

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ ОЛИВИНА В СИБИРСКИХ АЛМАЗАХ МЕТОДОМ ДИФРАКЦИИ ОБРАТНОРАССЕЯННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ: ПРИЗНАКИ СИНГЕНЕТИЧЕСКОГО РОСТА?

Р.Д. Нойзер¹, Г.-П. Шертл¹, А.М. Логвинова^{2,3}, Н.В. Соболев^{2,3}

¹*Ruhr-University Bochum, Institute of Geology, Mineralogy and Geophysics, 44780 Bochum, Germany*

²*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

³*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

С целью выявления соотношений между алмазами и включенными в них оливинами впервые исследованы кристаллографические взаимосвязи четырех алмазов из кимберлитовой трубки Юбилейная (Якутия) и включенных в них в общей сложности восьми кристаллов оливина методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD). Кристаллографические совпадения между оливином и алмазом выявлены в 15 случаях, хотя однозначный вывод о последовательности кристаллизации указанных минералов на данном количестве образцов сделать не удалось. Подтверждена перспективность нового метода подхода к выявлению закономерностей взаимной ориентировки алмаза и включения, однако решение вопроса о том, образовались ли оливины раньше алмазов (протогенетические включения) либо одновременно с алмазами (сингенетические включения), требует привлечения более представительного количества образцов.

Алмаз, оливин, кристаллографические соотношения, дифракция обратнорассеянных электронов.

AN EBSD STUDY OF OLIVINE INCLUSIONS IN SIBERIAN DIAMONDS: EVIDENCE FOR SYNGENETIC GROWTH?

R.D. Neuser, H.-P. Schertl, A.M. Logvinova, and N.V. Sobolev

Crystallographic relations between four diamonds from the Yubileynaya pipe (Yakutia) and inclusions of eight olivine crystals in them are first studied by the EBSD method. Crystallographic coincidence between the olivine and diamond has been revealed in 15 samples, though we failed to make an unambiguous conclusion about the sequence of the mineral crystallization. It is confirmed that the new approach is promising for elucidation of the regularities of the mutual orientation of diamond and inclusion. However, more samples are required to establish whether the olivines formed earlier than the diamonds (progenetic inclusions) or synchronously with them (syngenetic inclusions).

Diamond, olivine, crystallographic relations, back-scattered electron diffraction

ВВЕДЕНИЕ

Практически общепринято, что природные алмазы кристаллизовались на мантийных глубинах и были вынесены на поверхность кимберлитовыми, лампроитовыми и лампрофировыми магмами. Но что же можно узнать о каждом отдельно взятом алмазе на основании деталей минералогического и химического состава извлеченного из мантии исходного материала? Изучение самих алмазов и их минеральных и флюидных включений является исключительно важным для понимания природы их источника и, следовательно, особенностей глубинных процессов в верхней мантии. Сам алмаз может являться источником информации об особенностях изотопного состава углерода и азота в глубинных зонах земной коры и верхней мантии [Shirey et al., 2013]. Относительно состава среды образования алмазов исчерпывающая информация содержится в парагенезисах их минеральных включений: ультраосновном (перидотитовом) — У(П)-типе парагенезиса включений и эклогитовом — Э-типе [Meyer, Boyd, 1972; Соболев, 1974; Meyer, 1985, 1987; Shirey et al., 2013]. Это означает, что хотя кимберлиты, лампроиты и лампрофиды транспортируют алмазы к поверхности, они растут в иной, перидотитовой либо эклогитовой среде. Многочисленные перидотитовые минеральные включения (оливин, хромит, энстатит, пироп, флогопит, хромдиопсид) обнаружены в алмазах различных месторождений, и это привело к заключению [Harris, 1968a; Meyer, Boyd, 1972; Соболев, 1974; Ефимова, Соболев, 1977; Shirey et al., 2013], что перидотитовые (У/П-тип парагенезиса) включения в целом преобладают над эклогитовыми (Э-тип парагенезиса), включающими кроме таких главных минералов, как Mg-Fe-Са гранаты и омфациит, также коэсит, кианит,

© Р.Д. Нойзер, Г.-П. Шертл, А.М. Логвинова, Н.В. Соболев, 2015

DOI: 10.15372/GiG20150123

ортопироксен, санидин, корунд, биотит, флогопит, магнетит, ильменит, рутил. Детали минеральных ассоциаций, безусловно, зависят от исходного состава эклогитовых пород. Такие включения, как рутил, самородное железо, ильменит, флогопит, ортопироксен, высокомагнезиальные гранаты, типичны как для У(II)-, так и для Э-типа парагенезисов [Sobolev et al., 1999]. Благодаря использованию новейшей высокоразрешающей аналитической техники обнаружена целая серия особо редких включений, таких как различные карбонаты, галиды, апатит, ферропериклаз, К-Fe сульфиды, карбид железа и др. Флюидные включения являются важным индикатором плавления и/или мантийных метасоматических процессов, и их изучение способствует лучшему пониманию природы и состава алмазообразующих флюидов [Logvinova et al., 2008; Klein-BenDavid et al., 2009; Логвинова и др., 2011; и др.]. Просвечивающая электронная микроскопия и дифракция обратнорассеянных электронов (EBSD) используются как важные методы для возможности выявления взаимной кристаллографической ориентировки вмещающего алмаза и захваченных им минеральных включений. Во многом благодаря использованию новой микроаналитической техники (в частности, нано-SIMS, FIB, новейшей рентгеновской аппаратуры), существенная новая информация получена за два последних десятилетия.

