

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ АЛМАЗИТОВ В КАРБОНАТНО-СИЛИКАТНЫХ РАСПЛАВАХ: МОДЕЛЬНОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ К ПРИРОДНЫМ ПРОЦЕССАМ

Ю.А. Литвин, Г. Курат*, Г. Добоши**

Институт экспериментальной минералогии РАН, 142432, Московская область, Черноголовка, Россия

** Музей истории природы, Вена, Австрия*

*** Лаборатория геохимических исследований, Венгерская академия наук, Будапешт, Венгрия*

Меланократовые карбонатиты комплекса Чагатай в Узбекистане использованы для экспериментального моделирования природных карбонатно-силикатных сред, являющихся материнскими как для алмазитов, так и для сингенетических минеральных включений в них. Данные карбонатиты характеризуются высокими содержаниями силикатных компонентов и эколгитовой ассоциацией силикатных минералов, формирующихся при высоких давлениях. Эксперименты при давлениях 7,0—8,5 ГПа и температуре 1800 °С показывают, что алмазиты очень быстро формировались в карбонатно-силикатных расплавах чагатайских карбонатитов с растворенным углеродом. Экспериментальные данные свидетельствуют, что минералогически чагатайские карбонатиты при *P-T* условиях формирования алмазитов представлены гроссуляр-альмандиновым гранатом, диопсид-геденбергитовым клинопироксеном и кальцитом (арагонитом); это сопоставимо с минералогией алмазонасных, богатых кальцием эколгитов и гроспидитов, обнаруживаемых в виде мантийных ксенолитов в кимберлитах. Чагатайские карбонатиты, в определенном отношении, являются подходящими материнскими средами для моделирования физико-химических процессов формирования природных алмазитов. В качестве наиболее важных особенностей этих процессов можно выделить: быстрое перемещение высокоподвижных маловязких карбонатно-силикатных расплавов в зоны формирования алмазитов; предельно высокие скорости лавинообразной кристаллизации алмазитов из карбонатно-силикатных расплавов, пересыщенных растворенным углеродом; образование сингенетических включений гранатов и клинопироксенов, карбонатов и сульфидов и других минералов внутри пор и каверн алмазитов. Эксперименты демонстрируют, что формирование алмазитов и сингенетических включений в них сопровождается крупнозернистой кристаллизацией эколгитовых минералов в материнских средах, в которых происходит рост алмазитов.

Сингенезис алмазитов и включений, карбонатитовые материнские расплавы, эксперимент.

EXPERIMENTAL STUDY OF DIAMONDITE FORMATION IN CARBONATE-SILICATE MELTS: A MODEL APPROACH TO NATURAL PROCESSES

Yu.A. Litvin, G. Kurat, and G. Dobosi

To simulate a natural carbonate-silicate medium parental for both diamondites and their syngenetic mineral inclusions, melanocratic carbonatites of the Chagatai complex, Uzbekistan, were used. The carbonatites are characterized by a high percentage of silicate components and high-pressure eclogitic silicate minerals. The experiments carried out at 7.0–8.5 GPa and 1800 °C show that the diamondites formed very quickly in carbonate-silicate melts of the Chagatai carbonatites with dissolved carbon. According to experimental evidence, the mineralogy of the Chagatai carbonatites under the *PT*-conditions of diamondite formation is represented by grossular-almandine garnet, diopside-hedenbergite clinopyroxene, and calcite (aragonite) and resembles the mineralogy of diamond-bearing Ca-rich eclogites and grosspydites found in kimberlites as mantle xenoliths. The Chagatai carbonatites are quite appropriate as a parental medium to simulate physicochemical processes for the formation of natural diamondites. The most important characteristics of these processes are as follows: quick migration of highly mobile low-viscosity carbonate-silicate melts into zones of diamondite formation, extremely high “snowballing” rate of diamondite crystallization from a carbonate-silicate melt oversaturated with dissolved carbon, formation of syngenetic inclusions of garnet and clinopyroxene, carbonate and sulfides, etc. inside the pores and cavities of diamondites. Experiments show that the formation of diamondites and their syngenetic inclusions is accompanied by coarse-grained crystallization of eclogitic minerals in the parental media surrounding the growing diamondites.

Syngeneses of diamondites and inclusions, carbonatite parental melts, experiment

ВВЕДЕНИЕ

Природные алмазиты представляют собой поликристаллические сростки кристаллов алмаза размерами от единиц до десятков микрометров с порами и кавернами, в которые включены как алмазные кристаллы, так и силикатные, оксидные, сульфидные минералы (вместе с алмазами или без них). Характерной особенностью алмазитов является то, что они содержат гранаты, в химическом отношении подобные гранатам перидотитов и эколгитов, а также „перидотитовые“ клинопироксены, сульфиды и ильменит, которые химически схожи с такими же минералами из первичных включений в монокристаллах

алмаза; но алмазиты не содержат включений оливина, наиболее распространенного минерала мантии [1]. Карбонаты не были обнаружены в алмазитах, но это могло быть результатом кислотной обработки в процессе извлечения из породы. Мы предполагаем, что богатые карбонатами включения должны присутствовать и в алмазитах, и в силикатах; карбонаты являются носителями наиболее несовместимых редких элементов, как было показано в работе [2]. Следует также отметить, что концентрационные отношения редких элементов в силикатных минералах алмазитов ясно свидетельствуют о том, что карбонатитовые расплавы были вовлечены в процессы формирования алмазитов [1, 2]. Представления о возможной ключевой роли природных карбонатитовых сред — расплавов или флюидов — в формировании алмазитов поддержаны экспериментами при высоких давлениях и температурах по нуклеации и росту алмаза в многокомпонентных карбонатных и карбонатно-силикатных расплавах с природным химизмом [3, 4]. В этих экспериментах использовались стартовые материалы, составы которых были подобны составам первичных флюид-карбонатитовых (карбонатно-силикатных) включений в алмазах из Ботсваны [5].

Меланократовые карбонатитовые породы (севиты и рингиты) из диатрем трахит-карбонатитового комплекса Чагатай в Узбекистане были описаны как новый тип алмазоносных пород авторами работы [6]. В связи с таким предположением, эти карбонатитовые породы были использованы в качестве материнских алмазообразующих сред в экспериментах при высоких давлениях и температурах с графитом в качестве источника углерода. Алмазы успешно нуклеировали и росли в карбонатно-силикатных расплавах (с растворенным углеродом) чагатайских карбонатитов с высокими содержаниями силикатных компонентов [7]. Кристаллизация их сопровождается сингенетическим формированием гроссуляр-альмандинового граната, диопсид-геденбергитового клинопироксена, апатита, кальцита (арагонита) и щелочных карбонатов, карбидов, коэсита, пирротина, железа и золота, железо-хромитовых сплавов и некоторых других фаз. Силикатная минерализация при высоких давлениях для чагатайских карбонатитов изучалась при давлении 7 ГПа [8]. Главными минералами являются гранат, клинопироксен и карбонат (кальцит). Эта ассоциация в полной степени подобна минеральным составам алмазоносных высококальциевых эклогитов и гроспидитов [9]. Эти особенности важны и позволяют использовать чагатайские карбонатиты для моделирования составов карбонатно-силикатных материнских сред, ответственных за формирование природных алмазов, алмазитов и их сингенетических включений. Об успешных синтезах алмазитов в карбонат-углеродных расплавах при высоких давлениях сообщалось в работе [10].

Главными задачами настоящего экспериментального исследования являются синтез алмазита в расплавах чагатайских карбонатитов и характеристика вновь образующихся фаз в чагатайских карбонатитах при *PT*-условиях формирования алмаза.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ

Стартовыми материалами были чагатайские карбонатиты, представляющие собой биотит-пироксен-кальцитовые породы с аксессуарными плагиоклазом, мусковитом, апатитом, титаномагнетитом, баритом, цирконом и рутилом [6]. Химические составы двух использованных пород даны в табл. 1. При *PT*-условиях стабильности алмаза фазовые отношения при плавлении этих пород характеризуются формированием клинопироксена (обр. 23) или граната (обр. 79) в качестве фаз ликвидуса при 1730 и 1700 °С соответственно [8]. Трехфазовая ассоциация клинопироксена, граната и расплава образуется при 1620 °С. Полная кристаллизация чагатайских пород контролируется квазиинвариантными эвтектиками, состоящими из клинопироксена, граната, кальцита и расплава, при 1510—1480 °С. Ассоциация субсолидуса состоит из клинопироксена, граната и Са-карбоната. В качестве стартовых материалов были использованы порошки чагатайских пород. В качестве источника углерода — спектрально-чистый синтетический графит.

