ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА
Journal of Mining Institute
Сайт журнала: pmi.spmi.ru

Научная статья Геология

Экспериментальное моделирование снижения алмазоносности кимберлита в условиях коровых кумулятивных центров

А.В.Кузюра[1]✉, **А.В.Спивак**[1], **Г.Ю.Криулина**[2]
[1] *Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С.Коржинского РАН, Черноголовка, Россия*
[2] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

Как цитировать эту статью: Кузюра А.В., Спивак А.В., Криулина Г.Ю. Экспериментальное моделирование снижения алмазоносности кимберлита в условиях коровых кумулятивных центров // Записки Горного института. 2026. Т. 277. С. 68-80. EDN UWWLCZ

Аннотация
Предложены основные этапы химически активной истории генезиса алмазов от верхне-мантийных очагов до взрывного выброса алмазов и кимберлитового вещества из кумулятивных центров к поверхности. Работа посвящена предфинальному эпизоду генезиса алмазных месторождений – взаимодействию алмазов с карбонатно-силикатными кимберлитовыми магмами в условиях корового кумулятивного очага. Такое взаимодействие возможно, когда транспорт алмазов этими магмами с глубин мантийных коренных очагов к поверхности останавливается в комплексах пород коры с прочной кровлей. Время остывания и затвердевания кимберлитовых расплавов в таких кумулятивных центрах достаточно продолжительно для заметных потерь массы растворяющихся алмазов. Взаимодействие карбонатно-силикатных кимберлитовых расплавов с различным содержанием карбонатной составляющей с природными монокристаллическими алмазами изучено экспериментально при давлении 0,15 ГПа и температуре 1200 °С. В качестве растворителей использовались модельные карбонатные, карбонат-флюидные, природные кимберлитовые и кимберлит-флюидные системы. В условиях опытов растворители плавились, а кристаллы алмазов испытывали поверхностное растворение. Установлено, что на плоскостях роста фиксируются фигуры травления, происходит потеря алмазами массы от 3-4,5 % при выдержке 2 ч (порядок времени кимберлитового транспорта из верхне-мантийных алмазообразующих очагов в коровые кумулятивные центры) до 47,6 % при выдержке 10 сут. (в условиях коровых кумулятивных центров). Результаты демонстрируют, что растворяющая способность карбонатно-силикатных транспортирующих магм является фактором, эффективно понижающим алмазоносность кимберлитовых месторождений.

Ключевые слова
генезис алмаза; алмазоносность кимберлитов; растворение алмазов; кимберлитовые магмы; транспорт мантия – земная кора; кумулятивные коровые центры

Финансирование
Работа выполнена в рамках темы НИР ИЭМ РАН № FMUF-2022-0001.

Поступила: 30.04.2025 ***Принята: 09.10.2025*** ***Онлайн: 08.12.2025*** ***Опубликована: 27.02.2026***

Статья посвящена памяти выдающегося ученого-геохимика Юрия Андреевича Литвина, развивает его идеи, схемы и рассуждения. Авторы являются учениками и последователями ученого, высоко ценят и помнят его научные достижения в области алмазообразования и геохимии мантии Земли

Введение

На Земле известно около 2500 кимберлитовых трубок, и только 25 из них являются промышленными месторождениями алмазов, т.е. менее 2-3 % кимберлитовых трубок интересны для промышленной добычи алмазов [1]. Это необходимо учитывать при формировании государственной политики повышения эффективности в области управления минеральными ресурсами [2]. Один из главных факторов риска в формировании коренных алмазных месторождений кимберлитовых

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

трубок – растворяющая способность карбонатных и силикат-карбонатных кимберлитовых расплавов по отношению к кинетически устойчивым метастабильным алмазам [3-6]. Поэтому комплексные, минералогические и экспериментальные работы по оценке масштабов потерь алмазоносности при растворении алмазов на различных этапах не теряют своей актуальности [7-10].

По современным представлениям алмаз – полигенный минерал, образующийся в природе в различных физико-химических и геодинамических условиях [1]. На основании физико-химического подхода сочетания экспериментальных, минералогических и расчетных данных Ю.А.Литвиным предложена мантийно-карбонатитовая теория формирования природных алмазов и ассоциированных парагенных и ксеногенных минеральных фаз [7, 11]. Разработанные позже геолого-генетические модели формирования месторождений алмазов [12] опираются на опубликованную информацию об алмазоносных кимберлитовых системах и оригинальные исследования онтогенических особенностей кристаллов алмаза и находятся в согласии с указанной выше мантийно-карбонатитовой теорией. Базируясь на предложенные модели, можно выделить главные этапы происхождения кимберлитовых месторождений алмаза и их эволюции (рис.1).

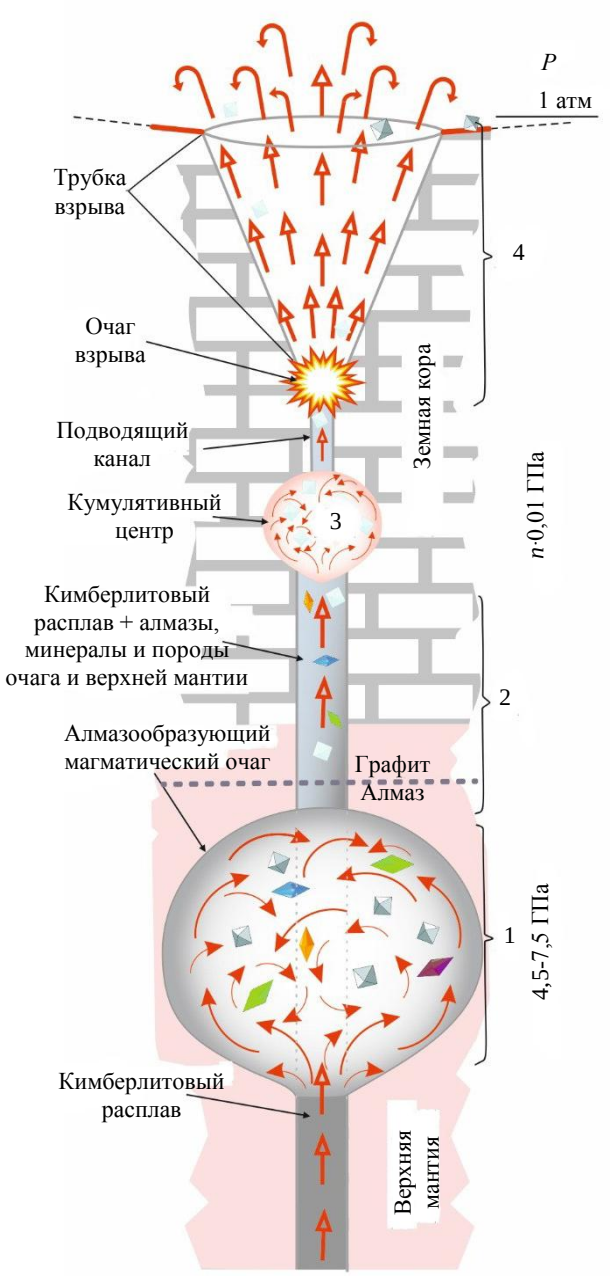


Рис.1. Схема генезиса алмазов и ассоциированных фаз и их эволюция на пути к дневной поверхности

Этапы в происхождении кимберлитовых месторождений алмаза и их эволюции

1. Первичная кристаллизация алмазов. Около 90 % алмазов образуются в субкратонной литосферной мантии [1]. Их зарождение и рост (в термодинамически стабильной форме) происходят в стационарных верхне-мантийных очагах материнских расплавов, где закладывается максимальный потенциал алмазоносности коренных алмазных месторождений кимберлитовых трубок взрыва. Образовавшиеся алмазы могут сохраняться в материнском очаге миллионы лет неизмененными или подвергшимися изменению формы в результате последующих стадий роста, частичного растворения или массопереноса [11, 13, 14].