Впервые интерес к изучению минеральных включений в алмазах проявился еще в XIX в. вскоре после открытия месторождений алмазов в Южной Африке [Cohen, 1876], когда появилось первое сообщение о включении гематита в алмазе массой 80 карат. Позднее было описано несколько разных типов включений: гранаты различной окраски, оливин и ильменит; циркон и слюда были охарактеризованы в качестве «вероятных» включений [Sutton, 1921]. Подробный обзор петрографии и минералогии кимберлитов Южной Африки выполнен в первой половине XX в. [Williams, 1932], в котором уделено внимание характеристике включений в алмазах, в числе которых отмечены гранат, оливин, пироксен (включая хромдиопсид), биотит, графит, магнетит и ильменит. В связи с историей роста алмаза, в настоящее время внимание привлекает проблема последовательности и связи роста алмаза и включений. Современные исследования подчеркивают существенные вариации состава многоминеральных включений гранатов в алмазах, в частности, из месторождений Австралии [Griffin et al., 1988] и тр. Мир (Якутия, Россия) и других регионов [Sobolev et al., 1998; Stachel, Harris, 2008]. Минеральные включения могли образоваться протогенетически, т.е. до захвата их алмазом [Meyer, 1987] либо кристаллизоваться сингенетически (одновременный рост включения и вмещающего алмаза). Они могли быть также эпигенетическими (т.е. вторичными фазами). Еще около ста лет тому назад были описаны эпигенетические «псевдовключения» [Sutton, 1921], заполняющие трещины в алмазе. Такими включениями являлись кальцит, апофиллит, пектолит и др. Подобные данные также получены для исключительно устойчивого минерала циркона при исследовании условий образования эпигенетических метаморфических «псевдовключений» в ранней генерации магматических цирконов [Schertl, Schreyer, 1991; Gebauer et al., 1997; Zhang et al., 2009]. Что касается возможности сингенетического либо протогенетического образования минералов, то дискуссия по этой проблеме продолжается в течение ряда десятилетий. Важным индикатором, свидетельствующим о сингенетическом взаимоотношении алмаза и включения является морфология соответствующего включенного минерала. Например в случае, если ромбический оливин или моноклинный пироксен присутствуют в алмазе в виде октаэдрического, кубического или кубооктаэдрического кристалла [Соболев и др., 1972; Nestola et al., 2011] и, таким образом, образуют «отрицательные кристаллы», то с известной долей вероятности можно говорить о сингенетическом росте. Такие кристаллы были впервые описаны в самом начале 1970-х годов для включений пироба в виде октаэдра [Соболев и др., 1970], а также кубооктаэдрических оливина, клино- и ортопироксена в якутских алмазах [Соболев и др., 1972]. Следующей особенностью, указывающей на возможность сингенетического роста, являются кристаллографические соотношения вмещающего алмаза и включенной фазы, продемонстрированные для серии образцов [Футенгендлер, Франк-Каменецкий, 1961; Зюзин, 1967; Orlov, 1977]. Наличие таких соотношений может служить достаточно убедительным доказательством сингенетического роста [Wiggers de Vries et al., 2011; Shirey et al., 2013]. Однако, благодаря возможности «позднего» эпитаксиального нарастания алмаза на ранее образованные минералы, такие как оливин или клинопироксен, возможна интерпретация протогенетического характера включений в алмазах, хотя они могут являться и кристаллографически взаимосвязанными [Taylor et al., 2003].

Убедительным свидетельством одновременного роста для макрокристаллов служит наличие индукционной штриховки на поверхности их раздела. Такая штриховка иногда фиксируется на некоторых включениях, как это показано для сложного параллельного октаэдрического сростка кристаллов рутила, извлеченного из алмаза тр. Мир [Sobolev, Yefimova, 2000], а также для параллельного сростка октаэдрических кристаллов граната с отчетливо выраженными ступенчатыми поверхностями октаэдров [Соболев и др., 1997].

Главной целью настоящей статьи является проведение систематического исследования возможных взаимосвязей кристалла и включения на примере алмазов из тр. Юбилейная (Якутия), содержащих включения оливина.

Кристаллографические соотношения для удлиненного (игольчатого) включения оливина, находящегося внутри алмаза, и самого алмаза ранее изучались с помощью монокристалльной рентгеновской камеры Вайссенберга [Mitchell, Giardini, 1953]. Этими авторами показано, что идиоморфный кристалл оливина, удлиненный вдоль направления [101], расположен параллельно плоскости (111) и ориентирован в направлении [101] алмаза. Кристаллографическая интерпретация призматического роста оливина параллельно зоне [101] была представлена позже [Hartman, 1954], в комментарии к указанной статье.

В недавно опубликованной статье [Nestola et al., 2014] представлены результаты исследования, выполненного с применением монокристалльного рентгеновского анализа, 21 алмаза из кимберлитовой тр. Удачная, содержащих 51 включение оливина. Было обнаружено только три включения оливина, показывающих ориентировку, сопоставимую с продемонстрированной ранее [Mitchell, Giardini, 1953]. Таким образом, возможность существования систематических кристаллографических соотношений для включений оливина в алмазе поставлена под сомнение [Nestola et al., 2014].

В настоящее время такие кристаллографические соотношения могут быть также проверены с помощью метода дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD). Серия поставленных вопросов: могут ли наблюдаться какие-либо топотаксические соотношения между алмазом и оливином?, могут ли наблюдаться различные типы согласования решеток или существует только один тип?, существует ли реальная возможность выяснения относительной последовательности роста, т.е. можно ли выявить различие между сингенетической или протогенетической природой?, — могут способствовать лучшему пониманию процессов кристаллизации алмаза в условиях верхней мантии.