Методика высоких давлений. Высокие давления 7,0—8,5 ГПа и температуры 1500—2000 °С создавались с использованием аппарата типа „наковальня с лункой“ с ячейкой из литографского камня и пиррофиллита [11, 12]. Для синтеза алмазита был изготовлен электрорезистивный нагреватель в форме трубки с внешним диаметром 5 мм, внутренним — 3 мм (толщина стенки 1 мм) и длиной 7,5 мм. С целью изучения фазовых превращений в чагатайском карбонатите были приготовлены спрессованные образцы

Таблица 1. Химические составы чагатайских карбонатитов, использованных в экспериментах

№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	SO ₃	Сумма
23	22,19	0,60	5,36	14,97	2,87	0,25	2,80	26,64	1,62	1,32	0,49	0,26	18,70	0,01	98,08
79	18,20	0,65	6,24	14,37	4,20	0,23	3,65	29,40	0,29	0,89	0,43	0,46	20,90	0,13	100,04

Примечание. Химические анализы выполнены в Институте минеральных ресурсов (г. Ташкент).

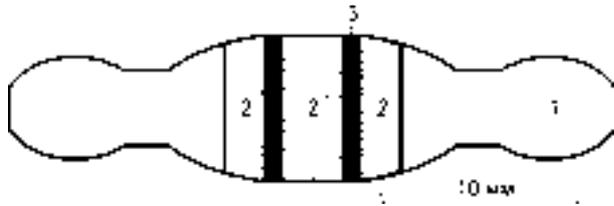


Рис. 1. Схема экспериментального ансамбля в аппарате высоких давлений и температур типа „наковальня с лункой“.

1 — ячейка из известняка Алгети, Грузия, 2 — спрессованный порошок чагатайского карбонатита, 3 — нагреватель из графита, который одновременно служит в качестве источника углерода для алмазита.

диаметром 2 мм и длиной 2 мм, которые вкладывались в полости внутри графитового стержня диаметром 6 мм и длиной 7,5 мм, который также работал как резистивный нагреватель. Это позволяло варьировать распределение температуры в образце изменением расположения полости вдоль оси стержневого нагревателя. Давление при комнатной температуре определялось с помощью обычной калибровочной процедуры с использованием стандартных полиморфных превращений в висмуте при 2,55; 2,7 и 7,7 ГПа. Температура измерялась $Pt_{70}Rh_{30}/Pt_{94}Rh_{06}$ термопарой в калибровочных опытах. Давление в образце при известных высоких температурах корректировалось по *PT*-кривой равновесия алмаз—графит [13].

Синтез алмазита происходил пространственно в графитовом нагревателе, который одновременно служил в качестве источника углерода при формировании алмазита. Специально предусматривалось, чтобы в экспериментальной сборке графитовый трубчатый нагреватель (источник углерода) был полностью окружен спрессованным карбонатитовым порошком (рис. 1).

Анализы. Полученные экспериментальные образцы исследованы методами оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и электронного микронзонда в Вене, Будапеште и Черногловке. В Институте экспериментальной минералогии РАН в г. Черногловка был использован электронный микроскоп Tescan Vega с анализатором типа Link. Микронзондовые анализы гранатов и клинопироксенов были выполнены с использованием электронных микроскопов JEOL superprobe (Лаборатория геохимических исследований, Венгерская академия наук, Будапешт) и ARL SEMQ (Музей истории природы, Вена). Анализы выполнены с использованием стандартных минералов; ускоряющее напряжение и ток возбуждения электронного пучка составляли соответственно 15 кВ и 15 нА; использовались стандартные процедуры коррекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Синтез алмазита. Образцы карбонатитов 23 и 79 были использованы как стартовые материалы для получения экспериментальных образцов 979 и 1012 соответственно. Эксперименты, выполненные при давлениях 7,0—8,5 ГПа и температуре 1800 °С показали, что графит нагревателя в контакте с карбонатитом интенсивно превращается в алмазит в течение 3—5 с, формируя алмазитовую трубочку (рис. 2). Результатом быстрой лавинообразной кристаллизации является формирование плотных поликристаллических сростков алмаза типа природных алмазитов, которые состоят из тесно сростшихся октаэдрических микросталлов алмаза размера от 1 до 500 мкм (рис. 3). По оценкам плотность нуклеации таких „карбонатит-синтетических“ алмазитов близка к $1 \cdot 10^5$ зародышей в 1 мм^3 (для сравнения: плотность нуклеации в случае спонтанной нуклеации алмаза в карбонатитовых расплавах с растворенным углеродом составляет около $(3—5) \cdot 10^2$ зародышей в 1 мм^3 [14]). Условия экспериментов выдерживались в продолжение 40 мин для того, чтобы способствовать лучшим условиям роста сингенетических минералов в карбонат-силикатных расплавах. Углерод растворялся в карбонат-силикатном расплаве и мигрировал в центральные части образца, где также создавал пересыщенные растворы в карбонат-силикатных расплавах. При этом в центральной части образца, в достаточном удалении от

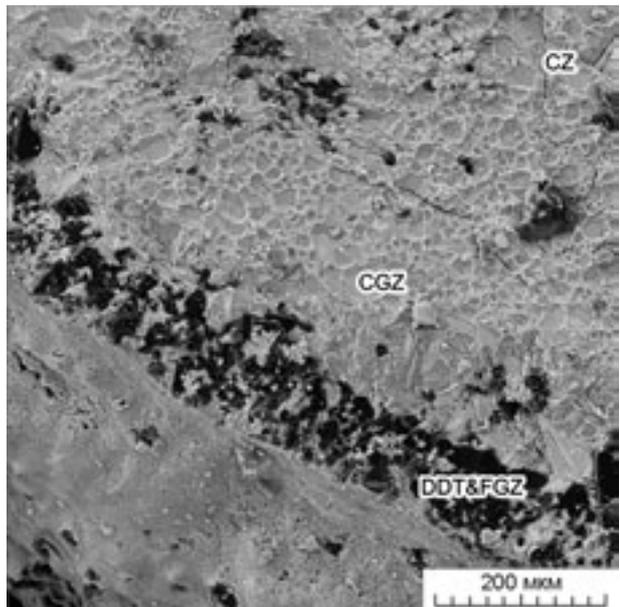


Рис. 2. Картина СЭМ экспериментального обр. 1012 после перекристаллизации графита нагревателя в алмазит.

Здесь и далее: CZ — центральная зона, CGZ — крупнозернистая зона, FGZ — мелкозернистая зона, DDT — алмазит.

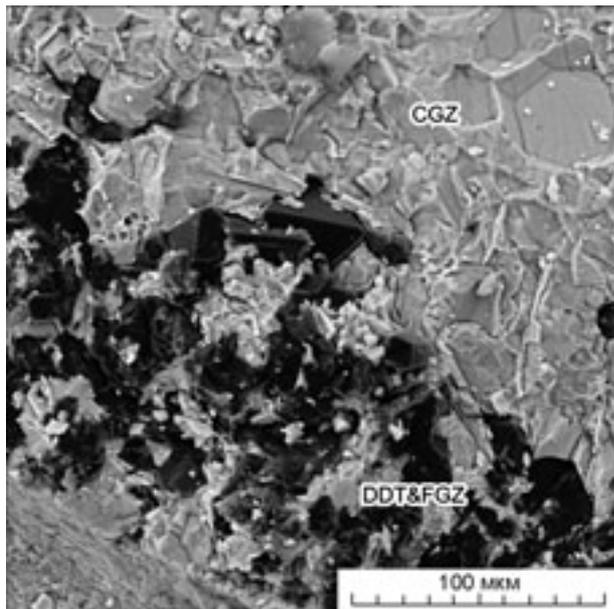


Рис. 3. Картина СЭМ алмазительного пояса (обр. 1012), которая показывает пространственные отношения материнской карбонатной среды и кристаллитов алмаза после закалки.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

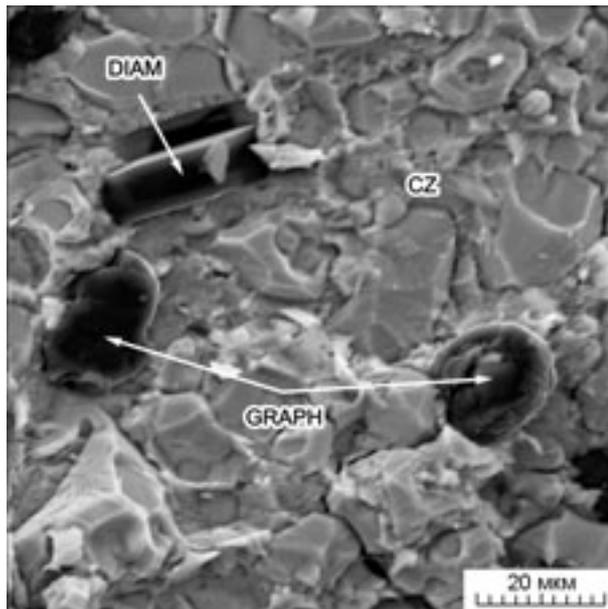


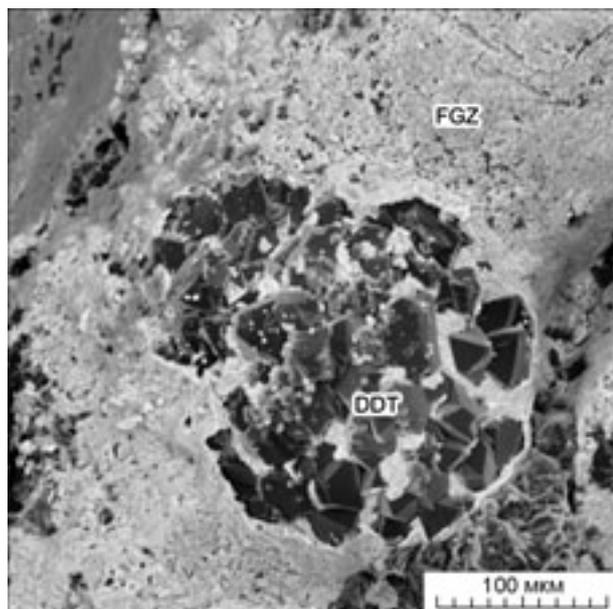
Рис. 4. Картина СЭМ центральной части обр. 979: кристаллы алмаза и сферулы графита. DIAM — алмаз, GRAPH — графит.