2. Транспорт алмазов кимберлитами из мантийного очага к земной коре. Под верхнемантийным очагом сублитосферная мантия начинает плавится благодаря флюидам [15]. В условиях субконтинентального термального режима формируются метасоматизированные области, где температура повышается на несколько сотен градусов. Таким образом формируются кимберлитовые расплавы. Грани поверхности сформированных алмазов уже здесь начинают подвергаться активному воздействию высокотемпературных карбонатсодержащих кимберлитовых и ассимилированных алмазоносных расплавов, которые являются эффективными растворителями алмаза [7, 9, 14]. Стремясь к поверхности, кимберлитовые потоки выносят алмазы (с включениями) вместе с генетически ассоциированными минералами и алмазоносными породами по направлению к поверхности земной коры. Существенно карбонатный (карбонатитовый) состав жидкой составляющей кимберлитовой магмы был обоснован теоретически [3] и экспериментально [16, 17].

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Алмазы продолжают частично терять свою массу в транспортирующих карбонатсодержащих кимберлитовых расплавах за время подъема и внедрения в континентальную кору. Но эти потери относительно невелики из-за кратковременного (до нескольких часов) растворения магмами алмазов с потерями до 3,0-4,5 мас.% [7] при перемещении их в земную кору. По пути к поверхности несущая ксенолиты кимберлитовая магма может временно останавливаться, встречая на пути плотные породы и формируя временные кумулятивные центры [18, 19]. При этом скорость растворения алмазов в кимберлите увеличивается с понижением давления и ростом фугитивности кислорода, по крайней мере от 6,3 до 1 ГПа [20].

3. Финальная остановка кимберлитового потока. Может случиться окончательно в пределах земной коры, в комплексах пород с прочной кровлей. Так создаются кумулятивные центры-очаги кимберлитовых расплавов накануне кимберлитового извержения. При наименьшем давлении 0,15-0,20 ГПа и все еще высокой температуре 1200-1250 °С [12, 21] ожидаются максимально благоприятные условия для растворения алмазов, принесенных с глубин мантии.

4. Формирование кимберлитовых трубок взрыва. Большинство исследователей сходятся во мнении о взрывном происхождении диатремы в результате высвобождения растворенных в магме газов. На глубине 1,5-3 км, независимо от температуры, удельный объем растворенных воды и CO_2 резко возрастает при давлениях 0,4-0,8 кбар, в результате чего формируется очаг взрыва и, как следствие, происходит взрывной выброс сильно сжатого содержимого кумулятивного центра с образованием взрывного конуса и заполнением его кимберлитовым и перемещенными из верхней мантии и земной коры материалами. В результате мощного взрыва создаются кимберлитовые месторождения алмазов в трубках, где концентрируются сохранившиеся при частичном растворении и увлеченные взрывом алмазы [6, 9]. На этом финальном этапе мы констатируем итоговый показатель алмазоносности месторождения, но из-за неполного выноса алмазов из кумулятивных центров можно ожидать дополнительный ущерб алмазоносности.

Таким образом, одним из главных факторов рисков при формировании коренных алмазных месторождений кимберлитовых трубок взрыва является растворяющая способность карбонатных и силикат-карбонатных кимберлитовых расплавов по отношению к кинетически устойчивым метастабильным алмазам. Масштабы потерь алмазоносности при растворении могут быть определены экспериментально.

Цель настоящей работы – экспериментальное изучение взаимодействия карбонатно-силикатных расплавов с алмазами в коровых кумулятивных центрах накануне кимберлитового извержения для оценки растворяющей способности карбонатных и силикат-карбонатных кимберлитовых расплавов с приложением к разработке факторов сохранности алмазных кристаллов и определением продуктивности коренных источников алмазного сырья.

Методика проведения эксперимента

Эксперименты по исследованию растворимости метастабильного, но кинетически устойчивого алмаза выполнены на установке высокого газового давления при P = 0,15 ГПа, T = 1200 °С (ИЭМ РАН, Черноголовка). Такая температура согласуется с генетической геологической моделью и геотермическими исследованиями [12, 21]. Навеска образца-растворителя – 200 мг вместе с природным кристаллом алмаза различной формы (размером 3-4 мм и весом 30-50 мг) помещалась в Pt-ампулу диаметром 7 мм, высотой 8 мм и толщиной 0,2 мм. Температура измерялась с помощью термопары $Pt_{70}Rh_{30}$ (или $Pt_{94}Rh_{06}$) и поддерживалась автоматическим регулятором с погрешностью ±2 °С. Время выдержки экспериментов от 2 до 12 сут. Закалочное охлаждение образца от 1200 до 800 °С происходило за 1,5-2,5 мин. В качестве компонентов для растворителей алмазов использовались реактивы марки ХЧ (99,5 %): $CaCO_3$, Na_2CO_3, дигидрат щавелевой кислоты $H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O$, природный порфировый кимберлит из трубки Нюрбинская Якутской алмазоносной провинции (Кимб.Нюрб).

Для понимания полной картины растворения алмазов в сложных многокомпонентных кимберлитовых системах от существенно карбонатного до силикат-карбонатного составов в качестве растворителей в первом этапе экспериментов использованы модельные карбонатные $CaCO_3$, $(CaCO_3)_{50}(Na_2CO_3)_{50}$ и карбонатно-флюидные $(CaCO_3)_{47,5}(Na_2CO_3)_{47,5}(H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O)_5$, мас.%. Кимберлит-карбонатная смесь $(Кимб.Нюрб)_{80}(CaCO_3)_{20}$ являлась растворителем при моделировании обогащения кимберлита Са-карбонатом накануне извержения (табл.1). Для выяснения влияния

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

флюида на процесс растворения алмазов использовалась другая добавка к кимберлиту – СОН-флюид в соотношении 95:5 мас.%.

Аналитические исследования выполнялись в ИЭМ РАН. Продукты экспериментов изучали с помощью методов сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) на сканирующем электронном микроскопе Vega TS5130MM с использованием детекторов вторичных и отраженных электронов и энергодисперсионного рентгеновского детектора INCA-PentaFET для количественного анализа. РСМА исследуемых образцов выполняли при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе поглощенных электронов 0,1 нА, размере зонда 0,1 мкм. Время анализа в точке (или сканирования области анализа) составляло 70 с. В качестве эталонов для количественного анализа основных элементов использовали кварц, альбит, MgO, Al_2O_3, волластонит, а также металлы Mn, Cr, Ti, Fe.

Таблица 1

Исходные химические составы кимберлитсодержащих сред, мас.%

Система	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Cr_2O_3	Fe_2O_3	MnO	NiO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	CO_2	H_2O	ППП*	Сумма
Кимб.Нюрб	31,47	0,52	4,03	0,11	8,53	0,08	0,15	30,30	8,09	0,06	0,83	0,54			15,21	99,92
$(Кимб.Нюрб)_{80}$ $(CaCO_3)_{20}$	25,18	0,42	3,22	0,09	6,82	0,06	0,12	24,24	17,67	0,05	0,66	0,43	8,80	–	12,17	99,94
$(Кимб.Нюрб)_{95}$ $(H_2C_2O_4 \cdot 2H_2O)_5$	29,90	0,49	3,83	0,10	8,10	0,08	0,14	28,79	7,69	0,06	0,79	0,51	2,50	2,5	14,45	99,92

*ППП – потери при прокаливании при 1100 °С в течение 1 сут.

Спектры комбинационного рассеяния (КР) растворяемых кристаллов алмаза и среды-растворителя после опытов получены с помощью рамановского спектрометра Renishaw RM1000, оснащенного микроскопом Leica (длина волны излучения 532 нм, мощность 20 мВт). Спектры регистрировались при пятидесятикратном увеличении в течение 100 с. Для обработки данных использовалось ПО Fytik 1.3.1 и OriginPro 2021. Идентификация фаз включений по КР-спектрам осуществлялась с использованием ПО CrystalSleuth и базы данных RRUFF™ Project [22]. Кристаллы алмаза после опытов очищались смесью серной и азотной кислот, их промывали в спирте, затем в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне и просушивали при температуре 120 °С. Потерю алмазной массы определяли с помощью прецизионного взвешивания алмазных кристаллов, точность измерения 0,01 мг.

