



УДК 549.01 (552.321.6)

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.34>

Растворение макрокристов оливина в кимберлитовом расплаве при высоких P – T -параметрах

И. А. Грязнов, З. А. Карпович, И. А. Ишутин, Е. И. Жимулев

Институт геологии и минералогии СО РАН им. В. С. Соболева, г. Новосибирск

Аннотация. Оливин – доминантная фаза в кимберлитах. Он встречается в виде вкрапленников двух типов: оливин I в виде относительно крупных зерен округлой или неправильной формы и оливин II в виде мелких (до 0,5, редко 1 мм) идиоморфных кристаллов, но имеющих ядра неправильной формы. В последнее время активизировалась дискуссия о происхождении вкрапленников оливина в кимберлитах. Постепенно доминирующей становится гипотеза о ксеногенном происхождении вкрапленников оливина. От решения этого вопроса зависит определение состава исходной (материнской) кимберлитовой магмы и в конечном счете концепция генезиса самих кимберлитов. В работе представлены результаты экспериментальных исследований по растворению зерен природного оливина в кимберлитовом расплаве из трубки «Нюрбинская» с добавлением Fe_2O_3 и $CaCO_3$ при высоких P – T -параметрах (4 ГПа, 1300 и 1500 °С). Эксперименты проведены с целью моделирования изменения ксенолитов мантийных пород (дунитов) при попадании в протокимберлитовую магму. Установлено, что сценарий изменения дунита включает на первой стадии деформацию породы с образованием трещин, в которые проникает неравновесный по составу расплав. В дальнейшем происходит частичное растворение макрокристов оливина с уменьшением их размера и прогрессирующая дезинтеграция породы. Экспериментально подтверждается возможность образования округлых вкрапленников оливина при взаимодействии карбонатизированного расплава с перидотитом (оливином).

Ключевые слова: кимберлит, оливин, высокие давления и температуры, эксперимент.

Для цитирования: Растворение макрокристов оливина в кимберлитовом расплаве при высоких P – T -параметрах / И. А. Грязнов, З. А. Карпович, И. А. Ишутин, Е. И. Жимулев // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2019. Т. 28. С. 34–47. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.34>

Введение

К настоящему моменту кимберлитовые трубки взрыва являются основным коренным источником такого ценного минерала, как алмаз, который, согласно современным представлениям, образовался в мантийных глубинах [Diamond through Time ... , 2010]. Вследствие этого генезис кимберлитов вызывает особый интерес у исследователей всего мира. Основное внимание при этом все же уделяется главному минералу – алмазу, именно ему посвящено огромное количество научных изысканий, в том числе и экспериментальных работ. На минералах-спутниках алмаза сосредоточено чуть меньшее внимание, тем не менее остаются некоторые нерешенные вопросы, в частности касающиеся их взаимоотношения с кимберлитовым расплавом,

устойчивости и сохранности в нем. Между тем, исследуя минералы-спутники алмаза и проводя их сопоставление с подобными минералами из неалмазоносных кимберлитов, возможно установить критерии алмазоносности кимберлитовой трубки: так, в конечном итоге можно приблизиться к решению глобальной проблемы – генезиса алмаза.

Кимберлит важен не только как источник алмаза. Благодаря именно этой изверженной породе появилась возможность заглянуть в мантийные глубины Земли. Кимберлитовый расплав, извергаясь из мантийных глубин, выносит к поверхности Земли ксенолиты глубинных пород [Соболев, 1974; 1983]. Считается, что ультраосновные нодулы в кимберлитах – ксенолиты вещества верхней мантии – не претерпевают значительных изменений при транспортировке их к поверхности Земли. С другой стороны, есть данные [Кутолин, Агафонов, Чепуров, 1976], что при нахождении в базальтовой магме ультраосновные нодулы подвергались интенсивному физико-химическому воздействию, которое выражалось в преимущественной дезинтеграции пироксенитов по сравнению с перидотитами, с последующим уменьшением доли пироксенитов в общей массе транспортируемых ксенолитов.

В последние годы заметно вырос интерес к вопросу устойчивости минералов из мантии к агрессивному воздействию кимберлитовой магмы. В экспериментальном исследовании [Kimberlite ascent by ... , 2012] показан механизм ассимиляции мантийных минералов. Так, растворение ортопироксена при прохождении через мантийную литосферу приводит к обогащению карбонатитового расплава кремнием и заметному падению растворимости CO_2 в расплаве, что в свою очередь способствует сильному выделению флюидной фазы, уменьшению плотности магмы и, как следствие, ускоряющемуся подъему кимберлитовой магмы с увеличением ее объема [Kimberlite ascent by ... , 2012].

Оливин является одной из доминирующих фаз в кимберлитах [Brett, Russelle, Moss, 2009]. На основе размера и морфологии зерен выделяют две популяции оливина [Skinner, Clement, 1979]. Оливин I типа представляет собой макрокристы – зерна неправильной формы, округлые или полуокруглые зерна. В кимберлитах трубки «Удачная-Восточная» оливин I типа присутствует в виде округлых и овальных кристаллов или в виде угловатых обломков со сглаженными краями. При этом зерна часто разбиты трещинами. Оливин содержит 85–94 мол. % форстеритового компонента, но большинство зерен имеет $F_0 > 91$ [Olivine in the Udachnaya-East ... , 2008]. Дислокационные структуры, неидiomорфная форма свидетельствуют, что эти оливины были деформированы перед попаданием в кимберлитовую магму. По мнению Patterson с соавторами [Patterson, Francis, McCanless, 2009], оливины I типа являются ксенокристаллами по отношению к кимберлитовому расплаву. Полагают, что оливины данной генерации сначала были захвачены расплавом на глубине, затем частично отшлифованы, растворены и перекристаллизованы при подъеме и в конечном счете регенерированы [Olivine in the Udachnaya-East ... , 2008]. Оливины I типа имеют достаточно широкое распространение в кимберлитовых трубках взрыва – они встречены в кимберлитах Гренландии, Канады и Южной Африки [Olivine and the ... , 2010].