ческие кристаллы алмаза одновременно со сферами метастабильного графита (рис. 4). Иногда также происходило образование монокристаллического графита пластинчатого габитуса. Какие-либо признаки карбонатно-силикатной жидкостной несмесимости в расплавах чагатайских карбонатитов (в закалочных продуктах после экспериментов при высоких давлениях) не были обнаружены.

Образование минералов высокого давления в материнском карбонатите. Наиболее важным является минералогический состав экспериментальных образцов в зоне формирования алмазита (рис. 5—7). Образцы были расколоты поперек, поэтому в действительности поверхности алмазитов, наблюдаемые на рисунках, являются внутренними частями образцов алмазитов. Исходный („материнский“) карбонатит превращался в ассоциацию граната, клинопироксена и карбоната, составы которых даны в табл. 2. Эти минералы образуют мелкозернистую массу, в которой преобладает карбонатная фаза и которая, очевидно, является продуктом закалки богатого карбонатом расплава. Этот расплав ответствен за формирование алмазита и также содержится внутри алмазитов в виде дисперсного затвердевшего материала (см. рис. 5). Это ясно демонстрирует, как силикаты, карбонаты и другие первичные включения могут сингенетически срачиваться с алмазами в алмазитах при кристаллизации последних из материнских карбонатно-силикатных расплавов в эксперименте или природе. Полоса крупнокристаллической гранат-клинопироксеновой эклогитовой породы с подчиненным содержанием карбоната формируется в зоне внутреннего контакта с алмазитовым кольцом (см. рис. 6 и 7).

Рис. 5. Картина СЭМ обр. 979, которая показывает мелкокристаллическое богатое карбонатом вещество в зоне формирования алмазита (алмазит частично обнажен) после закалки.

Усл. обозн. см. на рис. 2.



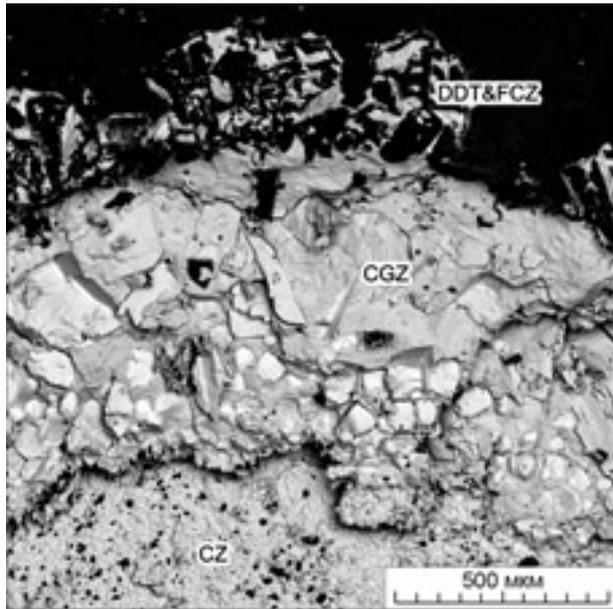


Рис. 6. Картина СЭМ обр. 979, которая показывает крупнокристаллический „пояс“ гранатовых и клинопироксеновых минералов с небольшим количеством карбонатной фазы в зоне контакта с алмазитаом.

Усл. обозн. см. на рис. 2.

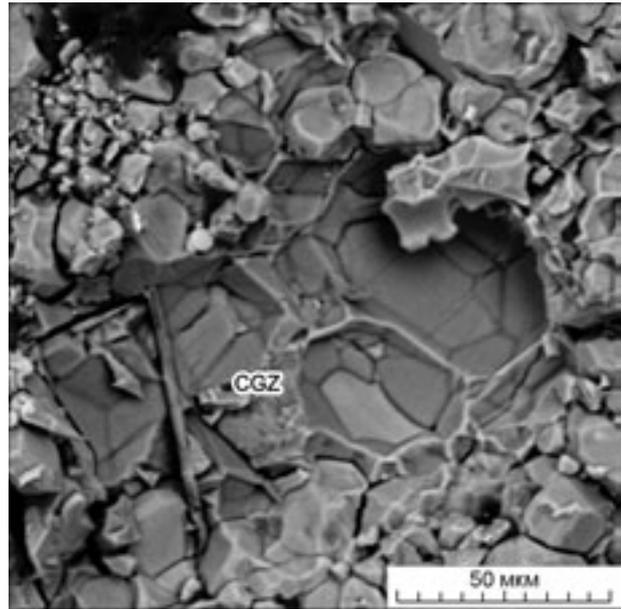


Рис. 7. Картина СЭМ обр. 1012 в зоне крупнокристаллической кристаллизации граната и клинопироксена (эклогитовый пояс).

Исследования фазовых превращений материнских чагатайских карбонатитов при *PT*-условиях стабильности алмаза. Оценка физико-химического поведения чагатайского карбонатита как материнской среды для формирования алмазита

представляет интерес для тех же экспериментальных условий, при которых формировались сами алмазиты (с графитовым нагревателем в условиях температурного градиента по образцу, плавления, поведения в ходе закалки и др.). Чагатайский карбонатит (обр. 23) представляет собой биотит-пироксен-кальцитовую породу с аксессуарными плагиоклазом, апатитом, титаномагнетитом, баритом, цирконом и рутилом (химический состав см. в табл. 1). Экспериментальное определение фазовых отношений в породе обр. 23 показывает, что клинопироксен является ликвидусной фазой при 7 ГПа и 1730 °С, ассоциация

Таблица 2. Составы сингенетических минералов в алмазите экспериментального обр. 979 (стартовый карбонатит обр. 23)

Оксид	Gt1	Gt1	Gt2	Gt3	Cpx1	Cpx2	Cpx3	Crb1	Crb1*	Crb2	Crb2	Crb3
SiO ₂	36,6	34,7	40,3	39,3	52,1	52,2	45,3	1,57	0,89	9,6	6,5	14,8
TiO ₂	0,49	0,50	0,89	0,42	0,52	0,15	0,39	0,31	0,47	0,54	0,53	1,44
Al ₂ O ₃	19,6	18,2	20,1	21,0	3,80	5,5	6,8	0,61	0,05	5,4	4,1	1,50
Cr ₂ O ₃	0,11	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,06	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,11
FeO	15,2	17,2	14,6	12,7	16,0	14,9	12,6	17,6	2,20	16,4	13,9	18,5
MnO	0,45	0,43	0,39	0,33	0,24	0,04	0,06	0,48	0,22	0,49	0,39	0,30
MgO	2,40	2,43	2,88	2,97	6,1	6,1	6,2	2,56	0,76	1,31	2,30	2,12
CaO	24,7	26,0	20,6	20,6	17,2	17,2	21,9	32,0	1,51	26,3	25,3	22,8
Na ₂ O	0,28	0,20	0,20	1,54	3,67	3,86	5,4	5,7	14,3	1,42	5,8	1,35
K ₂ O	0,02	0,12	<0,02	0,80	0,14	0,14	1,09	5,0	15,5	2,46	3,68	0,80
P ₂ O ₅	0,11	0,06	<0,02	0,24	0,22	<0,02	0,24	3,86	5,2	1,16	2,42	0,21
Сумма	99,96	99,84	99,96	99,90	99,99	100,09	100,04	69,69	41,11	65,08	64,92	63,93

Примечание. Gt — гранат, Cpx — клинопироксен, Crb — карбонат; числами у символов минералов обозначены различные зоны образца: 1 — центральная часть, 2 — крупнозернистый пояс возле алмазита, 3 — алмазит и мелкозернистый материал.

* Микрозондовый анализ по площади 36 × 36 мкм².

Таблица 3.