Экспериментальные результаты по растворению алмаза в условиях коровых кумулятивных центров

Эксперименты проводились при давлении 0,15 ГПа, температуре 1200 °С и выдержках от 2 до 12 сут. Образцы после опытов в случае кимберлитовых и кимберлит-флюидных систем представляли плотную массу с крупными и мелкими порами (5-250 мкм). Кристалл алмаза с небольшим усилием отделялся, оставляя гладкий отпечаток в закалочном материале. Карбонатные и карбонат-флюидные растворители после опытов представляли светлую полупрозрачную стекловидную хрупкую массу. Иногда при вскрытии ампулы на ее стенках можно было обнаружить сферы, вероятно, расплава (50-200 мкм). Кристалл алмаза легко извлекался из образца. Таким образом, структуры образцов могут свидетельствовать о том, что растворители плавились и кристаллы алмаза растворялись в расплавах растворителей.

Кристаллы алмаза, растворяемые в карбонатных системах, становятся более округлыми, их поверхность более сглажена и однородна, чем до опыта (табл.2). Кристаллы, побывавшие в кимберлитовых системах, приобретают большую шероховатость, пористость и кавернозность вследствие образования большого количества разноразмерных углублений (табл.3). Фотографии в табл.2, 3 представлены в режиме отраженных электронов. Для природных алмазов одним из распространенных элементов рельефа плоскогранно-кривогранных форм природного алмаза являются дитригональные и щитовидные слои на реликтовых гранях {111}. Вскрытие послойного строения кристалла (тригональные щитовидные слои) хорошо прослеживается в подопытном кристалле алмаза из опыта КС-6 (табл.3). При послойном росте алмаза и неполном формировании (недорастании) грани до ребра возникает штриховка вдоль ребер кристалла, образованная торцами октаэдрических

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

граней, – так называемая параллельная штриховка (опыт КС-12). При растворении торцов октаэдрических граней формируется сноповидная (дитригональная) штриховка. Штриховку можно наблюдать на гранях кристаллов алмаза из опытов CNF-4 и КС-12 (табл.2, 3).

Таблица 2

Условия экспериментов по растворению алмаза в карбонатных системах, потеря массы алмаза и СЭМ-фотографии кристаллов алмаза до и после растворения

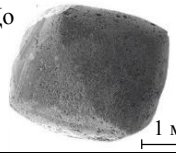
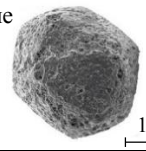
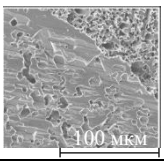
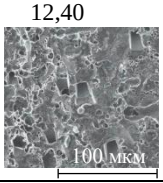
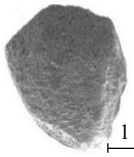
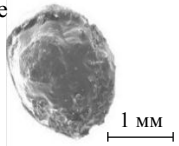
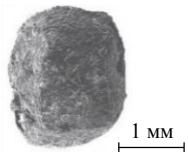
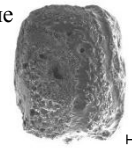
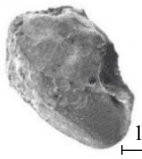
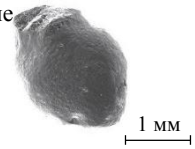
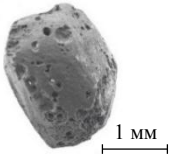
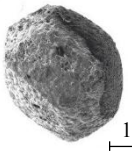
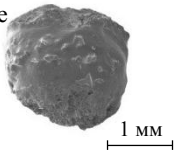
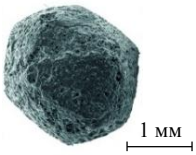
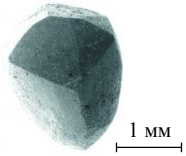
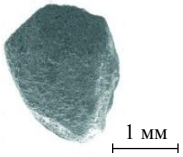
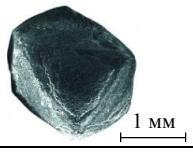
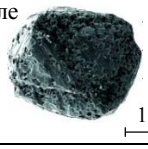
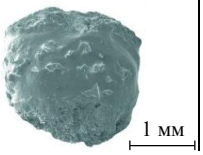
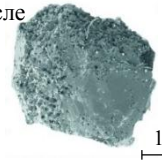
Растворитель	Номер образца/ выдержка, сут.	Потеря массы, %	Номер образца/ выдержка, сут.	Потеря массы, %
$CaCO_3$	С-2/2 До 	1,71 После 		
$(CaCO_3)_{50}(Na_2CO_3)_{50}$	CN-2/2 До 	12,40 После 	CN-4/4 До 	13,42 После 
	CN-8/8 До 	32,44 После 	CN-12/12 До 	40,00 После 
$[(CaCO_3)_{50}(Na_2CO_3)_{50}]_{95}(COH)_5$	CNF-4/4 До 	21,34 После 	CNF-12/12 До 	47,63 После 

Таблица 3

Условия экспериментов по растворению алмаза в кимберлитовых системах, потеря массы алмаза и СЭМ-фотографии кристаллов алмаза до и после растворения

Растворитель	Номер образца/ выдержка, сут.	Потеря массы, %	Номер образца/ выдержка, сут.	Потеря массы, %
$(Кимб.Нюрб)_{80}(CaCO_3)_{20}$	КС-6/6 До 	15,92 После 	КС-9/9 До 	30,51 После 
	КС-12/12 До 	47,62 После 		
$(Кимб.Нюрб)_{95}(COH)_5$	KNF-10/10 До 	58,78 После 		

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

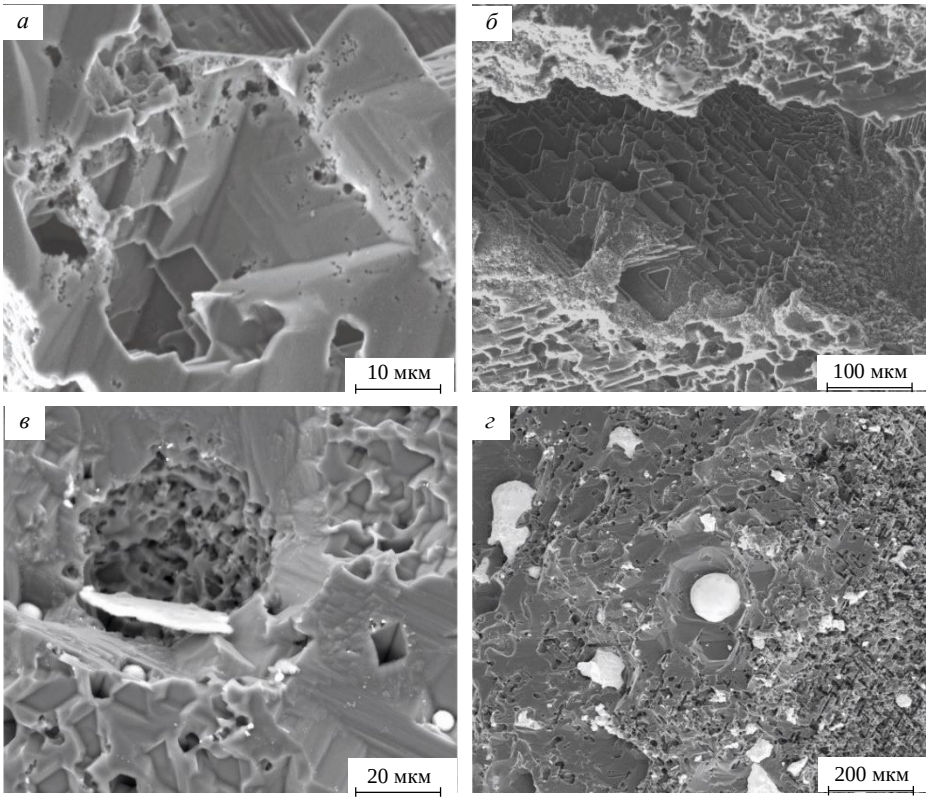


Рис.2. СЭМ-фотографии протравленных поверхностей алмаза в режиме отраженных электронов из опытов: *а* – КС-9; *б* – CN-8; в смешанном режиме отраженных и вторичных электронов из опытов: *в* – CN-4; *г* – CNF-12

Другим широко распространенным элементом рельефа на гранях {111} природных алмазов являются «отрицательные тригоны» [23]. Отрицательные треугольные фигуры можно наблюдать практически на всех кристаллах после опытов (табл.2, 3). На рис.2, *а*, *б* представлена увеличенная поверхность протравленных граней с четкими отрицательными тригонами. Хорошо прослеживаются сферы, вероятно, закаленного расплава непосредственно в пирамидах травления поверхности алмаза (рис.2, *в*, *г*). На этих же фотографиях видно, что некоторые крупные треугольные ямки с усеченными вершинами приобрели шестиугольную форму.