Вторая популяция (оливин II типа) – идиоморфные или почти идиоморфные мелкие (< 0,5 мм) кристаллы, имеющие ядра неправильной формы. Например, оливин II типа в кимберлитах трубки «Удачная-Восточная» представлен относительно небольшими (0,05–0,8 мм) ограниченными зернами. Фостеритовый компонент составляет 30–70 мол. % [Olivine in the Udachnaya-East ... , 2008]. К этому же типу оливина относят и кристаллизационные каймы, окружающие зерна ксенокристов оливина (т. е. оливин I типа) [Olivine and the ... , 2010]. Считают, что фенокристы и каймы на макрокристаллах кристаллизуются непосредственно из кимберлитовой магмы [Brett, Russelle, Moss, 2009]. Оливины II типа также имеют широкое распространение в кимберлитовых трубках взрыва, подобно первой генерации, они зафиксированы в кимберлитах Гренландии, Канады и Южной Африки [Olivine and the ... , 2010].

В настоящее время большинство исследователей склоняется к гипотезе о ксеногенном происхождении оливина I типа [Olivine in the Udachnaya-East ... , 2008; Brett, Russelle, Moss, 2009; Patterson, Francis, McCanless, 2009; Olivine and the ... , 2010; Morphology and surface ... , 2014; Paragenesis and complex ... , 2015]. Считается, что ксенокристы оливина I появляются вследствие дезинтеграции нодулей мантийных пород, а их специфическая морфология определяется процессами растворения и/или абразии зерен в кимберлитовой (или даже в протокимберлитовой) магме. При этом от решения этого вопроса зависит определение состава исходной (материнской) кимберлитовой магмы и собственно концепция генезиса самих кимберлитов [Корулова, Matveev, Raudsepp, 2007; Mitchell, 2008; The nature of erupting ... , 2009].

Ранее было экспериментально установлено, что при растворении в кимберлитовом расплаве силикатных минералов из мантийных ксенолитов, таких как орто- и клинопироксен, гранат, оливин, все представленные минералы являются в разной степени неустойчивыми к воздействию кимберлитового расплава. В изученном интервале температур наблюдается следующая зависимость по скорости их растворения: $\text{Cpx} > \text{Opx} > \text{Gar} > \text{Ol}$ [The stability of ortho- ... , 2013]. Эксперименты проводили при давлении 4 ГПа и температурном интервале 1300–1500 °С, при этом использовали природный кимберлит из трубки «Нюрбинская» [The stability of ortho- ... , 2013].

Тем не менее возникновение зерен оливина специфической округлой формы при растворении в кимберлитовом расплаве экспериментально не было подтверждено. В настоящем сообщении приводятся первые результаты экспериментов по данному вопросу.

Методика исследования

Эксперименты проведены на беспрессовом многопуансонном аппарате высокого давления типа «разрезная сфера» («БАРС») по методике, использованной в работах А. И. Чепурова с соавторами [The conservation of an aqueous ... , 2012, The stability of ortho- ... , 2013]. Ячейку высокого давления (ЯВД) и детали для реакционного объема изготавливали из смеси тугоплавких оксидов ZrO_2 , CaO , MgO . Для нагревания образцов в процессе экспериментов применяли трубчатый графитовый нагреватель с молибденовыми тоководами (рис. 1).

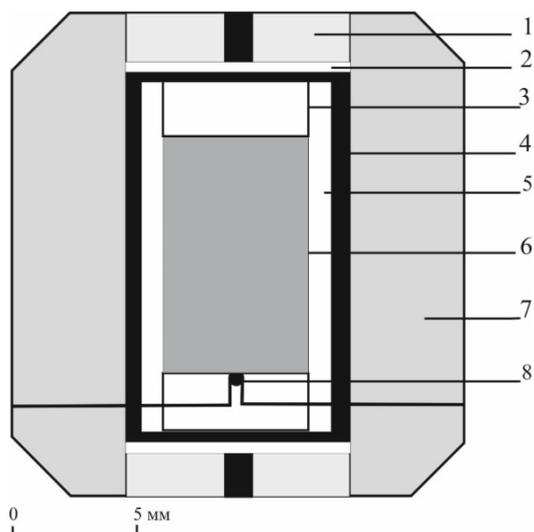


Рис. 1. Схема сборки ячейки высокого давления

1 – торцевая таблетка с молибденовым тоководом; 2 – молибденовый токопроводящий диск; 3 – запирающая втулка с реакционным объемом; 4 – графитовый нагреватель с графитовыми крышками; 5 – втулка из оксида магния, изолирующая реакционный объем; 6 – реакционный объем; 7 – контейнер из тугоплавких оксидов ZrO_2 , CaO , MgO ; 8 – термопара PtRh (30/6)