**Фазовые отношения чагатайской карбонатитовой породы (обр. 23)
при 7 ГПа и высоких температурах**

№ образца	$T, ^\circ\text{C}$	Время выдержки, мин	Фазы	Равновесная ассоциация карбонатита
1/881	1815	20	Gl, Sulph	L
»	(1700)	»	Gl, Cpx	L + Cpx
»	(1600)	»	Gl, Cpx, Gt	L + Cpx + Gt
»	(1500)	»	Gl, Cpx, Gt, Crb	L + Cpx + Gt + Crb
»	(1400)	»	Cpx, Gt, Crb (Calc)	Cpx + Gt + Calc
1/883	1650	45	Gl, Cpx, Gt	L + Cpx + Gt
1/882	1580	80	Gl, Cpx, Gt, Sulph, SiO ₂ , Carb	L + Cpx + Gt
1/885	1550	210	Gl, Cpx, Gt, Qtz	L + Cpx + Gt + Qtz
1/884	1500	65	Cpx, Gt, Qtz, Carb	Cpx + Gt + Carb + Qtz

Примечание. Gl — стекло, Gt — гранат, Calc — кальцит, Cpx — клинопироксен, Crb — карбонат, L — расплав, Qtz — кварц, Sulph — сульфид.

клинопироксена и граната формируется при 1620 °С, а полная кристаллизация контролируется квази-инвариантной эвтектической ассоциацией клинопироксен + гранат + кальцит + расплав (при 1480—1510 °С). Субсолидусные равновесные отношения представлены ассоциацией клинопироксен + гранат + кальцит [8]. Условия экспериментов и их результаты при высоких давлениях, выполненных для обр. 23 карбонатита в условиях температурного градиента и в изотермических условиях, приведены в табл. 3.

Образец 1/881 находился в условиях существенного осевого температурного градиента; значения температуры, приведенные в скобках (см. табл. 3), оценены по известной фазовой диаграмме [8]. Полное плавление карбонатита наблюдается в высокотемпературной зоне образца (1730—1815 °С). В процессе закалки формируется карбонат-силикатное стекло (рис. 8, 9) в основном гомогенное, и только вблизи ликвидусной температуры обнаруживается дендритная закалочная кристаллизация. Условия ликвидуса соответствуют резкой округлой границе (см. рис. 8,а). Наиболее существенным является то, что отсутствуют признаки карбонат-силикатной жидкостной несмесимости для чагатайского карбонатита в состоянии полного плавления при 7 ГПа. Этот эффект имеет важное значение не только для характеристики алмазообразующих карбонатно-силикатных расплавов, но также для мантийных карбонатитовых магм, показывая, что карбонатные и силикатные расплавы полностью смесимы при *PT*-условиях стабильности алмаза. Еще одна специфическая особенность многокомпонентных материнских расплавов при формировании алмаза обнаруживается в этом же образце, а именно, жидкостная несмесимость карбонатно-силикатного и сульфидного расплавов (более подробные детали имеются в работе [15]). Распределение температуры в образцах 1/882 (рис. 10), 1/883 (рис. 11), 1/884 (рис. 12, 13) практически однородно.

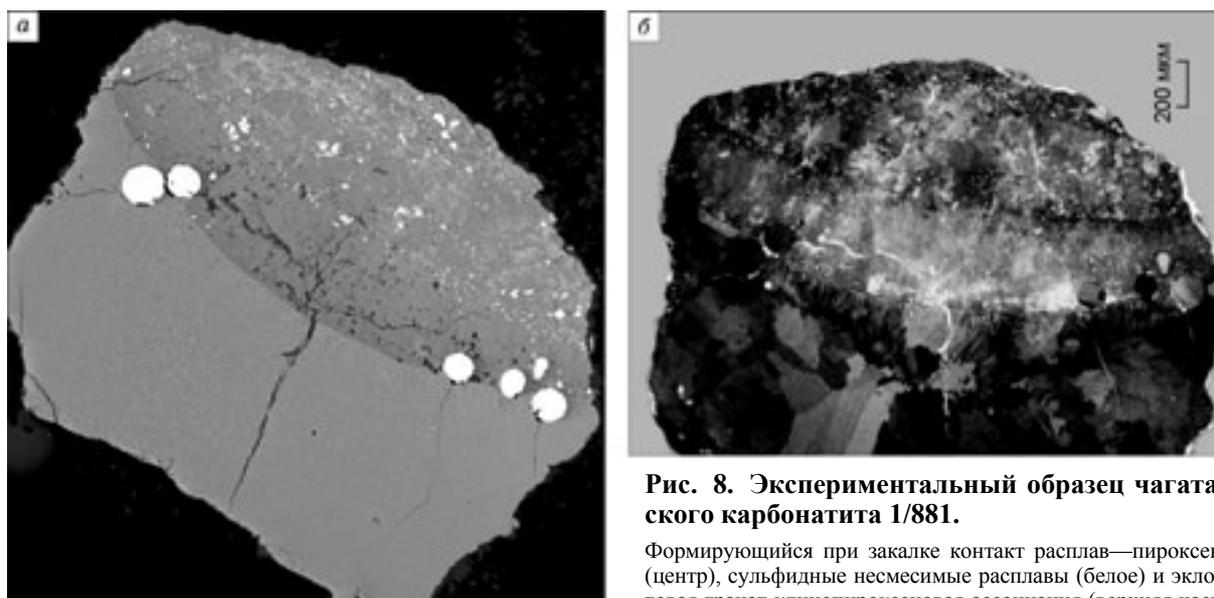


Рис. 8. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/881.

Формирующийся при закалке контакт расплав—пироксенит (центр), сульфидные несмесимые расплавы (белое) и эклигитовая гранат-клинопироксеновая ассоциация (верхняя часть). а — картина BSE; б — под микроскопом с х поляризаторами.

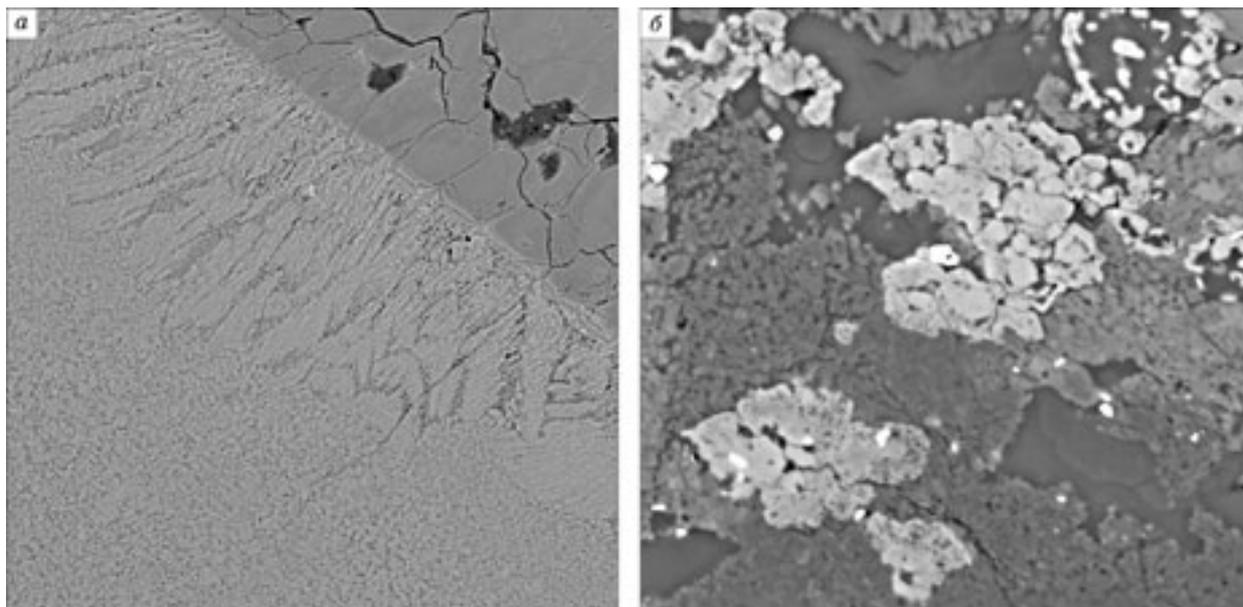


Рис. 9. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/881.

a — вид на ликвидусные отношения клинопироксенита (верхний правый угол) на контакте с карбонатной жидкостью после закалки. Картина BSE. Ширина снимка 250 мкм. *б* — детали фазовых отношений ассоциации гранат (светло-серый)—клинопироксен (серый)—карбонат (темно-серый). Ширина снимка 77 мкм.