МЕТОД АНАЛИЗА

Для определения возможных топотаксических соотношений структур изучаемых алмазов и оливинов применялся метод дифракции обратнорассеянных электронов [Zhou, Wang, 2006], дополнительно для исследуемых алмазов изучалась вероятность двойникования. EBSD выполнен в лаборатории Рурского Университета (Бохум, Германия). Для всех изучаемых алмазов были приготовлены полированные пластинки, которые в дальнейшем дополнительно отполированы химико-механическим способом с помощью коллоидной суспензии кремнезема (Struers OPS), а затем покрыты тонким слоем углерода. Анализ выполнялся с помощью сканирующего электронного микроскопа LEO/ZEISS 1530 Gemini, оснащенного детектором EBSD (Nordlys, OXFORD Instruments). Условия анализа были следующими: ускоряющее напряжение 20 кВ, ток на образце 1.3 нА, апертура 60 мкм, рабочее расстояние 25 мм, угол наклона шлифа 70°. Оборудование EBSD в сочетании с программным обеспечением «Aztec», OXFORD Instruments позволяет выполнить количественный анализ кристаллографической ориентировки даже мелких кристаллов, имеющих размеры вплоть до 500 нм, с получением информации о трехмерной характеристике исследуемых минералов [Day, Trimby, 2005]. По нашим наблюдениям, среднее угловое отклонение анализов составляет менее 1°.

В процессе измерения кристаллографической ориентировки алмаза и оливина, в первую очередь их «полосы Кикучи», сложные взаимоотношения которых отражают воздействие обратнорассеянных электронов от индивидуальных граней кристалла на экран детектора, были суммированы и обработаны. С целью визуализации пространственной ориентации *c*-осей кристаллов, индивидуальные кристаллы маркированы зеленым цветом для оливина и красным для алмаза. Окончательная информация о кристаллической ориентации нанесена на стереографическую проекцию (сетка Шмидта, нижнее полушарие). Для большей ясности в дальнейшем соответствующая нормаль грани кристалла {*huv*} выражена вектором, представленным осью [*uvw*].

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

Н.В. Соболев с коллегами [Sobolev et al., 2008, 2009] представили результаты детального исследования химического состава большого количества включений оливина из алмазов главных сибирских месторождений, включая трубки Айхал, Юбилейная, Интернациональная, Удачная, Мир, Комсомольская, Сытыканская, россыпных месторождений северо-восточной части Сибирского кратона и Северного Урала, а также, для сравнения, из алмазов Индии и месторождения Снэп Лейк (Канада).

В рамках настоящей статьи были выбраны четыре кристалла алмаза из тр. Юбилейная, содержащие включения оливина, составы которых в единой полированной поверхности с алмазом были изучены ранее [Sobolev et al., 2008]. Каждый отполированный образец алмаза был извлечен из держателя, вставлен в отдельный металлический цилиндр, дополнительно отполирован и химико-механически подготовлен для EBSD измерений. Размер алмазов варьировал между 1250 и 1400 мкм; все кристаллы, подготовленные для исследования методом EBSD, содержали от одного до шести включений оливина [Sobolev et al., 2008, обр. Yb-06-1, Fig. 2A]. В указанном образце шесть включений содержат в среднем 92.86 форстерита. Содержание NiO = 0.368 ± 0.004 мас. %.