Для измерения температуры в ЯВД использовали термопару PtRh (30/6). Дополнительно была проведена калибровка ЯВД по температуре плавления чистых веществ, таких как Ag, Au, Pt, при высоком давлении с учетом поправки на давление [Тонков, 1979]. Точность определения температуры в образцах составляла ± 25 °С. Давление определяли по предварительно откалиброванной кривой, выражающей зависимость давления в ЯВД от давления масла в гидросистеме аппарата. Для калибровки давления в ячейке использовали реперные вещества PbSe, Ba и Bi. По известному положению линии равновесия графит – алмаз в P – T -координатах вносили поправку на изменение (увеличение) давления при нагревании ячейки высокого давления [Kennedy and Kennedy, 1976]. Точность определения давления мы оцениваем в $\pm 0,2$ ГПа. Охлаждение образцов осуществляли закалкой (2–3 с) – отключением электроток на нагревателе. Серия из четырех экспериментов была проведена при давлении 4 ГПа, температурах 1300 и 1500 °С, длительностью 1 и 2 ч. Выбранный температурный диапазон наших опытов имеет нижнюю границу, соответствующую общепринятой для образования кимберлитовых магм, – 1200–1300 °С [Fluid and melt ... , 1989]. Повышение температуры до 1500 °С обусловлено необходимостью получения более высокой степени плавления кимберлита в опыте.

Длительность экспериментов выбирали исходя из экспериментальной оценки скорости просачивания водно-углекислого флюида в ультраосновной породе, составившей 0,3–0,4 мм/ч при 1100 °С, 4 ГПа [Experimental estimate of ... , 2015].

Для исследования использовали кимберлит Н-1 из трубки «Нюрбинская» (Якутия, Россия). Зерна оливина были выделены из нодулей шпинелевого лерцолита щелочных базальтоидов Монголии, брали зерна неправильной формы размером 0,5–1 мм (рис. 2).

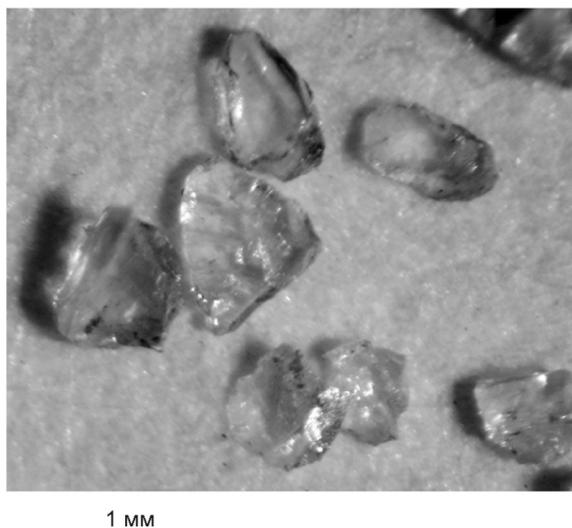


Рис. 2. Исходные кристаллы оливина

Данные химического анализа кимберлита и оливина приведены в табл. 1. Настоящие природные образцы кимберлита и оливина применялись нами в работе [The stability of ortho- ... , 2013]. Согласно гипотезе о ксеногенной природе вкрапленников оливина состав протокимберлитовой магмы должен быть обогащен железом, в отличие от состава кимберлита [Brett, Russelle, Moss, 2009]. Кроме того, предполагается существенно карбонатный состав протокимберлитовой магмы [Olivine in the Udachnaya-East ... , 2008]. Эта тенденция соблюдается, в частности, для состава ультрамафических лампрофиров области Сарфарток (Sarfartoq), Западная Гренландия, содержащих до 70 % округлых макрокристов оливина [Chang, 2000]. Поэтому в образцы кимберлита добавлены Fe_2O_3 и CaCO_3 (см. табл. 1). Природный кимберлит дробили и перетирали на шаровой мельнице в порошок до размера зерен менее 5 мкм.

Для приготовления исследовательского образца использовали специальные пресс-формы разных размеров. Образцы и детали внутренней сборки ЯВД прессовали на специальном гидравлическом прессе. Применяли два типа сборки исследовательского объема.

Таблица 1

Химический состав кимберлита и оливина, использованных в опытах

Компонент	Кимберлит Н-1	Добавка	Состав, приведенный к 100 %	Оливин
SiO ₂	32,08	0	25,53	40,47
TiO ₂	0,47	0	0,37	0,01
Al ₂ O ₃	3,71	0	2,95	н.о.
Cr ₂ O ₃	н. о. *	0	н. о.	0,04
FeO+Fe ₂ O ₃	6,91	15 мг (Fe ₂ O ₃)	17,43	9,00
MnO	0,14	0	0,11	0,14
MgO	31,05	0	24,71	49,62
CaO	7,63	10 мг (CaCO ₃)	10,53	0,04
Na ₂ O	0,47	0	0,37	н.о.
NiO	н. о.	0	н. о.	0,41
K ₂ O	1,74	0	1,38	н.о.
P ₂ O ₅	0,31	0	0,25	н.о.
п/пп	16,18	0	16,37	н.о.
Сумма	100,68	0	100	99,96

*н. о. – не определено.