Составы фаз. Составы карбонатно-силикатных расплавов и твердых фаз для экспериментальных образцов даны в табл. 2 и 4. Содержание SiO_2 в расплавах, сосуществующих с гранатами и клинопироксенами, находится между 1 и почти 30 мас.%; все другие элементы содержатся также в переменных количествах. С возрастанием содержания SiO_2 в расплавах обр. 979 количества TiO_2 , Al_2O_3 , FeO и MgO уменьшаются, тогда как концентрации щелочей и P_2O_5 возрастают. В большинстве случаев карбонатитовые расплавы в обр. 979 неоднородны и характеризуются субсолидным разделением на части, обогащенные Са и щелочами. Закаленные расплавы в обр. 1/881 и 1/883 имеют обогащенные щелочами

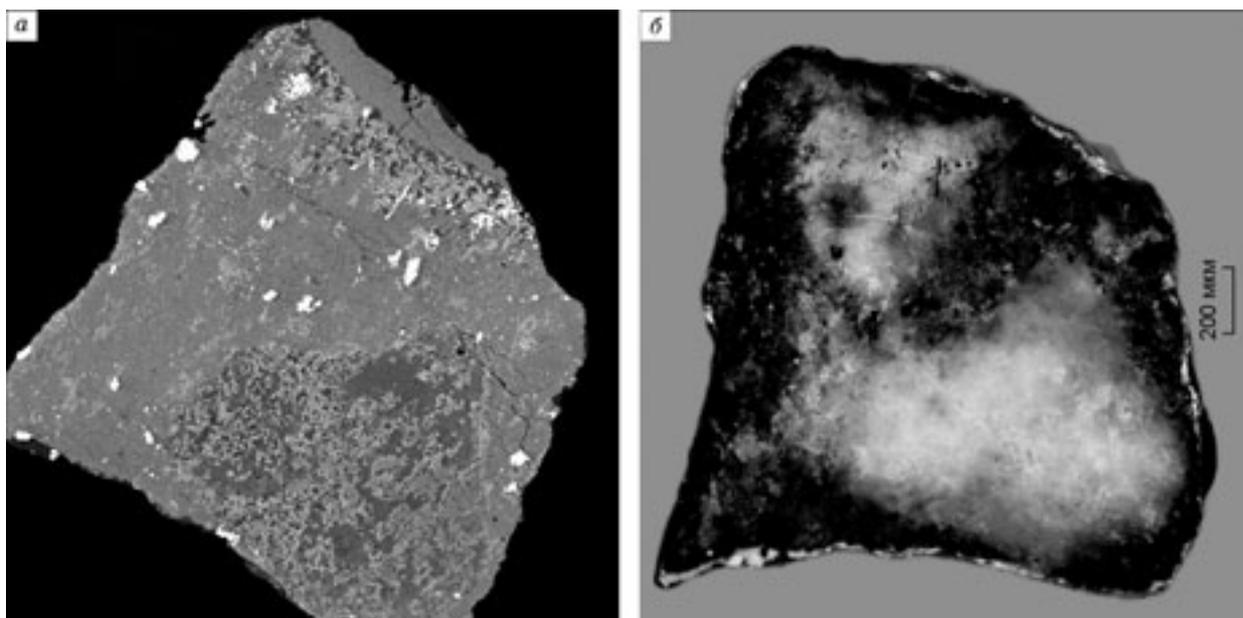


Рис. 10. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/882.

Неоднородное распределение фаз. Обогащенные гранатом и карбонатом гнезда (темно-серые пятна в нижней и самой верхней частях на рис. *a*) в обогащенной клинопироксеном матрице. Сульфиды (белое на рис. *a*) не сегрегированы подобно несмесимым жидкостям в обр. 1/881. *a* — картина BSE; *б* — под микроскопом с х поляризаторами.

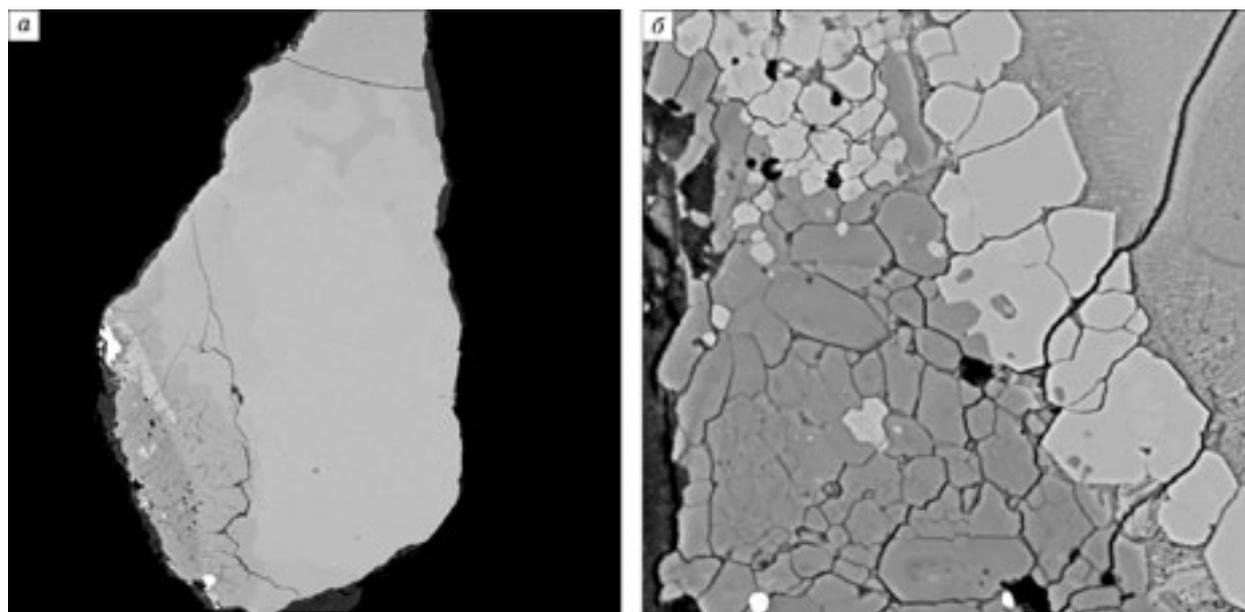


Рис. 11. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/883.

a — большая часть образца очень однородная и микрокристаллическая (закаленный расплав), *б*, слева — кристаллическая, состоящая из граната (светло-серое) и клинопироксена (серое). Картина BSE. Ширина снимка 116 мкм.

Таблица 4. Электронные микронзондовые анализы фаз из экспериментальных образцов чагатайских карбонатитов, содержащих расплавы (мас.%)

Оксид	Срх1	Срх2	Срх3	Срх м	Срх ом	Gt1	Расплав	
Обр. 1/881								
SiO ₂	53,0	53,7	52,8	52,6	50,2	38,3	23,0	
TiO ₂	0,09	0,22	0,86	0,15	0,21	0,22	0,56	
Al ₂ O ₃	15,0	14,4	4,31	10,2	3,27	18,5	4,29	
Cr ₂ O ₃	<0,02	0,16	0,12	<0,02	0,04	0,09	0,19	
FeO	7,4	7,5	13,6	10,7	16,8	18,9	9,4	
MnO	0,02	0,12	0,2	0,38	0,49	0,39	0,17	
MgO	4,43	5,2	6,4	4,7	5,5	3,27	2,18	
CaO	13,2	14,0	16,6	13,6	17,0	19,8	29,5	
Na ₂ O	6,2	5,6	5,0	5,6	3,80	0,04	2,82	
K ₂ O	0,07	<0,02	0,13	0,04	0,07	—	1,50	
Сумма	99,41	100,90	100,04	97,97	97,38	99,51	73,61	
Обр. 1/882								
	Срх1	Срх2	Срх3	Срх м	Срх м	Gt1	Gt2	Gt3
SiO ₂	53,6	54,2	54,1	53,8	51,7	38,1	39,1	37,7
TiO ₂	0,67	0,24	0,18	0,14	0,49	1,09	1,01	1,10
Al ₂ O ₃	12,0	11,1	11,7	9,2	8,2	19,9	19,6	17,8
Cr ₂ O ₃	<0,02	0,05	<0,02	<0,02	<0,02	0,04	0,17	<0,02
FeO	8,9	9,5	9,6	11,2	13,2	14,1	16,3	19,1
MnO	0,07	<0,02	0,39	0,19	0,26	0,21	0,63	0,82
MgO	4,99	4,87	5,1	5,4	5,3	1,69	2,14	2,97
CaO	13,0	13,2	13,6	14,8	15,8	23,3	21,9	19,9
Na ₂ O	6,1	6,5	5,8	5,5	4,50	0,42	0,27	0,18
K ₂ O	0,06	0,11	0,18	0,23	0,27	—	—	—
Сумма	99,39	99,77	100,65	100,46	99,72	98,85	101,12	99,57