На рис.3, *а*, *б* представлен кристалл алмаза с мелкоямчатой протравленной поверхностью после кислотной очистки от закаленных частиц расплава-растворителя. КР-спектроскопия частично растворенных кристаллов показала присутствие пиков как самого алмаза, так и графита (рис.4), т.е. происходит поверхностная графитизация алмазов. При использовании всех видов растворителей алмаз покрывался графитовой пленкой различной толщины. На этой пленке наблюдались округлые

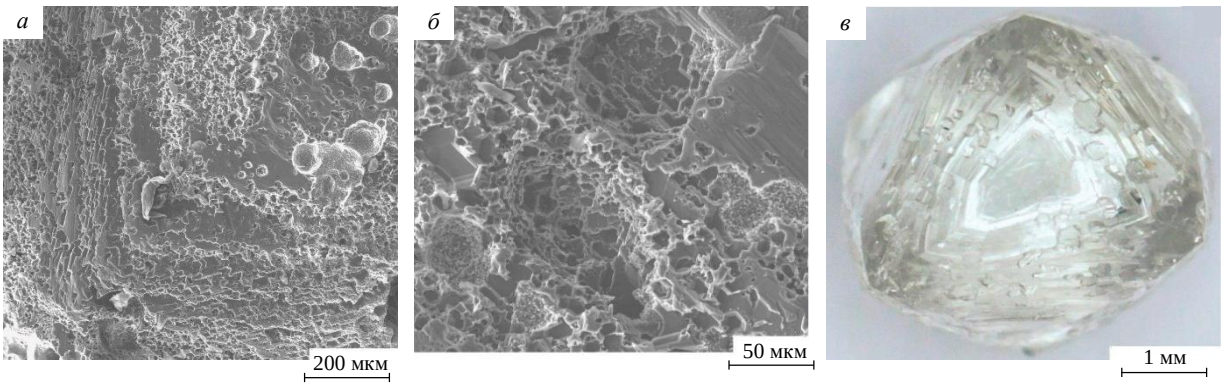


Рис.3. Мелкоямчатое травление: *а* – поверхности кристалла алмаза из опыта CN-4; *б* – природного кристалла из трубки Заполярная (Якутия, Россия); *в* – естественная коррозия природного кристалла (*б*). Фотографии сделаны с помощью оптического микроскопа в режиме отраженных электронов

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

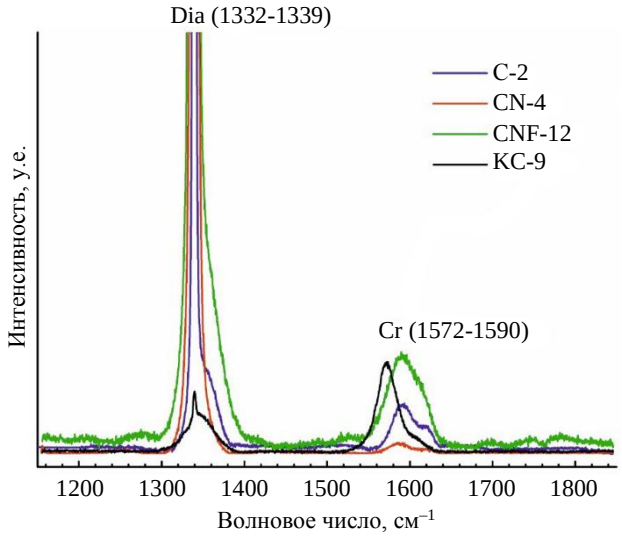


Рис.4. КР-спектры растворенных алмазов после опытов до очистки кислотами

отпечатки расплавных/флюидных пузырей (рис.5, *а*). Графит образовывал выделения сферической формы в карбонатных и карбонат-флюидных системах (рис.5, *б*). На рис.5, *г-е* продемонстрирован процесс образование «корки» на границе между алмазом и карбонатной средой. «Корка» состоит из цепочек графитовых микросфер. Образование графитовой «пыли» на растворяемом кристалле алмаза (рис.5, *в*) зафиксировано в опытах с кимберлитовым растворителем (КС-6, КС-12). Кроме того, КР-спектры алмазов из этих опытов нередко демонстрировали и пики графита, несмотря на то, что при визуальном осмотре с использованием оптического микроскопа кристаллы выглядели «условно чистыми», без графитовой пленки.

Карбонатный расплав после опытов представлял плотную белую стеклоподобную массу из закалочных дендритных кристаллов карбонатов кальция (в случае $CaCO_3$-растворителя) либо кальция и натрия (в случае смеси карбонатов $(CaCO_3)_{50}(Na_2CO_3)_{50}$) – ниерерита $Na_2Ca(CO_3)_2$, шортита $Na_2Ca_2(CO_3)_3$ и кальцита $CaCO_3$ по данным микрорентгенспектрального анализа и КР-спектроскопии (рис.6, *а*). Размеры закалочных кристаллов варьируются в широком диапазоне от 1 до 100 мкм и более. В закалочной массе наблюдаются многочисленные микропустоты, скорее всего обусловленные выходом газообразной H_2O в процессе закалки, которая так или иначе присутствует в атмосфере и связывается гигроскопичным карбонатом натрия на старте эксперимента.