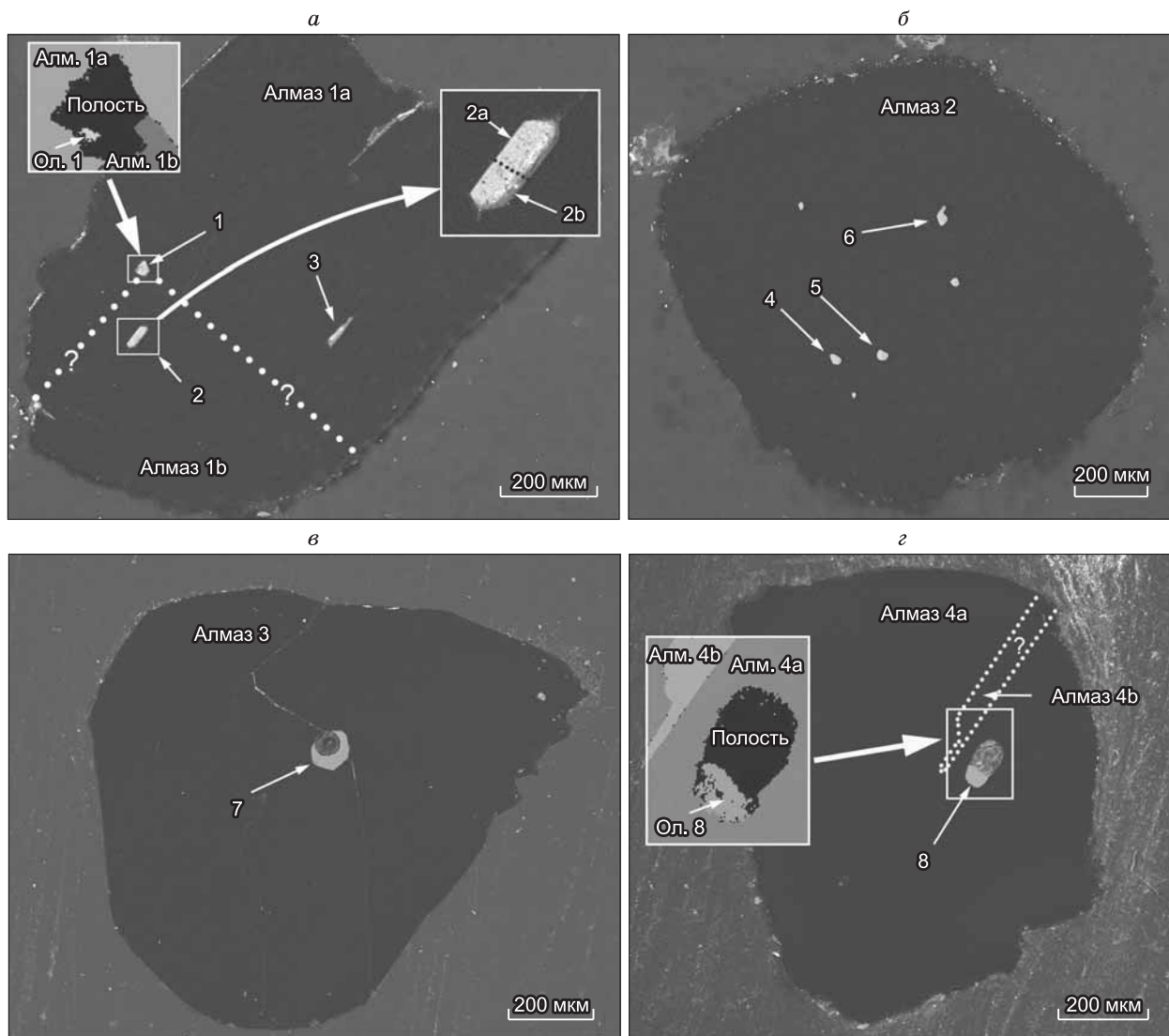


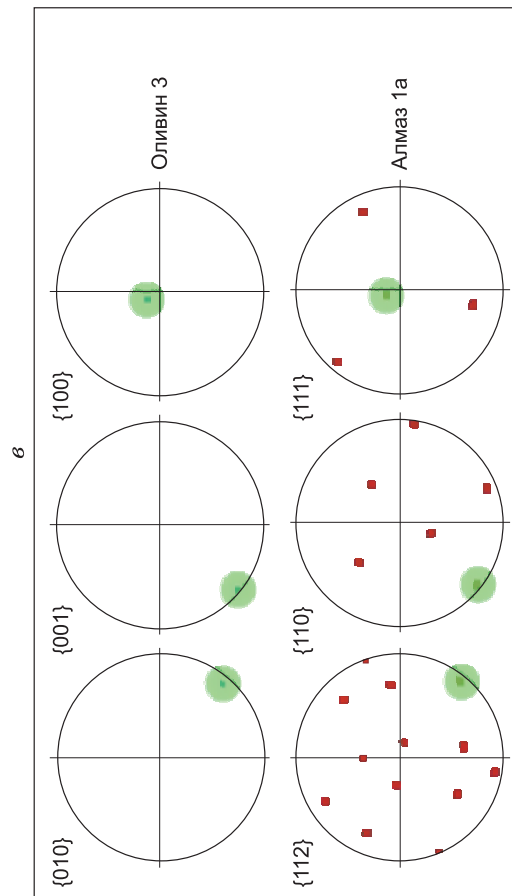
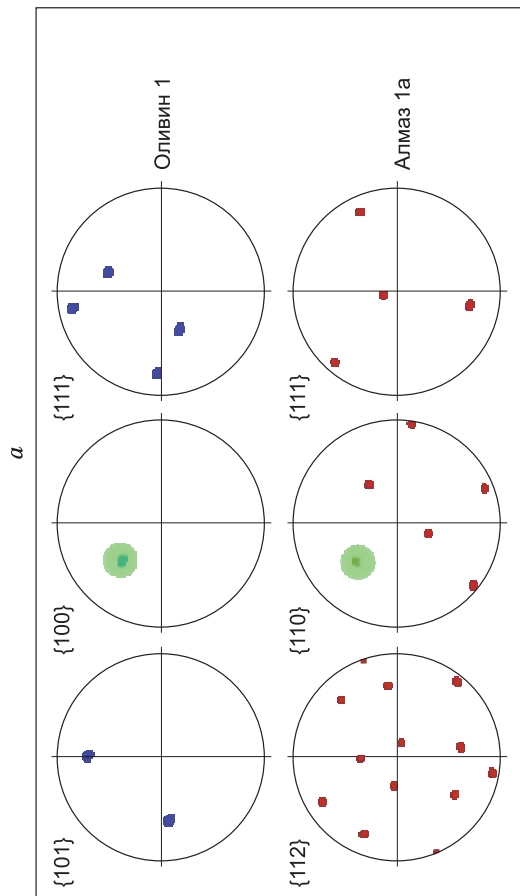
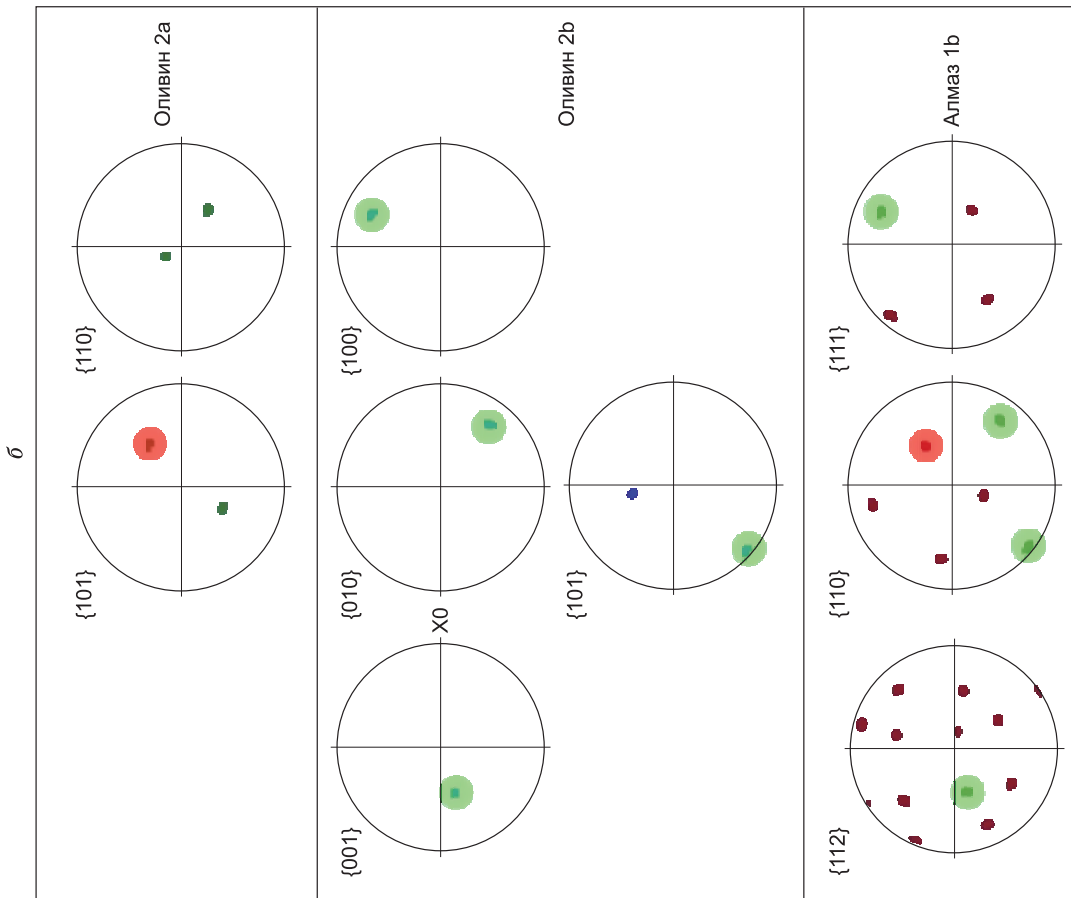
Рис. 1. a-d. Включения оливина в алмазах (изображение в обратнорассеянных электронах).