Оксид	Срх1	Срх2	Срх3	Gt1	Gt2	Gt3	Расплав 1	Расплав 2
Обр. 1/883								
SiO ₂	52,0	51,3	52,4	39,2	38,8	39,6	27,4	27,8
TiO ₂	0,23	0,38	0,28	0,54	0,51	0,51	0,53	0,61
Al ₂ O ₃	13,4	11,7	11,5	21,3	20,9	21,6	5,9	5,8
Cr ₂ O ₃	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0,07
FeO	7,9	9,2	10,2	12,7	13,5	14,7	9,4	9,7
MnO	0,04	0,29	0,12	0,74	0,43	0,35	0,19	0,13
MgO	5,6	5,2	5,1	4,08	3,80	3,13	2,62	2,97
CaO	15,5	15,2	15,3	21,4	21,1	21,6	29,0	28,6
Na ₂ O	4,98	5,2	5,4	0,36	0,38	0,23	2,37	2,52
K ₂ O	<0,02	0,12	0,15	—	—	—	0,75	0,82
Сумма	99,67	98,59	100,45	100,32	99,42	101,72	78,16	79,02
Обр. 1/884								
	Срх1	Срх2	Срх3	Gt1	Gt2	Gt3	Gt4	
SiO ₂	54,9	54,6	53,3	39,3	39,4	38,0		38,0
TiO ₂	0,27	0,39	0,61	0,98	0,93	1,65		2,34
Al ₂ O ₃	12,0	11,0	7,4	20,6	20,2	18,3		16,1
Cr ₂ O ₃	<0,02	<0,02	0,06	<0,02	<0,02	<0,02		0,11
FeO	8,4	9,4	12,8	16,5	18,0	19,8		23,3
MnO	0,28	0,07	0,12	0,88	1,00	0,90		0,50
MgO	5,4	5,2	5,4	2,22	2,71	2,41		2,43
CaO	12,7	13,3	15,2	20,0	19,6	19,2		17,2
Na ₂ O	6,6	6,1	5,1	0,61	0,31	0,10		0,73
K ₂ O	0,12	0,08	0,02	—	—	—		—
Сумма	100,67	100,14	100,01	101,09	102,15	100,36		100,71
Обр. 1/885								
	Срх1	Срх2	Срх3	Gt1	Gt2	Gt3	Gt4	
SiO ₂	53,2	53,7	54,2	39,4	38,3	37,9		38,0
TiO ₂	0,24	<0,02	0,33	1,07	0,60	0,65		1,46
Al ₂ O ₃	13,3	12,6	12,6	20,1	21,0	20,0		18,3
Cr ₂ O ₃	<0,02	0,03	0,07	<0,02	<0,02	<0,02		0,02
FeO	7,2	8,3	9,6	14,5	15,4	16,8		19,4
MnO	0,22	0,23	0,07	0,53	0,43	0,80		0,73
MgO	5,1	5,3	4,8	2,72	2,21	2,52		2,12
CaO	13,5	13,8	13,9	22,2	21,8	20,4		19,5
Na ₂ O	6,1	6,6	5,6	0,24	0,46	0,27		0,49
K ₂ O	0,07	0,08	0,06	—	—	—		—
Сумма	98,93	100,64	101,23	100,76	100,20	99,34		100,02

Примечание. м — мало, ом — очень мало.

карбонатитовые составы и являются определенно гомогенными. Эти образцы отличаются химическими составами расплавов, которые в обр. 1/883 немного богаче SiO₂, чем в обр. 1/881. В обоих случаях расплавы обогащены CaO (~29 мас.%), FeO (~9,5), Na₂O (~2,5) и обеднены Al₂O₃ (4—6) и MgO (2—3 мас.%).

Гранаты в обр. 979 очень богаты CaO и химически неоднородны в отношении FeO и CaO, которые варьируют от 12,7 до 17,2 и от 20,6 до 26 мас.% соответственно. Эти гранаты содержат Na (0,2—0,28 мас.% Na₂O) и, возможно, некоторое количество K. Клинопироксены также химически неоднородны: содержа-

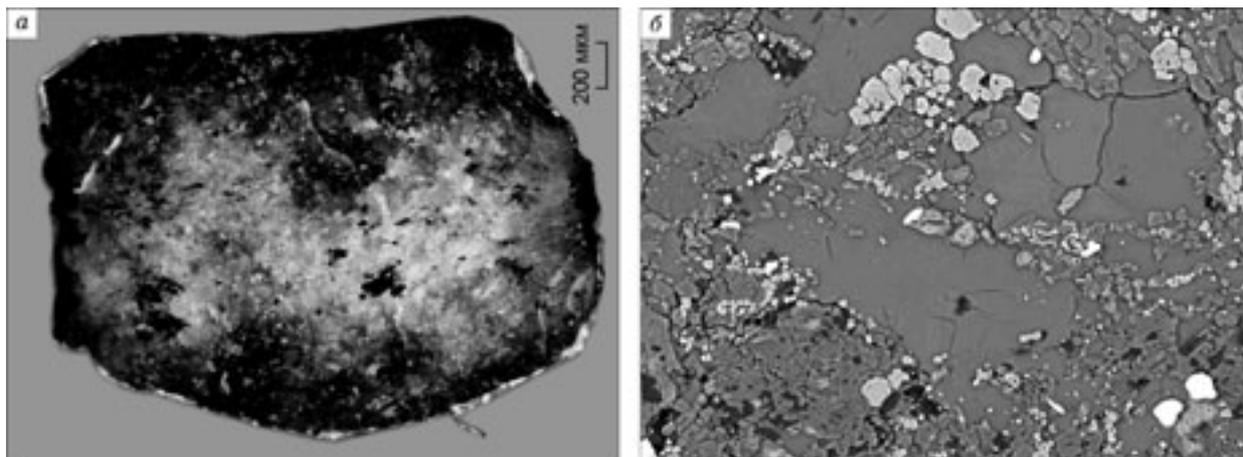


Рис. 12. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/884.

a — центральная часть обогащена клинопироксеном (зеленое) и окружена ассоциацией, богатой гранатом (красноватое); под микроскопом с *x* поляризаторами. *б* — типичные текстуры с гранатом (светло-серое), клинопироксеном (серое), кварцем (темно-серое) и большими зернами карбоната (серое). Картина BSE, ширина снимка 208 мкм.

ния FeO, CaO и Na₂O находятся в пределах 12,6—16, 17,2—21,9 и 3,7—5,4 мас.% соответственно. Клинопироксены содержат некоторые количества Al₂O₃ (3,8—6,8 мас.%) и K₂O (0,14—1,09 мас.%).

Гранаты в обр. 1/881—1/885 также богаты CaO (17,2—23,3), FeO (12,7—19,8) и TiO₂ (0,22—2,34) и всегда содержат Na₂O (0,04—0,73 мас.%). Клинопироксены обогащены Na₂O (3,8—6,6), Al₂O₃ (4,3—15,0) и FeO (7,2—16,8 мас.%), а также содержат переменные количества K₂O (≤0,27 мас.%).

ПРИЛОЖЕНИЕ К ГЕНЕЗИСУ ПРИРОДНЫХ АЛМАЗИТОВ

Физико-химический механизм формирования алмазов и алмазитов в экспериментальных карбонатит-углеродных расплавах может быть определен следующим образом. В условиях термодинамической стабильности алмаза стартовый графит сохраняется как метастабильная фаза. При температурах, превы-

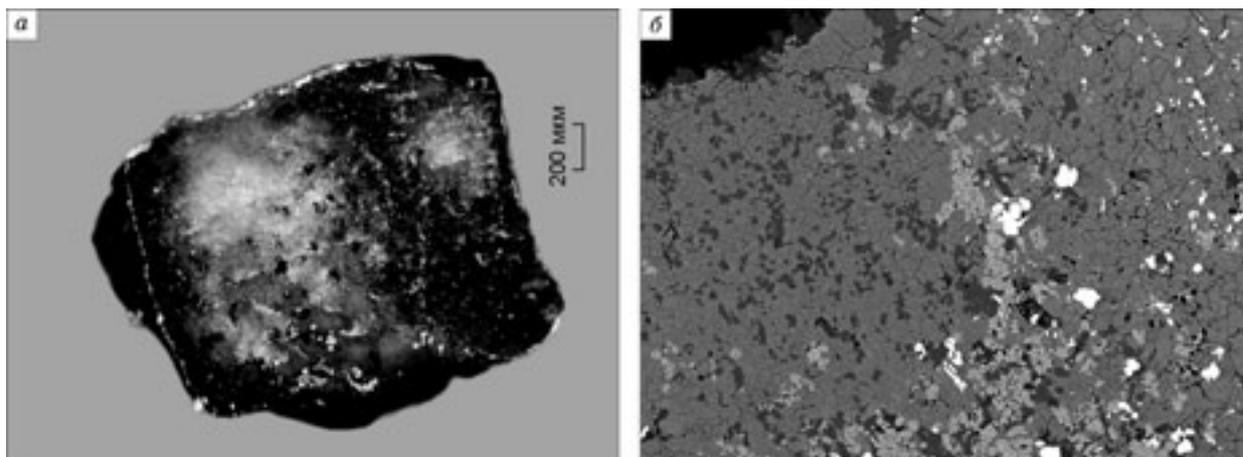


Рис. 13. Экспериментальный образец чагатайского карбонатита 1/884.

a — видны минеральные ассоциации, обогащенные гранатом (красноватое) или клинопироксеном (зеленое) или закалочной фазой карбонатитового расплава (нижняя часть); под микроскопом с *x* поляризаторами. *б* — типичные текстуры с гранатом (светло-серое), клинопироксеном (серое) и кварцем (темно-серое). Картина BSE, ширина снимка 830 мкм.