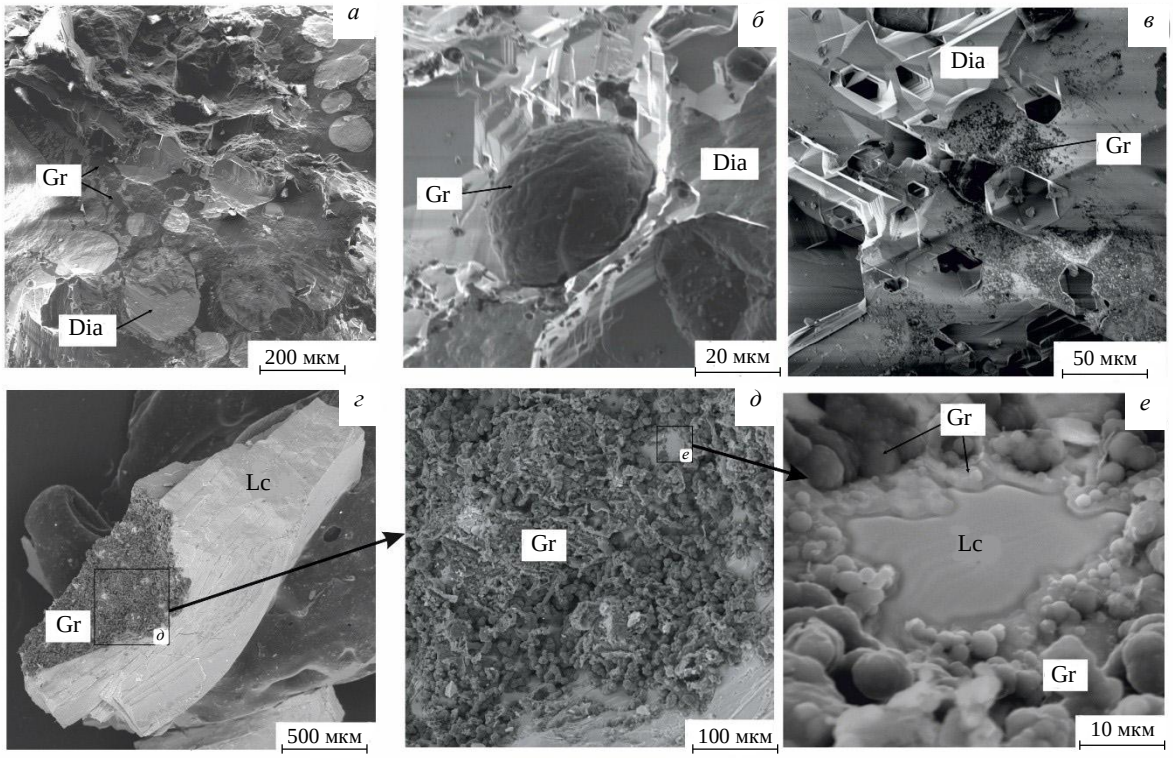


Рис.5. Образование графита: *а* – поверхность алмаза в графитовой пленке после опыта CN-4; *б* – графитовая сфера на поверхности алмаза после опыта CNF-4; *в* – графитовая «пыль» на поверхности алмаза из опыта КС-6; *г-е* – графитовая «корка» на поверхности закалочного карбонатного расплава на контакте с растворяемым алмазом после опыта CNF-4. СЭМ-фотографии образцов в режиме вторичных электронов (*а-в*), в смешанном режиме отраженных и вторичных электронов (*г-е*)

Dia – алмаз; Gr – графит; Lc – карбонатный расплав

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

В опытах с карбонат-флюидной системой $(CaCO_3)_{47,5}(Na_2CO_3)_{47,5}(COH)_5$ существенно кальциевых фаз не обнаружено, встречаются области с круглыми микропустотами в образцах, где при закалке выходили газ, H_2O и/или CO_2, содержащиеся в стартовом составе. Размеры закалочных кристаллитов – от одного до десятков микрометров.

В экспериментальных образцах системы $(Кимб.Нюрб)_{80}(CaCO_3)_{20}$ растворители в процессе опытов в большинстве своем были гетерогенны: расплав ± твердая фаза (оливин, клинопироксен, кальцит) ± флюид (CO_2, H_2O). Основная масса кимберлитового растворителя во всех опытах после закалки представлена почти изометричными сферическими закалочными образованиями размером в поперечнике 5-25 мкм, конформно прилегающими друг к другу по типу подушечных лав. Закаленный расплав в таких «подушках» занимает 75-80 % образца, он однороден (в основном также встречаются мелкозернистые участки) с составом Ca-карбонат-силиката и расчетным содержанием CO_2 15-22 мас.%. Объемные (рельефные) соотношения фаз хорошо проявлены на неполированных сколах образцов. Наличие крупных пор и каналов свидетельствует о присутствии флюида в расплаве в ходе опыта и высвобождении его в процессе закалки. Кроме того, в основной массе встречаются отпечатки пузырей, состоящие из Ca-карбонат-силикатных стекол.

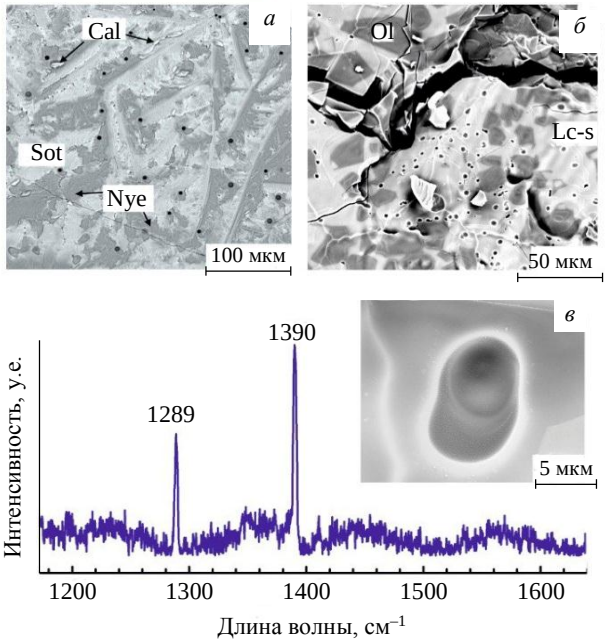


Рис.6. Образование микропустот в образцах после опытов из-за выхода газообразных H_2O и/или CO_2: *а* – опыт CN-8; *б* – опыт KNF-10; *в* – газовый CO_2-пузырь в опыте (*б*) в закалочном кимберлитовом расплаве и его КР-спектр. СЭМ-фотографии в режиме вторичных электронов

Ol – оливин; Cal – кальцит; Nye – ниererит; Sot – шортит; Lc-s – карбонатно-силикатный расплав

В экспериментальном образце системы $(Кимб.Нюрб)_{95}(COH)_5$ также зафиксировано образование в *PT*-условиях опыта смесимого однородного карбонат-силикатного вещества, предположительно, расплава (рис.6, *б*) и силикатных минералов – оливина размером 20-100 мкм и клинопироксена до 400 мкм. Следует отметить, что опыт KNF-10, представляющий кимберлит-флюидную систему, был единственным удачным экспериментом из серии. В остальных опытах с этим составом герметично заваренные ампулы не выдержали длительной выдержки и взорвались вследствие большого количества свободного флюида. Об этом свидетельствует обилие пор (пузырей) в закаленной массе. По данным КР-спектроскопии, в закрытом пузыре зафиксирован газообразный CO_2 (рис.6, *в*).

Условия опытов и потеря массы алмаза показаны в табл.2, 3 и суммированы на графике (рис.7). Наименьшая потеря алмазами массы (1,7 %) зафиксирована в Ca-карбонатных расплавах при выдержке 2 сут. В случае использования Ca,Na-карбонатного растворителя потеря массы алмаза происходит от 12,40 до 39,97 % при выдержке от 2 до 12 сут. Потери массы алмаза при выдержках 10 и 12 сут. практически одинаковы. С добавлением в карбонатную систему 5 % флюида его влияние отмечается только при длительности

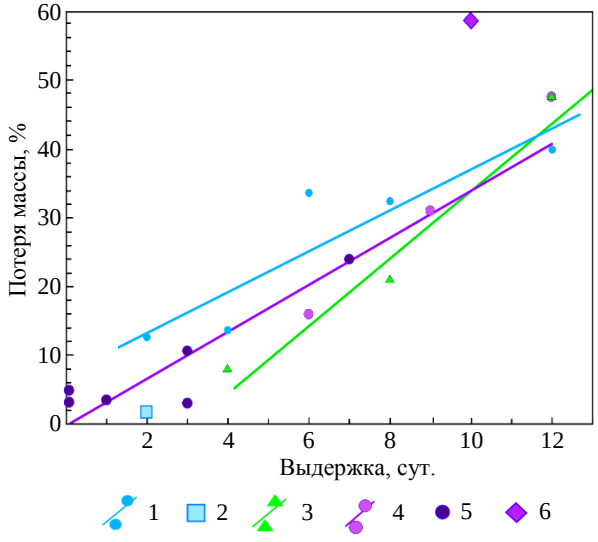


Рис.7. Зависимость массы алмазов при их растворении в карбонатных, карбонат-флюидных, кимберлитовых и кимберлит-флюидных растворителях от времени растворения при P = 0,15 ГПа, T = 1200-1250 °С

1 – $(CaCO_3)_{50}(Na_2CO_3)_{50}$; 2 – $CaCO_3$; 3 – $(CaCO_3)_{47,5}(Na_2CO_3)_{47,5}(COH)_5$; 4 – кимберлит трубки Нюрбинская; 5 – кимберлит трубки Нюрбинская по [7]; 6 – $(Кимб.Нюрб)_{95}(COH)_5$

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

выдержки 12 сут., потеря массы в карбонат-флюидном расплаве составляет 47,63 %, что на 7,66 % больше по сравнению с потерей в «сухом» карбонатном расплаве. В опытах с кимберлитом в качестве растворителя потери массы алмаза составили от 15,92 % при выдержке 6 сут. и до 47,62 % при выдержке 12 сут. Максимальные потери до 58,79 % при выдержке 10 сут. зафиксированы в кимберлит-флюидном растворителе. Отметим, что при выдержке 12 сут. потери массы алмазами в карбонатных, карбонат-флюидных и кимберлитовых растворителях приобретают очень близкие значения.