Оливины 1—8 представляют пары зерен, показанные в табл. 1; оливин 6 — совпадение не наблюдается; включения без символов — не определены методом EBSD.

Содержание форстерита в трех включениях оливина из обр. Yb-07 соответственно 89.79; 91.79 и 92.16, наряду с содержанием NiO, равным соответственно 0.46; 0.34 и 0.31 мас. % [Sobolev et al., 2008]. Изображение указанных алмазов с включениями в единой полированной поверхности в обратнорассеянных электронах представлены на рис. 1, a. Еще раз подчеркиваем, что для алмазов из месторождений Якутии, так же как и других регионов земного шара, оливин является самым распространенным включением для более чем 50 % всех алмазов У(П)-типа парагенезиса как в виде единичных включений, так и в полиминеральных парагенезисах алмазов мелких классов крупности, а также кристаллов, масса которых превышает 10 карат [Ефимова, Соболев, 1977; Соболев и др., 2001; Taylor et al., 2003].

РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью получения информации о возможных кристаллографических соотношениях между вмещающим алмазом и включением оливина были дополнительно изучены четыре ранее описанных [Sobolev et al., 2008] кристалла алмаза из тр. Юбилейная (см. рис. 1). Получены кристаллографические данные для восьми различных включений оливина, в то время как включение 2 (см. рис. 1, a) представляет собой сросток двух кристаллов оливина, включения 1 и 3-8 являются монокристаллами. Два из