шающих температуры эвтектического плавления карбонатно-силикатных систем, такой метастабильный графит растворяется в образовавшихся расплавах, в результате формируются карбонатно-силикатные расплавы-растворы углерода. Как термодинамически метастабильная фаза графит характеризуется более высокой растворимостью в карбонатитовых расплавах, чем алмаз в одних и тех же физических условиях. Поэтому растворение графита приводит к формированию расплаво-растворов углерода, которые автоматически являются пересыщенными по отношению к алмазу. Именно пересыщение углеродом карбонат-силикат-углеродного расплава является ответственным за нуклеацию и рост кристаллов алмаза [16]. Исследование механизма формирования алмазита показывает, что главной движущей силой этого процесса является разница растворимостей метастабильного графита и алмаза в карбонатитовом расплаве [10]. Интенсивное растворение графита в контакте графит—расплав и формирование сильно пересыщенных растворов углерода ведет к спонтанной нуклеации алмаза с очень высокой плотностью распределения зародышей (около $1 \cdot 10^5$ зародышей/мм³) и формированию тонкого поликристаллического зародышевого слоя в контакте карбонатного расплава и графита. Затем быстрый перенос растворенного углерода к такому алмазному зародышевому слою сквозь тонкую (менее чем 100 мкм) пленку карбонатитового раствора-расплава и лавинообразное формирование алмазита происходят одновременно.

Любая современная концепция химического состава материнских сред для нуклеации и роста кристаллов алмаза должна учитывать главную роль, которую играют многокомпонентные карбонатно-силикатные расплавы. Эти расплавы эффективно растворяют углерод из мантийных источников. Целесообразно различать главные и второстепенные (или примесные) компоненты в составе материнских расплаво-растворов [17]. Карбонатные и силикатные компоненты вносят главный вклад в составы природных карбонатно-силикатных расплаво-растворов. Второстепенные компоненты разнообразны: оксиды, фосфаты, сульфиды, галоиды, оксид углерода, вода и другие.

Химический состав природных материнских сред, обеспечивающих нуклеацию и кристаллизацию алмазитов в условиях мантии Земли, имеет ключевое значение для раскрытия генезиса алмазитов. Проблема источника углерода для алмазитов важна в геохимическом смысле, но представляется не главной и не критической в принципиальном отношении для формирования алмаза. Более важным является необходимость образования высоких степеней пересыщения углеродом по отношению к алмазу в материнских алмазообразующих расплавах, независимо от того, что является источником углерода. Элементарный углерод в виде графита и аморфных фаз присутствует в мантийных ксенолитах. Вероятно, в мантии имеются большие количества CO, CO₂ и CH₄, которые можно рассматривать в качестве потенциальных источников углерода в сильно восстановительных условиях [19]. Проблема источника углерода для формирования природных алмазитов остается на уровне „астеносферного“ или „мантийного“ углерода [5, 18]. Идея „астеносферного“ углерода представляется более предпочтительной. Необходимо отметить, что карбонатный расплав и графит, находящиеся в тесном контакте, химически устойчивы в процессах формирования алмаза и алмазита в условиях высоких давлений и температур. Карбонат не восстанавливается и графит не окисляется, т. е. эта пара карбонат—твердый углерод действует как кислородный буфер для главных компонентов алмазообразующего процесса.

Карбонатно-силикатные расплавы чагатайских карбонатитов интересны в отношении экспериментального моделирования материнских сред для алмазитов, так как в них представительно содержатся как главные (карбонаты и силикаты), так и наиболее важные второстепенные (сульфиды, оксиды, самородные металлы и др.) компоненты природных материнских сред. Их использование для экспериментального синтеза алмазитов дает возможность моделировать условия захвата алмазитами сингенетических минеральных включений (таких, как гранаты и клинопироксены эколгитового парагенезиса). Однако природные процессы формирования алмазитов не ограничиваются присущими чагатайским карбонатитам концентрационными отношениями CaO:FeO:MgO. Алмазиты также эффективно формировались в модельных карбонатитовых расплавах (K₂CO₃ — 27,21, Na₂CO₃ — 2,89, CaCO₃ — 26,91, FeCO₃ — 25,63, MgCO₃ — 17,5 мас.%), по данным [10], и можно ожидать положительный результат для богатых MgO карбонатитовых расплаво-растворов, которые в настоящее время исследуются экспериментально.

В экспериментах алмазиты формируются из пересыщенных растворов углерода в карбонатно-силикатном расплаве чагатайского карбонатита. Источником углерода для образования таких растворов является графит. При высоких давлениях, в *PT*-условиях стабильности алмаза, карбонаты плавятся конгруэнтно, без разложения на оксиды и двуокись углерода, как при атмосферном давлении. Карбонатные компоненты полностью смесимы с силикатными в карбонатно-силикатных расплавах. В ходе эксперимента кристаллизация алмаза сопровождается формированием сингенетических силикатных минералов (граната и клинопироксена) из тех же карбонатно-силикатно-углеродных расплаво-растворов. Кристаллизация карбонатов (кальцит или арагонит) вместе с гранатом и клинопироксеном происходит при более низких температурах накануне полного затвердевания системы при температуре солидуса. Соответственно, первичные твердые включения в алмазитах представляют сингенетические фазы, которые кристаллизуются вместе с алмазитами из тех же карбонатитовых (карбонатно-силикатно-углеродных) рас-

плавов. Алмазиты, образовавшиеся в чагатайских карбонатно-силикатно-углеродных расплавах, содержат затвердевшие части карбонатитового материнского расплава, включая гранат, клинопироксен, карбонаты, а также и акцессорные минералы (сульфиды, фосфаты, самородные металлы и др.).

Экспериментальные данные демонстрируют, что Са-эклогитовые гранат и клинопироксен являются сингенетическими с алмазитами. Эти результаты поддерживают то, что природные алмазиты и силикатные включения в них генетически связаны [1, 2, 20]. Экспериментальная ассоциация высокого давления для обоих чагатайских карбонатитов (обр. 23 и 79) аналогична железистым карбонатным эклогитам, состоящим из клинопироксена, граната и карбонатов. Ликвидусной фазой является либо гранат (обр. 79), либо клинопироксен (обр. 23). Клинопироксен во всех случаях имеет состав железистого омфакита, что выходит за пределы составов, которые наблюдаются в природных ассоциациях с алмазами [21]. Он содержит К вследствие своего образования при высоких давлениях [22]. Сосуществующий гранат характеризуется гроссуляр-альмандиновыми составами, которые также выходят за пределы составов гранатов из природных ассоциаций с алмазом [23]. Гранат содержит Na, что согласуется с его формированием при высоком давлении. Большая часть гранатов не содержит избыточный Si, что можно было бы ожидать для мэйджеритового компонента твердых растворов, формировавшихся при высоком давлении [24].

Составы фаз в наших экспериментах переменны и изменяются в зависимости от степени кристаллизации образца. Тем не менее сосуществующие гранаты и клинопироксены могут дать определенное понимание распределения главных и второстепенных элементов между ними. Коэффициенты распределения (D) элементов между гранатом и клинопироксеном в экспериментальном обр. 979 (см. табл. 2) и природных ассоциациях [1, 2] подобны для TiO_2 ($D = Grt / Cpx \sim 1$), Al_2O_3 ($D \cong 3 - 6$), MnO ($D \cong 2 - 3$) и Na_2O ($D \cong 0,02 - 0,08$). Однако распределения в случаях FeO ($D \cong 1$ для экспериментальных в сравнении с $D \cong 3$ для природных ассоциаций), MgO ($D \cong 0,5$ в сравнении с $D \cong 1,3$) и CaO ($D \cong 1,4$ в сравнении с $D \cong 0,3$) не согласуются.

Сосуществующие гранаты и клинопироксены в экспериментах, выполненных с чагатайским карбонатитом обр. 23, свидетельствуют в основном о распределении элементов, которое не согласуется с распределением, обнаруживаемым в природных ассоциациях. Для TiO_2 $D = 1 - 7$ (~ 1 в природных ассоциациях), для Al_2O_3 $D = 1,6 - 5,7$ (~ 6 в природе), для FeO ($Fe_{общ}$) $D = 1,1 - 1,9$ (~ 3 в природе), для MnO $D = 0,8 - 4,4$ (в сравнении с ~ 4), для MgO $D = 0,4 - 0,9$ (в сравнении с $\sim 1,3$) и для CaO $D = 1,2 - 1,7$ (в сравнении с $0,3$ в природе). Хотя эти значения немного перекрываются в некоторых случаях, большая их часть для распределения элементов между экспериментальными минеральными парами находится далеко за пределами значений для природных ассоциаций. Лишь для Na_2O значения $D = 0,01 - 0,1$ сопоставимы с природными ($D \cong 0,02$), а в большинстве случаев экспериментальные данные для MnO перекрываются с данными для природных ассоциаций. Очевидно, эти расхождения являются следствием существенно различного химизма для железистых и богатых Са чагатайских карбонатитов в наших экспериментах и преимущественно богатых Mg и щелочами мантийными карбонатитами. Становится ясно, что необходимы эксперименты с примитивными карбонатитами, что позволит получить более точные ответы.