Вариант 1: на весах взвешивали две навески кимберлитового порошка по 200 мг, затем первую навеску кимберлитового порошка засыпали в соответствующую пресс-форму и подпрессовывали. После в пресс-форму помещали зерна оливина, затем засыпали вторую навеску кимберлитового порошка. После прессовки на гидравлическом прессе получался образец в виде цилиндра, который помещали в графитовый нагреватель; по торцам устанавливали в следующей последовательности графитовую крышку-перегородку, таблетку из оксида циркония (ZrO₂), графитовую тоководную крышку (рис. 3).

Вариант 2: навеску кимберлитового порошка (400 мг) перемешивали с зернами оливина, при этом достигалось равномерное распределение зерен оливина в порошке кимберлита, что исключало касание их друг с другом. Полученную таким образом «смесь» кимберлитового порошка и зерен оливина помещали в Pt-ампулу. Затем ампулу заваривали, опрессовывали в пресс-форме порошком MgO и помещали в графитовый нагреватель (см. рис. 3). Этот вариант сборки применяли для проверки положения о возможности растрескивания зерен оливина на стадии сжатия образца в аппарате «БАРС».

После экспериментов образцы распиливали вдоль вертикальной оси и исследовали под оптическим микроскопом MC2-Zoom. Составы фаз определяли с помощью сканирующего электронного микроскопа MIRALMU и X-ray-микроанализатора JXA-8100, а также электронного микронзонда САМЕВАХ-micro в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск).

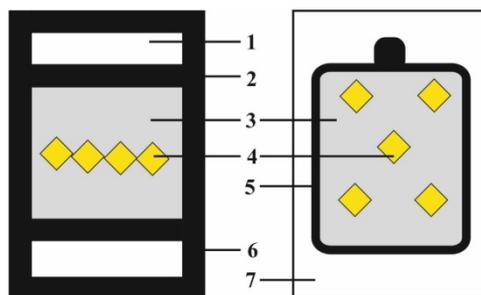


Рис. 3. Схема сборки реакционного объема ячейки высокого давления

1 – таблетка из оксида циркония; 2 – графитовая крышка-перегородка; 3 – кимберлит; 4 – кристаллы оливина; 5 – платиновая ампула; 6 – графитовый нагреватель с графитовыми тоководными крышками; 7 – порошок оксида магния, заполняющий неровности платиновой ампулы

Результаты и обсуждение

В опыте, проведенном при 1500 °С, ксенокристы оливина полностью растворились в расплаве кимберлита за 2 ч.

В образцах после опытов, проведенных при 1300 °С (1 и 2 ч), ксенокристы оливина сохранились, но испытали частичное растворение и приобрели округлую форму (табл. 2, рис. 4).

Таблица 2

Условия экспериментов (4 ГПа)

Номер опыта	T , °С	Время, ч	Примечание
4-3-15	1300	2	Частичное растворение оливина
2-19-15	1300	2	Частичное растворение оливина
2-36-15	1300	1	Частичное растворение оливина
2-37-15	1500	2	Полное растворение оливина

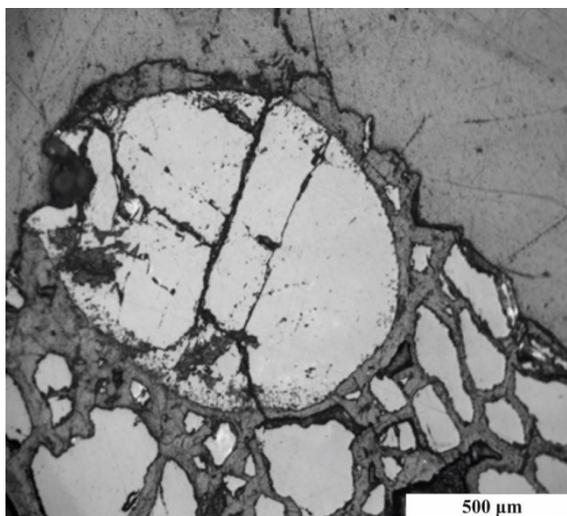


Рис. 4. Округлые ксенокристы оливина, образовавшиеся в результате частичного растворения

При этом все ксенокристы после опытов оказались сильно разбиты трещинами, в которые проникал расплав кимберлита (рис. 5). Данный процесс происходил вплоть до полной дезинтеграции исходных зерен оливина на отдельные фрагменты.

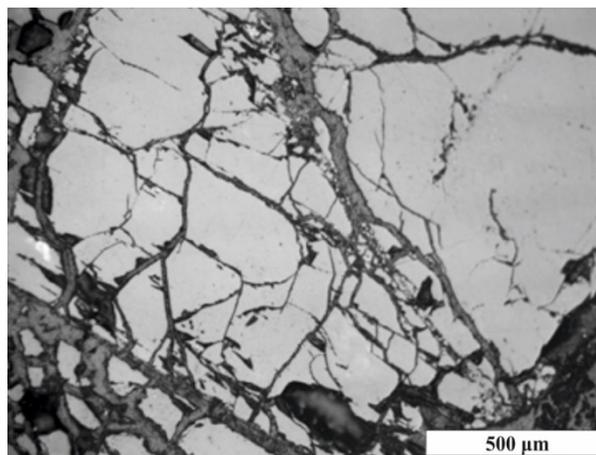


Рис. 5. Проникновение расплава кимберлита в растрескивавшийся кристалл оливина

В эксперименте с Pt-ампулой, в котором зерна оливина не касались друг друга, растрескивания не наблюдалось. Основная масса образцов после опытов состояла из крупных вытянутых новообразованных лейст оливина, между которыми находился агрегат очень мелких зерен клинопироксена, слюды, кальцита, шпинели и магнетита. В продуктах опыта, проведенного при 1500 °С, клинопироксен не обнаружен. Химический состав новообразованных лейст оливина приведен в табл. 3. Такая структура образцов сформировалась вследствие быстрого их охлаждения при закалке. Закалочный оливин характеризуется повышенным содержанием железа и кальция по сравнению с составом исходных ксенокристов оливина.