Обсуждение результатов

Настоящее экспериментальное исследование по растворению алмаза в карбонатных и кимберлитовых расплавах в присутствии флюида или сухих системах демонстрирует, что в условиях земной коры, а точнее корового кумулятивного очага кимберлитового расплава (P = 0,15 ГПа и T = 1200 °С с различной карбонатной составляющей) возможно растворение привнесенных кристаллов алмаза в значительной степени – до 47,6 % при выдержке 10 сут.

Опыты показали, что в условиях корового кумулятивного центра кимберлитовые, кимберлит-флюидные, карбонатные, кимберлит-карбонатные смеси плавятся с образованием расплава, который и является главным актором растворения алмазов в кумулятивном очаге. Плавление растворителей можно диагностировать как по структурным, так и по аналитическим признакам. Образование сфер карбонатного состава в пирамидках растворения на поверхности алмаза, округлых пор в плотном, но хрупком карбонатном материале, потеря массы алмазом могли происходить только в расплаве.

По оценкам на основе экспериментальных данных, температура первичного плавления на солидусе многокомпонентных кимберлитов варьируется от 800 до 1100 °С при давлении от 0,1 до 0,2 ГПа. Большое количество округлых пор, каналов, химический состав однородного цемента между округлыми зернами оливинов, структура закалочных образцов подтверждают факт плавления. Кимберлит-карбонатная смесь также плавилась и образовывала однородные карбонат-силикатные расплавы, превращаясь при закалке в стекла с порами и отпечатками пузырей освобождающегося газа, в отличие от щелочно-карбонат-силикатного расслоения при 0,2 ГПа и 1100-1250 °С [24].

При растворении в расплавах растворителей происходило изменение морфологии алмазов с появлением характерных форм растворения. Мелкоямчатое травление кристаллов алмаза в эксперименте напоминает «коррозию» в случае природных образцов (см. рис.3, *в*). Она может проявляться в виде отдельных участков на кристалле или покрывать область на поверхности тонкой сеткой. Параллельная штриховка (опыт КС-12) может образоваться во время растворения алмаза в металл-сульфид±силикатных растворителях при давлении 4-4,5 ГПа и температуре 1400-1450 °С [25, 26]. Среди природных алмазов широко распространены округлые кристаллы [27], образование большинства которых связано с воздействием на алмаз кимберлитового расплава [28-30]. Условия и механизмы этого взаимодействия являются предметом многолетних научных дискуссий. В основной массе они демонстрируют широкий спектр поверхностных скульптур – тригональные или шестиугольные ямки, дитригональные и щитовидные слои, каплевидные бугорки, штриховка различной интенсивности и многие другие скульптуры. Экспериментальные исследования показали, что скульптуры на поверхности природного алмаза могут быть индикаторами как условий растворения, так и особенностей внутреннего строения кристаллов алмаза [31].

Результаты экспериментальных исследований по растворению кристаллов алмаза (октаэдров, псевдоромбододекаэдров и кубов) в водосодержащих карбонатных и силикатных расплавах при температуре 1100-1450 °С и давлении 1-5,7 ГПа [14] продемонстрировали, что растворение кристаллов может происходить как при подъеме алмазов из мантии (при контакте с кимберлитовым и лампроитовым расплавом), так и при нахождении алмазов в мантии. Показано, что скульптурные особенности на поверхностях кристаллов в эксперименте и природных растворенных кристаллов аналогичны. В экспериментах при степени растворения 25 %-ного кристалла октаэдрические грани полностью замещаются округлыми поверхностями, при дальнейшем растворении изменяется кривизна поверхностей, а при потере веса 45-50 % форма растворения псевдоромбододекаэдра становится близкой к форме растворения октаэдра. Кубические грани замещаются округлыми поверхностями тетрагексаэдроида при потере веса кристалла от 50 %. На поверхности таких граней отмечается множество четырехугольных фигур травления, а при интенсивном растворении на границах блоков образуются глубокие каналы травления; такой кристалл имеет большие шансы расколоться по линии канала.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Установлено экспериментально, что скорость растворения алмаза в кимберлитовых магмах повышается при снижении давления с 6,3 до 1,0 ГПа [8]. Таким образом, максимальную скорость растворения алмазов можно ожидать на уровне земной коры. Ранее при 0,15 ГПа и 1200-1250 °С исследовано взаимодействие расплавов кимберлита трубки Нюрбинская (Якутия) с природными монокристаллическими алмазами в течение 2 ч (оценочный порядок времени кимберлитового транспорта из верхне-мантийных алмазообразующих очагов в коровые кумулятивные центры) [7]. При слабом поверхностном растворении алмазов в кальций-карбонатсодержащем кимберлитовом расплаве потери алмазной массы составляют 3,0-4,5 %. Таким образом, в процессе транспорта алмазов их растворение происходит, но оно незначительное из-за высокой скорости и кратковременности. Растворение кристалла алмаза на всех этапах его генезиса и в кумулятивном центре, в частности, рассмотрено на примере природного алмаза «Матрешка» [32].

Существуют модели подъема кимберлитов, предполагающие восходящее перемещение локальной ограниченной по вертикали трещины, которая заполнена богатой летучими компонентами магмой, вверх через мантийную литосферу [12, 33]. Оценки скоростей подъема кимберлитовой магмы предполагают типичные скорости в диапазоне 10-30 м/с. Декарбонатизация и выделение газа отмечаются на протяжении всего процесса транспорта кимберлитовой магмы к поверхности – при подъеме расплавов к поверхности происходят реакции твердых или жидких карбонатов с силикатами и выделением CO_2. Кроме того, быстрому подъему может способствовать и уменьшение вязкости кимберлитового расплава более чем в три раза на момент выхода к поверхности [34].

По версии Е.А.Васильева [19], доминирование в кимберлитовой трубке алмазов одной популяции (уникальная сохранность и качество кристаллов, относительная простота их анатомии, однородность спектроскопических характеристик, растворение кристаллов минимальны, как в трубках Мир и Интернациональная) может свидетельствовать о том, что после активации кимберлитообразования часть расплава с алмазом, выросшим в одном цикле кристаллизации, быстро поднималась к поверхности, формируя кимберлитовые тела. В более сложных случаях Е.А.Васильевым предполагается возможность остановки той самой замкнутой трещины, продвигающей кимберлитовый расплав с алмазами, на реологических границах и формирования промежуточной камеры, в которой расплав остывает и застывает. При этом часть кристаллов деформируется и растворяется, а также происходит агрегация дефектов кристаллической структуры в сложные формы. Примером таких объектов являются алмазы трубки Заполярная месторождения им. М.В.Ломоносова.

В экспериментальных образцах зафиксирован факт графитизации алмазов. Известно, что алмаз – термодинамически устойчивая фаза высоких давлений, а графит – относительно низких, вплоть до нормального [7]. Поля стабильности алмаза и графита разделены кривой равновесия графит – алмаз. Графит становится кинетически устойчивой метастабильной фазой в поле алмаза, а алмаз – в поле графита. В условиях кривой равновесия графит – алмаз величины равновесной растворимости графита и алмаза в растворителе любого состава равны. В условиях поля стабильности графита величина равновесной растворимости алмаза превышает растворимость стабильной фазы – графита. Однако в строго изотермическом эксперименте концентрация растворенного углерода метастабильного алмаза стремится, но не может достичь значения его растворимости [35]. Это обусловлено тем, что как только раствор, образующийся при растворении метастабильного алмаза с большей растворимостью, становится пересыщенным по отношению к стабильному графиту с меньшей растворимостью, автоматически происходит кристаллизация графита. Такой процесс может продолжаться до полного растворения метастабильного алмаза с непрерывной кристаллизацией стабильного графита. В этом состоят трудности определения величины «равновесной» растворимости метастабильного алмаза в эксперименте. Находки графита, графитовых пленок на алмазных кристаллах импактных и метаморфогенных алмазов [36, 37] подтверждают этот факт. Поверхностная графитизация на алмазах из кимберлитов и ксенолитов проявляется реже в виде очень тонких полупрозрачных до плотных непрозрачных пленок графита [38]. Экспериментально поверхностная графитизация алмаза зафиксирована в недосыщенных летучими силикатных расплавах, например базальтового и кимберлитового составов, в том числе при высоком давлении [23, 39, 40].