В алмазитах были определены первичные мантийные минералы с особенностями, позволяющими относить их к перидотитовому и эклогитовому парагенезисам [1]. Это показывает, что составы материнских сред для алмазов и алмазитов сильно изменчивы и могут также формироваться из вещества ультрабазитовых пород мантии. С другой стороны, относительные содержания карбонатных и силикатных компонентов в материнских карбонатитовых расплавах также изменчивы, о чем свидетельствуют составы первичных флюид-карбонатитовых включений в алмазах из Ботсваны [5]. Можно полагать, что алмазиты способны формироваться в материнских карбонатно-силикатных расплавах с изменчивыми химическими составами в отношении как главных, так и второстепенных компонентов подобно монокристаллическим алмазам. Представляется уместным сказать, что принципиальным моментом является то, что происхождение алмазитов обусловлено формированием предельно пересыщенных углеродом растворов в мантийных карбонатитовых (карбонатно-силикатных) расплавах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Карбонатитовый состав материнских сред, ответственных за формирование алмазитов, был обоснован данными по геохимии редких элементов в силикатных минералах из природных алмазитов [1, 2] и экспериментами при высоких давлениях и температурах по кристаллизации „карбонат-синтетических“ алмазитов в карбонатно-углеродных и карбонатно-силикатно-углеродных расплавах с природным химизмом [10, 14]. Природные карбонатиты комплекса Чагатай (Узбекистан) с высоким содержанием силикатных компонентов и эклогитовой силикатной минералогией при высоких давлениях были применены для моделирования карбонатно-силикатной среды, материнской как для алмазитов, так и для сингенетических минеральных включений в них. Эксперименты при давлении 7 ГПа и температуре

1800 °С показывают, что алмазиты быстро формировались в карбонатно-силикатных расплавах чагатайских карбонатитов с растворенным углеродом. При *PT*-условиях формирования алмазитов минералогия чагатайского карбонатита представлена гроссуляр-альмандиновым гранатом, диопсид-геденбергитовым клинопироксеном и кальцитом (арагонитом) и подобна минералогическому составу алмазоносных Саэклогитов и гроспидитов, обнаруживаемых как ксенолиты мантии в кимберлитах. Оценка физико-химического поведения чагатайского карбонатита как материнской среды для алмазита представляет интерес для условий, моделирующих в определенной степени процесс формирования природных алмазитов. Наиболее важными особенностями такого процесса являются: быстрое перемещение высокоподвижного маловязкого карбонатно-силикатного расплава в зону формирования алмазита; предельно высокая лавинообразная скорость кристаллизации алмазита из карбонатно-силикатного расплава, пересыщенного растворенным углеродом; формирование сингенетических включений граната и клинопироксена, карбоната и сульфидов. Эксперименты показывают, что образование алмазита и сингенетических включений силикатов, сульфидов, фосфатов и других минералов внутри пор и полостей алмазита сопровождается крупнокристаллической кристаллизацией подобных минералов в материнской среде, которая находится вокруг растущих алмазитов.

Авторы благодарны А.Н. Некрасову за помощь при выполнении микронзондовых анализов, Ф.К. Диваеву за предоставление образцов чагатайских карбонатитов. Эксперименты при высоких давлениях и температурах выполнялись в Институте экспериментальной минералогии РАН. Ю.А. Литвин благодарен Австрийской академии наук и Российской академии наук за финансирование сотрудничества с научной группой Музея естественной истории в Вене.

Данное исследование поддержано РФФИ (гранты № 05-05-64101 и (совместно с Министерством науки и технологии Московской обл.) № 04-05-97220), Российской академией наук (проект Президиума РАН № 27-Р по исследованиям при высоких давлениях внутреннего строения Земли и планет). Авторы очень признательны за поддержку FWF и Австрийской академии наук (Австрия), а также Венгерской академии наук и ОТКА в Венгрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kurat G., Dobosi G.** Garnet and diopside-bearing diamondites (framesites) // *Miner. Petrol.*, 2000, v. 69, p. 143—159.
2. **Dobosi G., Kurat G.** Trace element abundances in garnets and clinopyroxenes from diamondites — a signature of carbonatitic fluids // *Miner. Petrol.*, 2002, v. 76, p. 21—38.
3. **Литвин Ю.А., Жариков В.А.** Первичные флюидно-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. РАН*, 1999, т. 367, № 3, с. 397—401.
4. **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 // *Докл. РАН*, 2000, т. 372, № 6, с. 808—811.
5. **Schrauder M., Navon O.** Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1994, v. 58, № 2, p. 761—771.
6. **Djuraev A.D., Divaev F.K.** Melanocratic carbonatites — new type of diamond-bearing rocks, Uzbekistan // *Miner. deposits: processes to processing* / S.J. Stanley (ed.). Rotterdam, Balkema, 1999, p. 639—642.
7. **Литвин Ю.А., Джонс А.П., Берд А.Д. и др.** Кристаллизация алмаза и сингенетических минералов в расплавах алмазоносных карбонатитов Чагатай, Узбекистан (эксперимент при 7,0 ГПа) // *Докл. РАН*, 2001, т. 381, № 4, с. 528—531.
8. **Bobrov A.V., Litvin Yu.A., Divaev F.K.** Phase relations and diamond synthesis in the carbonate-silicate rocks of the Chagatai complex, Western Uzbekistan: Results of experiments at $P = 4-7$ GPa and $T = 1200-1700$ °C // *Geochem. Intern.*, 2002, v. 42, № 1, p. 39—48.
9. **Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.
10. **Литвин Ю.А., Спивак А.В.** Алмазиты: быстрый рост в контакте графита и карбонатных расплавов (опыты при 7,5—8,5 ГПа) // *Докл. РАН*, 2003, т. 391, № 5, с. 673—677.
11. **Литвин Ю.А.** Физико-химические исследования плавления глубинного вещества Земли. М., Наука, 1991, 312 с.
12. **Eremets M.I.** High pressure experimental methods. Oxford University Press, Oxford; New York; Tokyo, 1996, 390 p.
13. **Kennedy C.S., Kennedy G.C.** The equilibrium boundary between graphite and diamond // *J. Geophys. Res.*, 1976, v. 8, № 14, p. 2467—2470.

14. **Spivak A.V., Litvin Yu.A.** Diamond syntheses in multicomponent carbonate-carbon melts of natural chemistry: elementary processes and properties // *Diamond and Related Materials*, 2004, v. 13, p. 482—487.
15. **Литвин Ю.А., Бутвина В.Г.** Алмазообразующие среды в системе эклогит—карбонатит—сульфид—углерод по данным экспериментов при 6,0—8,5 ГПа // *Петрология*, 2004, т. 12, № 4, с. 426—438.
16. **Литвин Ю.А., Чудиновских Л.Т., Жариков В.А.** Кристаллизация алмаза и графита в мантийных щелочно-карбонатных расплавах в эксперименте при 7—11 ГПа // *Докл. РАН*, 1997, т. 355, № 5, с. 669—672.
17. **Литвин Ю.А.** Щелочно-хлоридные компоненты в процессах роста алмаза в условиях мантии и высокобарного эксперимента // *Докл. РАН*, 2003, т. 389, № 3, с. 382—386.
18. **Navon O.** Diamond formation in the Earth's mantle // *Proceedings of the 7th International Kimberlite Conference / Eds. J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson*. Cape Town, Red Roof Design, 1999, v. 2, p. 584—604.
19. **Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M. et al.** Diamond formation through carbonate-silicate interaction // *Amer. Miner.*, 2002, v. 87, p. 1009—1013.
20. **Dobosi G., Kurat G.** Silicate-bearing diamondites // *Abs. Intern. sympos. on evolution of continental lithosphere, origin of diamonds and diamond deposits (Novosibirsk, 2005, June 3—5)*, Novosibirsk, 2005, p. 102—103.
21. **Taylor L.A., Anand M.** Diamonds: time capsules from the Siberian mantle // *Chemie der Erde*, 2004, v. 64, p. 1—74.
22. **Harlow G.E.** K in clinopyroxene at high pressure and temperature: an experimental study // *Amer. Miner.*, 1997, v. 82, p. 259—269.
23. **Meyer H.O.A.** Inclusions in diamond // *Mantle xenoliths / P.H. Nixon (ed.)*. Wileys, England, 1987, p. 501—523.
24. **Moore R.O., Gurney J.J.** Pyroxene solid solution in garnets included in diamonds // *Nature*, 1985, v. 318, p. 553—555.

*Поступила в редакцию
1 июля 2005 г.*