвин Ю.А., Жариков В.А. Первичные флюид-карбонатитовые включения в алмазе, моделируемые системой $K_2O - Na_2O - CaO - MgO - FeO - CO_2$, как среда алмазообразования в эксперименте при 7–9 ГПа // Докл. Акад. наук. — 1999. — **367**, № 3. — С. 397–401.
14. Литвин Ю.А., Жариков В.А. Экспериментальное моделирование генезиса алмаза : кристаллизация алмаза в многокомпонентных карбонат-силикатных расплавах при 5–7 ГПа и 1200–1570 °С // Там же. — 2000. — **372**, № 6. — С. 808–811.
15. Литвин Ю.А., Литвин В.Ю., Кадик А.А. Особенности кристаллизации алмаза в расплавах мантийных силикат-карбонат-углеродных систем по данным экспериментов при 7,0–8,5 ГПа // Геохимия. — 2008. — № 6. — С. 579–602.
16. Литвин Ю.А., Спивак А.В. Алмазиты : быстрый рост в контакте графита и карбонатных расплавов (опыты при 7,5–8,5 ГПа) // Докл. Акад. наук. — 2003. — **391**, № 5. — С. 673–677.
17. Литвин Ю.А., Чудиновских Л.Т., Жариков В.А. Кристаллизация алмаза и графита в мантийных щелочно-карбонатных расплавах в эксперименте при 7–11 ГПа // Там же. — 1997. — **335**, № 5. — С. 669–672.
18. Маракушев А.А. Нодули перидотитов в кимберлитах как показатели глубинного строения литосферы // Докл. сов. геологов на XXVII сес. Междунар. геол. конгресса. Петрология. — М. : Наука, 1985. — Вып. 13. — С. 5–13.
19. Палатник Л.С., Ландау А.И. Фазовые равновесия в многокомпонентных системах. — Харьков : Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1961. — 405 с.
20. Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Соболев Н.В. Экспериментальное моделирование мантийных алмазообразующих процессов // Геология и геофизика. — 2005. — **46**, № 12. — С. 1290–1303.
21. Райнз Ф. Диаграммы фазового равновесия в металлургии. — М. : Металлургиздат, 1960. — 376 с.
22. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. — Новосибирск : Наука, 1974. — 264 с.
23. Фурсенко Б.А., Горяинов С.Б., Соболев Н.В. Высокие давления во включениях коэсита в алмазе : спектроскопия комбинационного рассеяния // Докл. Акад. наук. — 2001. — **379**, № 6. — С. 812–815.
24. Футергендлер С.И., Франк-Каменецкий В.А. Ориентированные вросстки оливина, граната и хромдиоксида в алмазах // Зап. Всес. минерал. об-ва. — 1961. — **90**, № 2. — С. 230–236.
25. Gasparik T., Litvin Yu.A. Stability of $Na_2Mg_2Si_2O_7$ and melting relations on the forsterite-jadeite join at pressures up to 22 GPa // Eur. J. Miner. — 1997. — **9**, No 2. — P. 311–326.
26. Gasparik T., Litvin Yu.A. Experimental investigation of the effect of metasomatism by carbonatic melt on the composition and structure of the deep mantle // Lithos. — 2002. — **60**. — P. 129–143.
27. Hall H.T. Fixed points near room temperature // National Bureau of Standard US Special Publication No 326 "Accurate Characterization of the High Pressure Environment". — Washington, DC, 1971. — 313 p.

28. *Harris J.W.* The recognition of diamond inclusions // *Industrial Diamond Review* (Pt. 1 and 2). — 1968. — **28**, No 334—335.
29. *Klein-BenDavid O., Israeli E.S., Hauru E., Navon O.* Fluid inclusions in diamonds from the Diavik mine, Canada and the evolution of diamond-forming fluids // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 2007. — **71**. — P. 723—724.
30. *Kvasnytsya V.M., Wirth R.* Nanoinclusions in micro-diamonds from neogenic sands of the Ukraine (Samo-kan' placer : a TEM study) // *Lithos.* — 2009. — **113**. — P. 454—464.
31. *Litvin Yu.A.* High-pressure mineralogy of diamond genesis // *Advances in High-pressure Mineralogy* / Ed. E. Ohtani. — 2007. — P. 83—1033. — (Geol. Soc. of America. Spec. Pap. ; No 421).
32. *Litvin Yu.A.* Mantle origin of diamond-parent carbonatite magma : experimental approaches. *Geophysical Research Abstracts.* — Vol. 13. — EGU2011-3627. — 2011. — EGU General Assembly 2011. European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, 2—7 April 2011.
33. *Litvin Yu.A.* Origin and evolution of carbonatite magma parental for diamond and syngenetic inclusions. *Goldschmidt Conference Abstracts* // *Miner. Mag.* — 2011. — **75**, No 3. — P. 1336.
34. *Litvin Yu.A., Anashkina N.E.* Ultrabasic-basic differentiation of mantle magmas and natural diamond-parental melts by evidence of physico-chemical experiments // *Vestnik Otdelenia nauk o Zemle RAN.* — 2012. — **4**. — NZ9001, doi : 10.2205/2012NZ_ASEMPG.
35. *Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V.* Nanometre-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds : new insights on diamond formation // *Eur. J. Miner.* — 2008. — **20**. — P. 317—331.
36. *Maaløe S.* *Principles of Igneous Petrology.* — Berlin : Springer, 1985. — 374 p.
37. *Navon O.* Infrared determination of high internal pressures in diamond fluid inclusions // *Nature.* — 1991. — **353**. — P. 746—748.
38. *O'Hara M.* The bearing of phase equilibria in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks // *Earth-Sci. Rev.* — 1968. — **4**. — P. 69—133.
39. *Prinz M., Manson D.V., Hlava P.F., Kiel K.* Inclusions in diamonds : garnet lherzolite and eclogite assemblages // *Phys. and Chem. Earth.* — 1975. — **9**. — P. 797—815.
40. *Ringwood A.E.* *Composition and Petrology of the Earth's Mantle.* — New York : McGraw-Hill, 1975.
41. *Ringwood A.E., Green D.H.* An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical consequences // *Tectonophysics.* — 1966. — **3**. — P. 383—427.
42. *Schrauder M., Navon O.* Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1994. — **58**, No 2. — P. 761—771.
43. *Shushkanova A.V., Litvin Yu.A.* Experimental evidence for liquid immiscibility in the model system CaCO_3 -pyrope-pyrrhotite at 7.0 GPa : the role of carbonatite and sulfide melts in diamond genesis // *Can. Miner.* — 2008. — **46**. — P. 991—1005.
44. *Wang W.* Formation of diamond with mineral inclusions of "mixed" eclogite and peridotite paragenesis // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 1998. — **160**. — P. 831—843.
45. *Wyllie P.J.* *Metasomatism and fluid generation in mantle xenoliths* // *Mantle Xenoliths* / Ed. P.H. Nixon. — N. Y. : John Wiley & Sons, 1987. — P. 609—621.