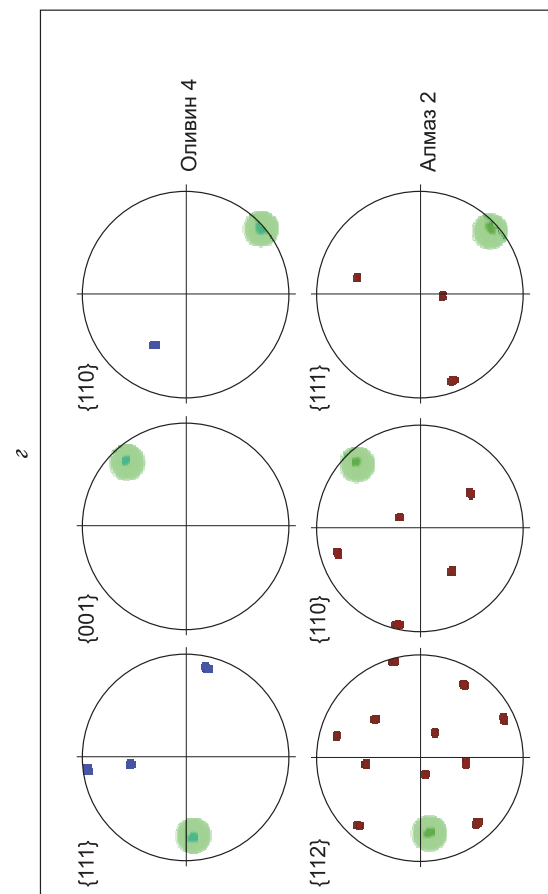
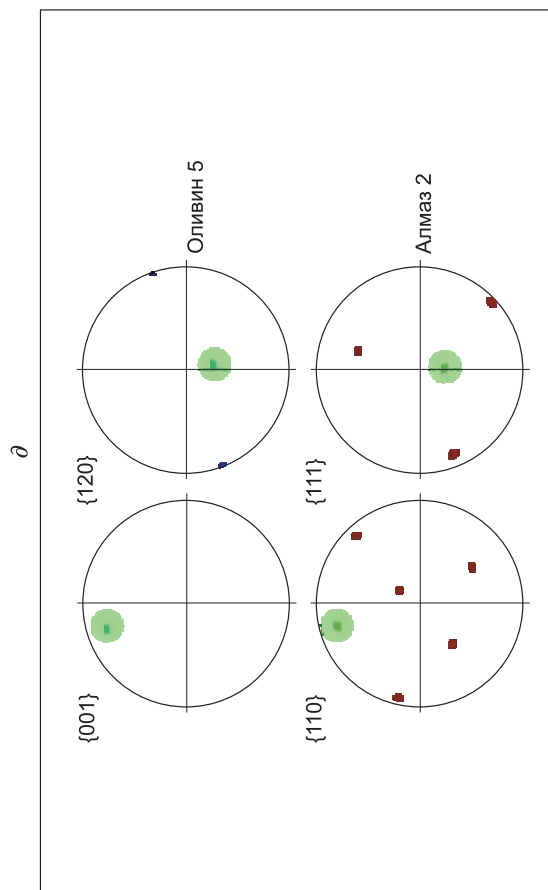


Рис. 2. Стереографические проекции с соответствующими номерами плоскостей оливина и алмаза; номера оливина и алмаза соответствуют рис. 1.

а — зеленые символы — соответствующая пара оливин 1/алмаз 1а; *б* — красные символы — соответствующая пара оливин 2а/алмаз 1б; зеленые символы — соответствующие пары оливин 2б/алмаз 1б; *в* — зеленые символы — соответствующие пары оливин 3/алмаз 1а; *г* — зеленые символы — соответствующие пары оливин 4/алмаз 2; *д* — зеленые символы — соответствующие пары оливин 5/алмаз 2; *е* — зеленые символы — соответствующие пары оливин 7/алмаз 3; *ж* — зеленые символы — соответствующие пары оливин 8/алмаз 4б.

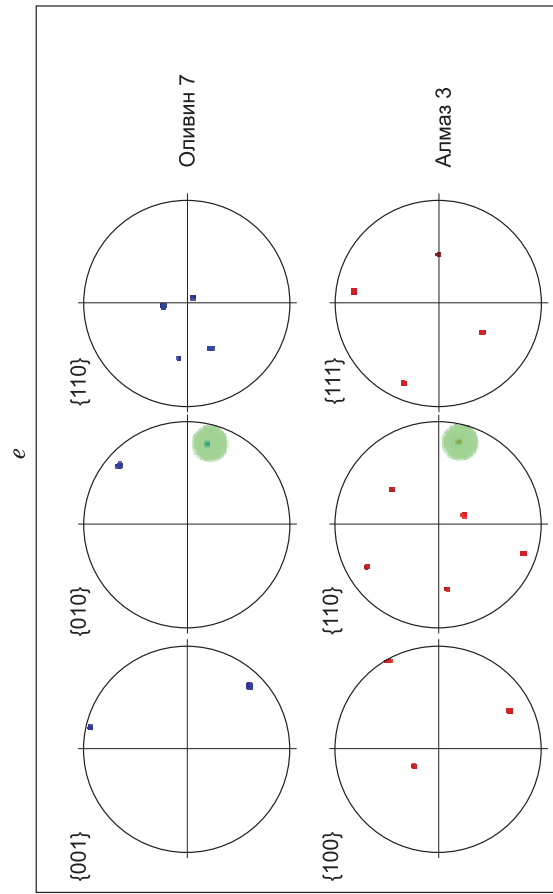
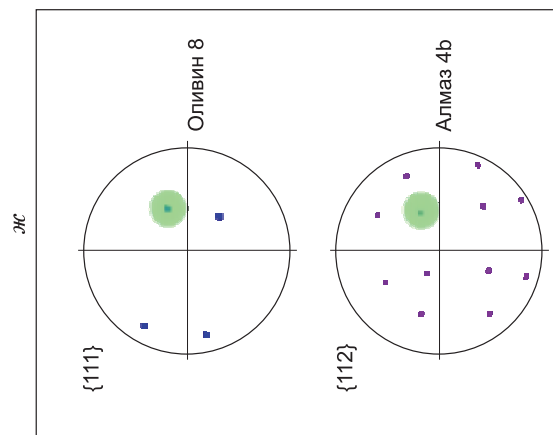


Таблица 1. Кристаллографические соотношения между осями зон [UVW] оливина и вмещающего алмаза