Таблица 3

Химический состав оливина (ОЛП) из основной массы образцов кимберлита после опытов при 4 ГПа (мас. %)

SiO ₂	FeO+Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	NiO	Сумма
Опыт 2-36 (1300 °С, 2 ч)					
40,78	10,72	48,11	0,49	Н.о.	100,09
40,35	13,43	45,49	0,62	0,42	100,3
41,12	10,36	48,95	0,20	0,28	100,9
40,50	10,32	48,31	0,25	0,33	99,70
39,73	12,72	46,32	1,01	0,47	100,23
Опыт 2-37 (1500 °С, 2 ч)					
40,33	12,26	47,36	0,64	0,47	101,06
40,33	13,03	46,15	0,49	0,5	100,5
40,37	10,43	49,46	0,34	0,31	99,9
40,05	10,96	47,94	0,24	0,36	99,55
40,18	10,68	47,92	0,22	0,57	99,58

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют, что использованные ксенокристы оливина не являются равновесными с расплавом кимберлита Н-1, обогащенного железом и кальцием. Наоборот, кимберлитовый расплав представляет собой агрессивную среду, способную растворять ксенокристы магнезиального оливина. При этом первоначально неправильная их форма преобразуется в округлую, что характерно и для природных кимберлитов.

Крупные округлые ксенокристы оливина из кимберлитов также часто разбиты системой трещин. В наших экспериментах, вероятно, это явление возникало еще на этапе подъема давления вследствие существующих напряжений в кристаллах оливина [Olivine and the ... , 2010]. После этого при плавлении кимберлитового порошка расплав проникал в трещины и дезинтегрировал ксенокристы на отдельные фрагменты. Таким образом, факт проникновения кимберлитового расплава по трещинам внутрь зерен оливина является одним из критериев отличия процесса растворения оливина от абразии зерен.

Аналогичный процесс, возможно, имел место и в природных объектах в условиях градиента давления при подъеме кимберлитовой магмы. Но появления специфических концентрических трещин, параллельных границам зерен, аналогичных природным образцам [Morphology and surface ... , 2014], не зафиксировано. Поэтому в округлении ксенокристов оливина в природных объектах, возможно, имел место и процесс абразии зерен оливина (совместно с процессом растворения) при подъеме кимберлитовой магмы [Olivine and the ... , 2010; Morphology and surface ... , 2014].

Заключение

Таким образом, сценарий изменения дунита включает на первой стадии деформацию породы с образованием трещин, в которые проникает неравновесный по составу расплав. В дальнейшем происходит частичное растворение макрокристов оливина с уменьшением их размера и прогрессирующая дезинтеграция породы. Экспериментально подтверждается возможность образования округлых вкрапленников оливина при взаимодействии карбонатизированного расплава с перидотитом (оливином). Гренландские лампрофиры [Chang, 2000] могли образоваться на ранней стадии процесса, приведшей к генерации кимберлитовой магмы с уменьшенной долей (до 30 %) округлых макрокристов оливина. Вместе с тем в результате резорбции оливина по трещинам образуются более мелкие зерна неправильной формы, и, вероятно, без их перемещения и интенсивного столкновения массового округления зерен не будет происходить. Но процесс абразии макрокристов оливина в рамках данной работы не изучался. Возможно, процессу абразии способствует очень низкая вязкость кимберлитового расплава [Cherugov, Pokhilenko, 2015]. Следует учитывать также возможность увеличения концентрации округлых макрокристов при их отсадке в расплаве. Экспериментально показано, что при высоких P - T -параметрах скорость отсадки минералов в кимберлитовой магме может составлять до 1 м/ч и выше в зависимости от плотности и размера кристаллов [Experimental estimation of the rate, 2011].

Работа выполнена в соответствии с планами НИР ИГМ СО РАН (№ проекта 0330-2016-0012).

Список литературы

Кутюлин В. А., Агафонов Л. В., Чепуров А. И. Относительная устойчивость оливины, пироксенов и граната в базальтовой магме и состав верхней мантии // Докл. АН СССР. 1976. Т. 231, № 5. С. 1218–1221.

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

Соболев Н. В. Парагенезисы алмаза и проблема глубинного минералообразования // Зап. ВМО. 1983. Ч. 117, т. 4. С. 389–397.

Тонков Е. Ю. Фазовые диаграммы элементов при высоком давлении. М. : Наука, 1979. 192 с.

Brett R. C., Russelle J. R., Moss S. Origin of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor? // Lithos. 2009. Vol. 112S. P. 201–212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.030>.

Chang F. Petrography, geochemistry, age, and petrogenesis of ultramafic from Sarfartoq, central west Greenland // Thesis for the degree of bachelor of science, The University of British Columbia, April, 2000.