Поступила 31.01.2013

Ю.А. Литвін

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ УМОВИ СИНГЕНЕЗИСУ
АЛМАЗУ І ГЕТЕРОГЕННИХ ВКЛЮЧЕНЬ
У КАРБОНАТНО-СИЛКАТНИХ
МАТЕРИНСЬКИХ РОЗПЛАВАХ
(ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)

Основою хімічно та парагенетично мінливих материнських розплавів алмазів кімберлітових родовищ є повністю змішувани карбонатно-силікатні (карбонатитові) розплави з розчиненим вуглецем. Це відповідає мантієно-карбонатитовій теорії генезису алмазу. У материнських середовищах містяться всі компоненти і фази мінералів, розплавів і легких сполук, що їх первинно захоплюють алмази під час зростання. Здатність карбонат-силікат-вуглецевих материнських середовищ алмазу забезпечити його сингенезис з мінералами первинних включень розкривається у фізико-хімічному експерименті, якщо склад досліджуваних багатокомпонентних систем і гетерогенних включень злагожені. Експериментально за 7 ГПа вивчено фазові взаємодії у ході плавлення гетерогенної системи перидотит — карбонатит — алмаз, що контролює еволюцію материнських середовищ в умовах перидотитового парагенезису. Визначена "діаграма сингенезису", яка розкриває фізико-хімічні умови утворення алмазу спільно з силікатними і карбонатними перидотитовими мінералами. У фізико-хімічному експерименті за 7 ГПа також досліджена система перидотит₃₀карбонатит₇₀ — еклогіт₃₅карбонатит₆₅. Вона обмежує склад материнських середовищ по лінії концентраційного бар'єру нуклеації алмазної фази. Зафіксовано процеси карбонатизації магнезійних компонентів перидотитів, що призводить до перидотит-еклогітового парагенетичного переходу в материнських розплавах. Експериментальні дані дозволяють побудувати схематичну "діаграму сингенезису алмазу" і первинних включень обох парагенезисів у режимі фракційної кристалізації. Перехід від перидотитового до еклогітового парагенезису є закономірним і послідовним, що мінімізує одночасне захоплення алмазами фаз різних парагенезисів, які ростуть. На фізико-хімічній основі розглянуті особливості хімічної та парагенетичної еволюції материнських середовищ і процесів утворення алмазів і фаз-включень у мантієних осередках карбонатно-силікатної (карбонатитової) магми.

Yu.A. Litvin

PHYSICOCHEMICAL CONDITIONS
OF SYNGENESIS OF DIAMOND
AND HETEROGENEOUS INCLUSIONS
IN THE CARBONATE-SILICATE
PARENTAL MELTS (EXPERIMENTAL STUDY)

Completely miscible carbonate-silicate (carbonatite) melts with dissolved carbon serve as a basis for chemically and paragenetically changeable parental media of diamonds from kimberlitic deposits. This is consistent with the mantle-carbonatite theory of diamond genesis. All components and phases of the minerals, melts and volatiles which are primarily trapped by growing diamonds are present in the parental media. The ability of carbonate-silicate-carbon parental media to provide syngensis of diamond and primary included minerals is revealed in physicochemical experiments. In this case the compositions of the multicomponent systems under study and of heterogeneous inclusions must be agreed. Melting phase relations of multicomponent heterogeneous system peridotite-carbonatite-sulphide-diamond were experimentally studied at 7 GPa.

Model compositions of natural diamond parental medium under conditions of the peridotite paragenesis are presented by the system. A "syngensis diagram" that reveals physicochemical conditions of a paragenetic formation of diamond and silicate and carbonate minerals is constructed. The diagram also characterizes a primary trapping of the paragenetic minerals together with xenogenetic sulphide phases. Phase relations over the peridotite₃₀carbonatite₇₀ — eclogite₃₅carbonatite₆₅ section which is a boundary for the parental media at their generalized composition diagram are studied. A peridotite-to-eclogite paragenetic transition in conditions of the parental melts fractional crystallization is found. The experimental results are used to construct a syngensis diagram for diamond and primary inclusions of peridotitic and eclogitic inclusions under fractional crystallization conditions. A regular and sequential transition from peridotitic to eclogitic paragenesis was observed. The transition minimizes a simultaneous capture of the phases from the dissimilar parageneses by the growing diamonds. The regularities were applied to analysis of diamond and inclusions formation in the mantle chambers of parental carbonatitic magma.