Включения	Оливин	Алмаз
Ол-1	[100]	[110]
Ол-2а	[101]	[110]
Ол-2б	[010]	[110]
Ол-2в	[101]	[110]
Ол-2б	[100]	[111]
Ол-2б	[001]	[112]
Ол-3	[001]	[110]
Ол-3	[100]	[111]
Ол-3	[010]	[112]
Ол-4	[001]	[110]
Ол-4	[110]	[111]
Ол-4	[111]	[112]
Ол-5	[001]	[110]
Ол-5	[120]	[111]
Ол-6	—	Нет совпадений
Ол-7	[010]	[110]
Ол-8	—	Нет совпадений

мосвязана с решеткой вмещающего алмаза так, что направление $[001]_{\text{Ол-2б}}$ параллельно $[112]_{\text{Алм-1б}}$, $[010]_{\text{Ол-2б}}$ и $[101]_{\text{Ол-2б}}$ параллельны $[110]_{\text{Алм-1б}}$, а $[100]_{\text{Ол-2б}}$ параллельно $[111]_{\text{Алм-1б}}$ (см. рис. 2, б). Аналогично $[010]$, $[001]$ и $[100]$ оливина 3 (см. рис. 1, а) соответствуют $[112]$, $[110]$ и $[111]$ алмаза 1а (см. рис. 2, в).

Алмаз 2 содержит шесть включений оливина (см. рис. 1, б), имеющих одинаковый состав [Sobolev et al., 2008], два из них демонстрируют совпадение решетки с вмещающим алмазом, один не показывает признаков взаимосвязи, а остальные три не исследованы из-за проблем, связанных с подготовкой образца. Получены следующие совпадения для оливина 4 (см. рис. 1, б): направление $[111]_{\text{Ол-4}}$ параллельно $[112]_{\text{Алм-2}}$, $[001]_{\text{Ол-4}}$ параллельно $[110]_{\text{Алм-2}}$, а $[110]_{\text{Ол-4}}$ параллельно $[111]_{\text{Алм-2}}$ (см. рис. 2, з). Соответственно для оливина 5 $[001]_{\text{Ол-5}}$ параллельно $[110]_{\text{Алм-2}}$; дополнительно присутствует также совпадение $[120]_{\text{Ол-5}}$ и $[111]_{\text{Алм-2}}$ (см. рис. 2, д).

Для алмаза 3 (см. рис. 1, в) наблюдалось только одно совпадение $[010]_{\text{Ол-7}}$ параллельно $[110]_{\text{Алм-3}}$. Включение оливина 8 в алмазе 4 не показывает никакого кристаллографического соотношения с вмещающим алмазом 4а (см. рис. 1, з). Однако имеется совпадение между $[111]_{\text{Ол-8}}$ и маленьким двойником алмаза $[112]_{\text{Алм-4б}}$ (см. рис. 2, ж), хотя эта пара оливин/алмаз и не находится в контакте на наблюдающейся полированной поверхности.

исследованных алмазов (алмаз 1, см. рис. 1, а) и 4 (см. рис. 1, з) сдвойникованы, что доказано методом EBCD.

Получены следующие результаты: направление $[100]$ включения оливина 1 (см. рис. 1, а; 2, а) параллельно направлению $[110]$ алмаза (табл. 1). Это включение оливина соприкасается с другим сдвойникованным кристаллом алмаза (алмаз 1б), но эта пара не проявляет никаких признаков закономерных соотношений. Другое включение оливина (оливин 2, см. рис. 1, а) в алмазе 1б не является монокристаллической фазой, а представляет собой сросток с другим кристаллом (см. врезку на рис. 1, а). Из рассмотрения рис. 2, б становится ясно, что обе части этого включения оливина кристаллографически относятся к решетке вмещающего алмаза. Два совпадения фиксируются для верхней части включения (оливин 2а; см. рис. 1, а), в первую очередь между направлениями $[101]_{\text{Ол-2а}}$ и $[110]_{\text{Алм-1б}}$, и во вторую очередь между $[110]_{\text{Ол-2а}}$ и $[111]_{\text{Алм-1б}}$. Вторая часть включения оливина (оливин 2б) также взаи-



Рис. 3. Оливин (зеленый) с включением алмаза (белый) внутри другого алмаза (белый), по [Williams, 1932].

СИНГЕНЕТИЧЕСКОЕ ИЛИ ПРОТОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВКЛЮЧЕНИЙ ОЛИВИНА В АЛМАЗЕ

Важная информация, касающаяся значения минеральных включений в алмазах вообще, а также и последовательности кристаллизации минералов, была представлена в классической литературе более чем 80 лет тому назад [Williams, 1932]. В этой работе приведены примеры включения желтого октаэдра алмаза в бесцветном октаэдре, а также зеленого октаэдра, включенного в желтый ромбододекаэдр. Наиболее интересным наблюдением в связи с последовательностью кристаллизации является образец, представляющий включение алмаза в оливине, который, в свою очередь, является включением в другом алмазе. Этот последний пример представлен на рис. 3 [Williams, 1932]. В соответствии с наблюдениями, приведенными в классических работах, можно с известной долей вероятности утверждать возможность сингенетического роста оливина и алмаза.