Chepurov A. A., Pokhilenko N. P. Experimental estimation of the Kimberlite melt viscosity // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 462, N 2. P. 592–595. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15060033>.

Diamond through Time / J. J. Gurney, H. H. Helmstaedt, S. H. Richardson, S. B. Shirey // Soc. of Econ. Geol., inc. Economic Geology. 2010. Vol. 105. P. 689–712. https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.689.

Experimental estimate of the actual infiltration (migration) of volatilities (H₂O + CO₂) in rocks of the mantle wedge / A. I. Chepurov, V. M. Sonin, N. S. Tychkov, I. Y. Kulakov // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 464, N 1. P. 932–935. https://doi.org/10.1134/S1028334X15090032.

Experimental Estimation of the Rate of Gravitation Fractionating of Xenocrysts in Kimberlite Magma at High P-T Parameters / A. I. Chepurov, E. I. Zhimulev, V. M. Sonin, A. A. Chepurov, A. A. Tomilenko, N. P. Pokhilenko // Doklady Earth Sciences. 2011. Vol. 440, N 2. P. 1427–1430. https://doi.org/10.1134/S1028334X11100138.

Fluid and melt compositions in lamproites and kimberlites based on the study of inclusions in olivine / A. V. Sobolev, N. V. Sobolev, C. B. Smith, J. Dubessy // GSA Special Publ. N 14. Kimberlites and Related Rocks. 1989. Vol. 1. P. 220–240.

Kennedy C. S., Kennedy G. C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // J. Geophys. Res. 1976. Vol. 81, N 14. P. 2467–2470.

Kimberlite ascent by assimilation – fuelled buoyancy / J. K. Russell, L. A. Porritt, Y. Lavalley, D. B. Dingwell // Nature. 2012. Vol. 481. P. 352–356. https://doi.org/10.1038/nature10740

Kopylova M. G., Matveev S., Raudsepp M. Searching for parental kimberlite melt // Geochim. Cosmochim. Acta. 2007. Vol. 71. P. 3616–3629. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.05.009>.

Mitchell R. H. Petrology of hypabyssal kimberlites: relevance to primary magma compositions // J. Volcanol. Geotherm. Res. 2008. Vol. 174. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.024>.

Morphology and surface features of olivine in kimberlite: implication for ascent processes / T. J. Jones, J. K. Russell, L. A. Porritt, R. J. Brown // Solid Earth. 2014. Vol. 5. P. 313–326. https://doi.org/10.5194/se-5-313-2014.

Olivine and the origin of kimberlite / N. T. Arndt, M. Guitreau, A. M. Boullie, A. le Roex, A. Tommasi, P. Cordier, A. Sobolev // J. Petrol. 2010. Vol. 51. P. 573–602. https://doi.org/10.1093/petrology/egp080

Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types compositions and origins V. S. Kamenetsky, M. B. Kamenetsky, A. V. Sobolev, A. V. Golovin, S. Demouchy, K. Faure, V. V. Sharygin, D. V. Kuzmin // *J. Petrol.* 2008. Vol. 49, N 4. P. 823–839. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm033>

Paragenesis and complex zoning of olivine macrocrysts from unaltered kimberlite of the Udachnaya-East pipe, Yakutia: relationship with the kimberlite formation conditions and evolution / N. V. Sobolev, A. V. Sobolev, A. A. Tomilenko, S. V. Kovjazin, V. G. Batanova, D. V. Kuzmin // *Russian Geology and Geophysics.* 2015. Vol. 56, N 1–2. P. 260–279. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.019>

Patterson M., Francis D., McCanless T. Kimberlites: Magmas or mixtures? // *Lithos.* 2009. Vol. 112S. P. 191–200. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.004>.

Skinner E. M. W., Clement C. R. Mineralogical classification of southern African kimberlites // Boyd FR, Meyer HOA (eds.) *The Mantle Sample. 2nd International Kimberlite Conference.* 1979. American Geophysical Union. Washington. D. C. P. 129–139.

The conservation of an aqueous fluid in inclusions in minerals and their interstices at high pressures and temperatures during the decomposition of antigorite / A. I. Chepurov, A. A. Tomilenko, E. I. Zhimulev, V. M. Sonin, A. A. Chepurov, S. V. Kovjazin, T. Y. Timina, N. V. Surkov // *Russian Geology and Geophysics Volume.* 2012 Vol. 53, N 3. P. 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.002>.

The nature of erupting kimberlite melts / R. S. J. Sparks, R. A. Brooker, M. Field, J. Kavanagh, J. C. Schumacher, M. J. Walter, J. White // *Lithos.* 2009. Vol. 112S. P. 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.032>.

The stability of ortho- and clinopyroxenes, olivine, and garnet in kimberlitic magma / A. I. Chepurov, E. I. Zhimulev, L. V. Agafonov, V. M. Sonin, A. A. Chepurov, A. A. Tomilenko // *Russian Geology and Geophysics.* 2013. Vol. 54, N 4. P. 406–415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.004>.