Для образования кимберлитовых диатрем необходимо огромное количество газа, заставляющего кипеть расплав и перемешивать слагающие трубку расплавленные и затвердевшие магматические породы [41]. Газы в кимберлитовой магме могут начать образовываться и аккумулироваться

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

еще со стадии прорыва мантийного алмазообразующего очага глубинным кимберлитовым расплавом. К первоначальному источнику газов подключается инконгруэнтное плавление карбонатов на разных глубинах – магнезита $MgCO_3$ ниже 2,3 ГПа [42], доломита $CaMg(CO_3)_2$ при 0,5 ГПа, сидерита $FeCO_3$ в интервале от 0,05 до 1 ГПа [43], кальцита $CaCO_3$ при 0,1-0,7 ГПа [44]. Кроме того, земная кора, где образуются кумулятивные центры, содержит карбонаты и водные минералы, которые также могут служить источником газов CO_2 и H_2O.

Кристаллизация ликвидусных силикатных фаз оливина и клинопироксена из кимберлитовой магмы увеличивает долю карбонатного компонента в остаточных кимберлитовых расплавах. По экспериментальным данным и термодинамическому моделированию, растворимость CO_2 в этих расплавах уменьшается при понижении температуры [10], что и вызывает отделение растворенной углекислоты в виде свободного флюида. С затвердеванием кимберлитовой системы при закалке в пузырях повышалось и возрастало внутреннее флюидное давление, их оболочки разрушались. При низких давлениях растворимость флюида в кимберлитовом расплаве падает, они начинают все больше отделяться от расплава, и в совокупности с флюидом, образованным в реакциях разложения, эти газы накапливаются в большом количестве к моменту извержения. Описанный механизм аккумуляции свободных газов, преимущественно CO_2, мог осуществляться и в коровых кумулятивных кимберлитовых центрах при их остывании. В эксперименте настоящего исследования о присутствии газа свидетельствует большое количество пор в закалочных образцах (см. рис.6, *а, б*). В таких закрытых пузырях, по данным КР-спектроскопии, зафиксирован газообразный CO_2. Кроме того, благодаря накопленным газам и значительным объемам самих кумулятивных центров, кимберлитовый расплав имеет возможность активно перемешиваться, увеличивая скорость растворения алмазов в нем.

Таким образом, если кимберлитовый поток встретил на своем пути преграду в виде плотной кровли горных пород земной коры, то, вероятно, он будет здесь остановлен на некоторое время (сутки и более), образуется стационарный коровый кумулятивный центр. В условиях, которые экспериментально моделировались в настоящей работе, значительное растворение алмазов в кимберлитовых флюидизированных расплавах наиболее вероятно и может достигать до ~45-50 % при времени жизни такого центра порядка 10 сут.

Заключение

Проведенные эксперименты по растворению алмаза в карбонатных и кимберлитовых расплавах в присутствии флюида или сухих системах демонстрируют, что Ca,Na-карбонатные расплавы обладают наибольшей растворяющей способностью при выдержках до 6 сут., по сравнению с кимберлитовыми и карбонатно-флюидными (при содержании флюида – 5 мас.%). При более длительных выдержках (до 12 сут.) агрессивность экспериментальных сред и растворимость алмаза в них практически одинаковы в условиях корового кумулятивного очага (0,15 ГПа и 1200 °С), поэтому возможно растворение привнесенных кристаллов алмаза в значительной степени – до 47,6 % при выдержке 10 сут.

Показана роль коровых кумулятивных центров как главных факторов риска снижения алмазоносности потенциальных месторождений. Если на пути следования алмаза к поверхности Земли случаются «остановки», то финальная остановка происходит в породах коры накануне кимберлитового извержения. Привнесенные к этому моменту кристаллы могут значительно растворяться в них вплоть до полного исчезновения в зависимости от времени жизни такого кумулятивного центра. Оценивая степень растворения основной генерации кристаллов месторождения, можно учесть вероятность задержки кимберлитовой магмы с алмазами в кумулятивных центрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каминский Ф.В., Воропаев С.А.* Современные представления о генезисе алмаза // Геохимия. 2021. Т. 66. № 11. С. 993-1007. DOI: 10.31857/S0016752521110030

2. *Литвиненко В.С., Петров Е.И., Василевская Д.В. и др.* Оценка роли государства в управлении минеральными ресурсами // Записки Горного института. 2023. Т. 259. С. 95-111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100

3. *Головин А.В., Каменецкий В.С.* Составы кимберлитовых расплавов: обзор исследований расплавных включений в минералах кимберлитов // Петрология. 2023. Т. 31. № 2. С. 115-152. DOI: 10.31857/S0869590323020036

4. *Сокол А.Г., Крук А.Н., Персиков Э.С.* Растворение перидотита в богатом летучими карбонатном расплаве как механизм образования кимберлитоподобных расплавов (по экспериментальным данным) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 105-112. DOI: 10.31857/S2686739722040181

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

5. *Литвин Ю.А., Спивак А.В., Кузюра А.В.* Физико-геохимическая эволюция расплавов суперплюмов при подъеме из нижней мантии в переходную зону Земли (эксперимент при 26 и 20 ГПа) // Геохимия. 2021. Т. 66. № 7. С. 607-629. DOI: 10.31857/S0016752521070049

6. *Giuliani A., Schmidt M.W., Torsvik T.H., Fedortchouk Y.* Genesis and evolution of kimberlites // Nature Reviews Earth & Environment. 2023. Vol. 4. Iss. 11. P. 738-753. DOI: 10.1038/s43017-023-00481-2

7. *Литвин Ю.А., Кузюра А.В., Варламов Д.А. и др.* Взаимодействие кимберлитовой магмы с алмазами при подъеме из верхней мантии в земную кору // Геохимия. 2018. № 9. С. 848-868. DOI: 10.1134/S0016752518090078

8. *Khokhryakov A.F., Kruk A.N., Sokol A.G., Nechaev D.V.* Experimental Modeling of Diamond Resorption during Mantle Metasomatism // Minerals. 2022. Vol. 12. Iss. 4. № 414. DOI: 10.3390/min12040414

9. *Smit K.V., Shirey S.B.* Diamonds Are Not Forever! Diamond Dissolution // Gems & Gemology. 2020. Vol. 56. № 1. P. 148-155.

10. *Fedortchouk Y., Liebske C., McCammon C.* Diamond destruction and growth during mantle metasomatism: An experimental study of diamond resorption features // Earth and Planetary Science Letters. 2019. Vol. 506. P. 493-506. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.11.025

11. *Litvin Y.A.* Genesis of Diamonds and Associated Phases. Springer, 2017. 151 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54543-1

12. *Козлов А.В., Васильев Е.А., Иванов А.С. и др.* Геолого-генетическая модель алмазоносной флюидно-магматической системы // Записки Горного института. 2024. Т. 269. С. 708-720.

13. *Губанов Н.В., Зедгенизов Д.А., Васильев Е.А., Наумов В.А.* Новые данные о составе среды кристаллизации волокнистых алмазов из россыпей Западного Урала // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 645-656.