Dissolving Macrocrysts of Olivine in a Kimberlite Melt at High P – T Parameters

I. A. Gryaznov, Z. A. Karpovich, I. A. Ishutin, E. I. Zhimulev

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

Abstract. Olivine is found in kimberlite in the form of two types of phenocrysts: olivine I in the form of relatively large grains of round or irregular shape and olivine II in the form of small (up to 0.5 rarely 1 mm) idiomorphic crystals, but having irregularly shaped cores. It is believed that type I olivine xenocrysts appear due to the disintegration of nodules of mantle rocks, and their specific morphology is results by the processes of dissolution and / or abrasion of grains in kimberlite (or even in protokimberlite) magma. The determination of the composition of the initial kimberlite magma and, ultimately, the concept of the genesis of the kimberlites themselves, depends on the solution of this question. It was previously experimentally established that among silicate minerals from mantle xenoliths, olivine is most stable when dissolved in kimberlite melt at high temperatures and pressures. However, the occurrence of a specific rounded form of olivine grains which were dissolved in a kimberlite melt was not experimentally confirmed yet. This report presents the first results of experiments on this topic. The experiments were carried out on a pressless multi-anvil high-pressure apparatus of the “split sphere” type (BARS). A series of four experiments was carried out at a pressure of 4 GPa, temperatures of 1300 °C and 1500 °C, with a duration of 1 and 2 hours. Kimberlite N-1 from Nyurbinskaya pipe (Yakutia, Russia) was used as a starting sample. Olivine grains were extracted from the nodules of spinel lherzolite from alkaline basaltoids of Mongolia. Following the hypothesis of the xenogenic nature of olivine phenocrysts, the composition of the proto-

kimberlite magma should be enriched with iron in comparison with the composition of kimberlite. In addition, a substantially carbonatite composition of the protokimberlite magma is assumed. Therefore, Fe_2O_3 and CaCO_3 are added to the kimberlite samples. The results of the experiments show that the olivine xenocrysts used are not in equilibrium with the N-1 molten kimberlite enriched with iron and calcium. On the contrary, the kimberlite melt is an aggressive medium capable of dissolving the xenocrysts of magnesian olivine. At the same time, their initially irregular shape is transformed into a rounded one, which is also characteristic for natural kimberlites. The large, rounded xenocrysts of kimberlite olivine are also often contains many cracks. In our experiments, this phenomenon probably occurred even at the stage of pressure increase due to the existing stress in the olivine crystals. After that, when the kimberlite powder was melted, the melt penetrated into these cracks and disintegrated the xenocrysts into separate fragments. A similar process may have occurred in natural objects under pressure gradient conditions during the rising of kimberlite magma. Thus, it was experimentally confirmed the possibility of the formation of rounded phenocrysts of olivine during their interaction with a carbonated melt.

Keywords: kimberlite, olivine, high pressures and temperatures, experiment.

For citation: Gryaznov I.A., Karpovich Z.A., Ishutin I.A., Zhimulev E.I. Dissolving Macrocrysts of Olivine in a Kimberlite Melt at High P - T Parameters. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2019, vol. 28, pp. 34-47. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2019.28.34> (in Russian)

References

Kutolin V.A., Agafonov L.V., Chepurov A.I. Otnositelnay ustoychivost olivina, piroksenov i granata v bazaltovoy magme i sostav verhney mantii [Relative stability of olivine, pyroxenes and garnet in basaltic magma and upper mantle composition]. *Proc. USSR Academy of Sciences*, 1976, vol. 231, no. 5, pp. 1218-1221. (in Russian)

Sobolev N.V. *Glubinie vklyuchenia v kimberlitah i problema sostava verhney mantii* [Deep inclusions in kimberlites and the problem of upper mantle composition]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1974, 264 p. (in Russian)

Sobolev N.V. Paragenezisy almaza I problema glubinogo mineraloobrazovania [Parageneses of diamond and the problem of deep mineral formation]. *Zap. WMO*, 1983, H SH, vol. 4, pp. 389-397. (in Russian)

Tonkov E.Y., *Fazovie diagrammi elementov pri visokom davlenii* [Phase diagrams of elements at high pressure]. Moscow, Science Publ., 1979, 192 p. (in Russian)

Brett R.C., Russelle J.R., Moss S. Origin of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor? *Lithos*, 2009, vol. 112S, pp. 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.030>.

Chang F. Petrography, geochemistry, age, and petrogenesis of ultramafic from Sarfartoq, central west Greenland. *Thesis for the degree of bachelor of science*, The University of British Columbia, April, 2000.

Chepurov A.A., Pokhilenko N.P. Experimental estimation of the Kimberlite melt viscosity. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 462, no. 2, pp. 592-595. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15060033>.

Gurney J.J., Helmstaedt H.H., Richardson S.H., Shirey S. B. Diamond through Time. *Soc. of Econ. Geol., inc. Economic Geology*, 2010, vol. 105, pp. 689-712. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.3.689>.

Chepurov A.I., Sonin V.M., Tychkov N.S., Kulakov I.Y. Experimental estimate of the actual infiltration (migration) of volatilities ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) in rocks of the mantle wedge. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 464, no. 1, pp. 932-935. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15090032>.

Chepurov A.I., Zhimulev E.I., Sonin V.M., Chepurov A.A., Tomilenko A.A., Pokhilenko N.P. Experimental Estimation of the Rate of Gravitation Fractionating of Xenocrysts in Kimberlite Magma at High P - T Parameters. *Doklady Earth Sciences*, 2011, vol. 440, no. 2, pp. 1427-1430. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11100138>

Sobolev A.V., Sobolev N.V., Smith C.B., Dubessy J. Fluid and melt compositions in lamproites and kimberlites based on the study of inclusions in olivine. *GSA Special Publ. N 14 Kimberlites and Related Rocks*, 1989, vol. 1, pp. 220-240.

Kennedy C.S., Kennedy G.C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, no. 14, pp. 2467-2470. <https://doi.org/>

Russell J.K., Porritt L.A., Lavalley Y., Dingwell D.B. Kimberlite ascent by assimilation – fuelled buoyancy. *Nature*, 2012, vol. 481, pp. 352-356. <https://doi.org/10.1038/nature10740>

Kopylova M.G., Matveev S., Raudsepp M. Searching for parental kimberlite melt. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, vol. 71, pp. 3616-3629. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2007.05.009>

Mitchell R.H. Petrology of hypabyssal kimberlites: relevance to primary magma compositions. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2008, vol. 174, pp. 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2007.12.024>

Jones T.J., Russell J.K., Porritt L.A., Brown R.J. Morphology and surface features of olivine in kimberlite: implication for ascent processes. *Solid Earth*, 2014, vol. 5, pp. 313-326. <https://doi.org/10.5194/se-5-313-2014>.

Arndt N.T., Guitreau M., Boullie A. M., le Roex A., Tommasi A., Cordier P., Sobolev A. Olivine and the origin of kimberlite. *J. Petrol.*, 2010, vol. 51, pp. 573-602. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp080>.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V. Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types compositions and origins. *J. Petrol.*, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 823-839. <https://doi.org/10.1093/petrology/egm033>.

Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Kovjazin S.V., Batanova V.G., Kuzmin D.V. Paragenesis and complex zoning of olivine macrocrysts from unaltered kimberlite of the Udachnaya-East pipe, Yakutia: relationship with the kimberlite formation conditions and evolution. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 1-2, pp. 260-279. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.019>.

Patterson M., Francis D., McCanless T. Kimberlites: Magmas or mixtures? *Lithos*, 2009, vol. 112S, p. 191-200. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.06.004>.

Skinner E.M.W., Clement C.R. Mineralogical classification of southern African kimberlites. *Boyd FR, Meyer HOA (eds.) The Mantle Sample. 2nd International Kimberlite Conference*, 1979, American Geophysical Union, Washington, D. C., pp. 129-139.

Chepurov A.I., Tomilenko A.A., Zhimulev E.I., Sonin V.M., Chepurov A.A., Kovjazin S.V., Timina T.Y., Surkov N.V. The conservation of an aqueous fluid in inclusions in minerals and their interstices at high pressures and temperatures during the decomposition of antigorite. *Russian Geology and Geophysics*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 234-246. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2012.02.002>.

Sparks R.S.J., Brooker R.A., Field M., Kavanagh J., Schumacher J.C., Walter M.J., White J. The nature of erupting kimberlite melts. *Lithos*, 2009, vol. 112S, pp. 429-438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.032>.

Chepurov A.I., Zhimulev E.I., Agafonov L.V., Sonin V.M., Chepurov A.A., Tomilenko A.A. The stability of ortho- and clinopyroxenes, olivine, and garnet in kimberlitic magma. *Russian Geology and Geophysics*, 2013, vol. 54, no. 4, pp. 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.03.004>.

Грязнов Иван Александрович
инженер-исследователь
Институт геологии и минералогии

Gryaznov Ivan Alexandrovich
Research Engineer
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy

*им. В. С. Соболева СО РАН
630090, Россия, г. Новосибирск,
просп. акад. Коптюга, 3
тел.: 8(383)306-64-03
e-mail: Gryaznov_9@mail.ru*

*SB RAS
3, pr. Acad. Koptyug, Novosibirsk, 630090,
Russian Federation
tel.: 8(383)306-64-03
e-mail: Gryaznov_9@mail.ru*

Карпович Захар Алексеевич
*инженер-исследователь
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН
630090, Россия, г. Новосибирск,
просп. акад. Коптюга, 3
тел.: 8(383)306-64-03
e-mail: zkarпович@yandex.ru*

Karpovich Zakhar Alekseevich
*Research Engineer
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy
SB RAS
3, pr. Acad. Koptyug, Novosibirsk, 630090,
Russian Federation
tel.: 8(383)306-64-03
e-mail: zkarпович@yandex.ru*

Ишутин Илья Андреевич
*инженер-исследователь
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН
630090, Россия, г. Новосибирск, просп.
акад. Коптюга, 3
тел.: 8(383)306-64-03
e-mail: ilya.ishutin.96@mail.ru*

Ishutin Ilya Andreevich
*Research Engineer
Sobolev institute of Geology and Mineralogy
SB RAS
3, pr. Acad. Koptyug, Novosibirsk, 630090,
Russian Federation
tel.: 8(383)306-64-03
e-mail: ilya.ishutin.96@mail.ru*

Жимулев Егор Игоревич
*доктор геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник
Институт геологии и минералогии
им. В. С. Соболева СО РАН
630090, Россия, г. Новосибирск, просп.
акад. Коптюга, 3
тел.: 8(383)306-64-03
e-mail: ezhimulev@igm.nsc.ru*

Zhimulev Egor Igorevich
*Doctor of Sciences (Geology
and Mineralogy), Senior Researcher
Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,
SB RAS
3, pr. Acad. Koptyug, Novosibirsk, 630090,
Russian Federation
tel.: 8(383)306-64-03
e-mail: ezhimulev@igm.nscru*