14. *Khokhryakov A.F., Palyanov Y.N.* The evolution of diamond morphology in the process of dissolution: Experimental data // American Mineralogist. 2007. Vol. 92. Iss. 5-6. P. 909-917. DOI: 10.2138/am.2007.2342

15. *Dasgupta R., Chowdhury P., Eguchi J. et al.* Volatile-bearing Partial Melts in the Lithospheric and Sub-Lithospheric Mantle on Earth and Other Rocky Planets // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 87. P. 575-606. DOI: 10.2138/rmg.2022.87.12

16. *Sharygin I.S., Litasov K.D., Shatskiy A. et al.* Experimental constraints on orthopyroxene dissolution in alkali-carbonate melts in the lithospheric mantle: Implications for kimberlite melt composition and magma ascent // Chemical Geology. 2017. Vol. 455. P. 44-56. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2016.09.030

17. *Shatskiy A., Litasov K.D., Sharygin I.S., Ohtani E.* Composition of primary kimberlite melt in a garnet lherzolite mantle source: constraints from melting phase relations in anhydrous Udachnaya-East kimberlite with variable CO_2 content at 6.5 GPa // Gondwana Research. 2017. Vol. 45. P. 208-227. DOI: 10.1016/j.gr.2017.02.009

18. *Симаков С.К., Стегницкий Ю.Б.* О наличии постмагматической стадии формирования алмазов в кимберлитах // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 319-326. DOI: 10.31897/PMI.2022.22

19. *Васильев Е.А.* Дефекты кристаллической структуры в алмазе как индикатор кристаллогенеза // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 481-491. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.1

20. *Khokhryakov A.F., Kruk A.N., Sokol A.G.* The effect of oxygen fugacity on diamond resorption in ascending kimberlite melt // Lithos. 2021. Vol. 394-395. № 106166. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106166

21. *Kavanagh J.L., Sparks R.S.J.* Temperature changes in ascending kimberlite magma // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 286. Iss. 3-4. P. 404-413. DOI: 10.1016/j.epsl.2009.07.011

22. *Lafuente B., Downs R.T., Yang H., Stone N.* 1. The power of databases: The RRUFF project // Highlights in Mineralogical Crystallography. De Gruyter, 2016. P. 1-30. DOI: 10.1515/9783110417104-003

23. *Fedortchouk Y., Zhuoyuan Li, Chinn I., Fulop A.* Geometry of dissolution trigons on diamonds: Implications for the composition of fluid and kimberlite magma emplacement // Lithos. 2024. Vol. 470-471. № 107526. DOI: 10.1016/j.lithos.2024.107526

24. *Шаповалов Ю.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И. и др.* Жидкостная несмесимость и проблемы рудогенеза (по экспериментальным данным) // Петрология. 2019. Т. 27. № 5. С. 577-597. DOI: 10.31857/S0869-5903275577-597

25. *Chepurov A.I., Sonin V.M., Zhimulev E.I. et al.* Dissolution of diamond crystals in a heterogeneous (metal–sulfide–silicate) medium at 4 GPa and 1400 °C // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. 2018. Vol. 113. Iss. 2. P. 59-67. DOI: 10.2465/jmps.170526

26. *Сонин В.М., Жимулев Е.И., Чепуров А.А. и др.* Начальные стадии переогранения округлых природных алмазов при растворении в расплаве Fe-S при высоком давлении // Литосфера. 2019. Т. 19. № 6. С. 945-952. DOI: 10.24930/1681-9004-2019-19-6-945-952

27. *Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 170 с.

28. *Ragozin A., Zedgenizov D., Kuper K., Palyanov Y.* Specific Internal Structure of Diamonds from Zarnitsa Kimberlite Pipe // Crystals. 2017. Vol. 7. Iss. 5. № 133. DOI: 10.3390/cryst7050133

29. *Khokhryakov A.F., Nechaev D.V., Sokol A.G.* Microrelief of Rounded Diamond Crystals as an Indicator of the Redox Conditions of Their Resorption in a Kimberlite Melt // Crystals. 2020. Vol. 10. Iss. 3. № 233. DOI: 10.3390/cryst10030233

30. *Kostrovitsky S., Dymshits A., Yakovlev D. et al.* Primary Composition of Kimberlite Melt // Minerals. 2023. Vol. 13. Iss 11. № 1404. DOI: 10.3390/min13111404

31. *Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф., Куприянов И.Н.* Кристалломорфологические и кристаллохимические индикаторы условий образования алмаза // Кристаллография. 2021. Т. 66. № 1. С. 135-148. DOI: 10.31857/S0023476121010136

32. *Литвин Ю.А.* Физико-геохимические механизмы генезиса алмазов типа «Матрешка» на основе мантийно-карбонатитовой теории // Геохимия. 2023. Т. 68. № 3. С. 255-270. DOI: 10.31857/S001675252303007X

33. *Barnes S.J., Yudovskaya M.A., Iacono-Marziano G. et al.* Role of volatiles in intrusion emplacement and sulfide deposition in the supergiant Norilsk-Talnakh Ni-Cu-PGE ore deposits // Geology. 2023. Vol. 51. № 11. P. 1027-1032. DOI: 10.1130/G51359.1

34. *Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Сокол А.Г.* Изменение вязкости кимберлитовых и базальтовых магм в процессах их зарождения и эволюции *(прогноз)* // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 6. С. 1131-1140. DOI: 10.15372/GiG20150605

35. *Литвин Ю.А.* Экспериментальные исследования физико-химических условий образования алмаза в мантийном веществе // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 12. С. 1530-1546.

36. *Масайтис В.Л., Футергендлер С.И., Гневушев М.А.* Алмазы в импактитах Попигайского метеоритного кратера // Записки Всесоюзного минералогического общества. 1972. Ч. 101. С. 108-112.

37. *Корсаков А.В., Шацкий В.С.* Механизм образования алмазов в графитовых «рубашках» в метаморфических породах сверхвысоких давлений // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 2. С. 232-235.

38. *Fedortchouk Y.* A new approach to understanding diamond surface features based on a review of experimental and natural diamond studies // Earth-Science Reviews. 2019. Vol. 193. P. 45-65. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.02.013

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

39. *Sonin V., Leech M., Chepurov A. et al.* Why are diamonds preserved in UHP metamorphic complexes? Experimental evidence for the effect of pressure on diamond graphitization // International Geology Review. 2019. Vol. 61. Iss. 4. P. 504-519. DOI: 10.1080/00206814.2018.1435310

40. *Korsakov A.V., Zhimulev E.I., Mikhailenko D.S. et al.* Graphite pseudomorphs after diamonds: An experimental study of graphite morphology and the role of H_2O in the graphitisation process // Lithos. 2015. Vol. 236-237. P. 16-26. DOI: 10.1016/j.lithos.2015.08.012

41. *Gernon T.M., Gilbertson M.A., Sparks R.S.J., Field M.* The role of gas-fluidisation in the formation of massive volcaniclastic kimberlite // Lithos. 2009. Vol. 112. Suppl. 1. P. 439-451. DOI: 10.1016/j.lithos.2009.04.011

42. *Sutao Zhao, Poli S., Schmidt M.W. et al.* An experimental determination of the liquidus and a thermodynamic melt model in the $CaCO_3$-$MgCO_3$ binary, and modelling of carbonated mantle melting // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2022. Vol. 336. P. 394-406. DOI: 10.1016/j.gca.2022.08.014

43. *Kang N., Schmidt M.W., Poli S. et al.* Melting of siderite to 20 GPa and thermodynamic properties of $FeCO_3$-melt // Chemical Geology. 2015. Vol. 400. P. 34-43. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2015.02.005

44. *Irving A.J., Wyllie P.J.* Subsolidus and melting relationships for calcite, magnesite and the join $CaCO_3$-$MgCO_3$ 36 kb // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1975. Vol. 39. Iss. 1. P. 35-53. DOI: 10.1016/0016-7037(75)90183-0

***Авторы*: Анастасия Витальевна Кузюра,** *канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник* (*Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С.Коржинского РАН, Черноголовка, Россия*), *shushkanova@iem.ac.ru, https://orcid.org/0000-0002-1769-8711*, **Анна Валерьевна Спивак,** *д-р геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник* (*Институт экспериментальной минералогии имени академика Д.С.Коржинского РАН, Черноголовка, Россия*), *https://orcid.org/0000-0001-9688-520X*, **Галина Юрьевна Криулина,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), *https://orcid.org/0009-0009-8495-9289*.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0