Состав включений оливина в двух алмазах, представленных на рис. 1, *a*, был изучен ранее [Sobolev et al., 2008]. Следует подчеркнуть, что алмаз 1 (см. рис. 1, *a*), по данным изучения с помощью катодолюминесцентной микроскопии, демонстрирует очень сложную ростовую историю, вероятно, связанную с пластической деформацией. Одно из включений оливина (оливин 1, см. рис. 2, *a*) описан как «аномальный» по составу, содержащий менее 90 % форстеритового компонента [Sobolev et al., 2008, Table 2, обр. УВ06-7-2]. В указанной работе предположено, что менее магнезиальный оливин представляет более раннюю генерацию по сравнению с более магнезиальными оливинами. Важно подчеркнуть, что оливин, казавшийся однородным ([Sobolev et al., 2008, Fig. 1b], а также включение 2, см. рис. 1, *a* настоящей работы), в действительности представляет собой сросток двух кристаллов, имеющих различную кристаллографическую ориентировку, и что оба эти оливина кристаллографически связаны со структурой вмещающего алмаза (рис. 1, *a*). Для алмаза 2 (см. рис. 1, *b*) также определен химический состав всех шести включенных оливинов, который оказался одинаковым, с содержанием 92.86 % форстерита [Sobolev et al., 2008]. Три этих включения оливина исследовали методом EBSD: для двух из них, продемонстрировавших совпадение со структурой вмещающего алмаза (см. рис. 2, *z*, *d*), кристаллографическая ориентировка оказалась разной.

Независимо от возможного син- или протогенетического образования оливина, при изучении серии алмазов с включениями оливина из тр. Удачная [Nestola et al., 2014], только три из 51 включения в 21 алмазе показали соответствие кристаллических решеток. Это противоречит нашим результатам — изучение четырех кристаллов алмаза, содержащих восемь включений оливина из тр. Юбилейная, продемонстрировали 15 совпадений. В табл. 2 показано, что в трех включениях оливина направления [001] совпадают с направлением [110] алмаза. Соответственно два совпадения были установлены между направлениями [010] и [101] оливина, [110] алмаза, а также между [100] оливина и [111] алмаза. Таким образом, несмотря на полученные данные, только по четырем алмазам и восьми включениям, вероятно, существуют различные структурные соотношения между включениями оливина и вмещающим алмазом. Значительно больший объем данных получен для тр. Удачная [Nestola et al., 2014], но, вероятно, для этой трубки полученные структурные соотношения могут быть скорее исключением, чем правилом. Интерпретация, вероятно, должна включать вероятность протогенетического образования оливина по отношению к алмазу для тр. Удачная по сравнению с преобладающим сингенетическим образованием оливина для тр. Юбилейная, выраженном в предпочтительной структурной ориентировке. Здесь наблюдается очевидное несоответствие различных соотношений между оливином и вмещающим алмазом для трубок Удачная и Юбилейная и более обоснованный вывод можно будет сделать, имея представительную базу данных. Для общего вывода необходимо значительно увеличить базу данных, включив в нее другие месторождения, где известны алмазы У(П)-типа парагенезиса, а также включив в исследования другие первичные минералы, такие как пироп, хромдиопсид, энстатит, хромит с целью лучшего понимания их взаимоотношения с алмазами. Было бы также интересно изучить некоторые алмазы с включениями из тр. Удачная методом EBSD и ряд алмазов из тр. Юбилейная методом монокристалльного рентгеновского анализа с целью сопоставления обоих методов.

Вопросы о реальности особенностей сингенетического роста были поставлены в статье [Taylor et al., 2003]. Ссылаясь на ряд работ [Harris, 1968a,b; Sobolev и др., 1972; Бакуменко и др., 1984; Meyer,

Таблица 2. **Итоговые замеренные кристаллографические совпадения между оливином и алмазом**

3 совпадения	$[001]_{\text{Ол}} \text{ — } [110]_{\text{Алм}}$
2 совпадения	$[010]_{\text{Ол}} \text{ — } [110]_{\text{Алм}}, [101]_{\text{Ол}} \text{ — } [110]_{\text{Алм}}, [100]_{\text{Ол}} \text{ — } [111]_{\text{Алм}}$
1 совпадение	$[100]_{\text{Ол}} \text{ — } [110]_{\text{Алм}}, [110]_{\text{Ол}} \text{ — } [111]_{\text{Алм}}, [120]_{\text{Ол}} \text{ — } [111]_{\text{Алм}}, [001]_{\text{Ол}} \text{ — } [112]_{\text{Алм}}, [010]_{\text{Ол}} \text{ — } [112]_{\text{Алм}}, [111]_{\text{Ол}} \text{ — } [112]_{\text{Алм}}$

1985, 1987; Пальянов и др., 1994], эти авторы подтверждают, что унаследование включением морфологии вмещающего алмаза рассматривается в качестве наиболее обычного критерия сингенетического роста. Действительно, кубооктаэдрическая морфология включений оливина в алмазах наблюдается часто [Соболев и др., 1997; Taylor et al., 2003]. В то же время известны примеры сингенетического роста, когда указанные особенности не доминируют и даже никогда не наблюдались. В частности, в метаморфических породах массива Дора-Майра, ассоциация пироп + коэсит образовалась за счет ассоциации тальк + кианит в условиях метаморфизма сверхвысоких давлений [Schertl et al., 1991]. Несмотря на то, что бывшие флюидные включения в пиропе (заполненные теперь вторичными фазами) соответствуют по морфологии гранату, образуя «отрицательные кристаллы», коэсит, несмотря на его сингенетичность с пиропом, является ксеноморфным. Во всяком случае, при эпитаксиальных соотношениях между включением и вмещающим алмазом это может рассматриваться в качестве критерия сингенетического роста [Pearson, Shirey, 1999], но не окончательного доказательства. Делая общий вывод, мы полагаем, что сингенетический рост оливина и алмаза для тр. Юбилейная вероятен, но тем не менее отметим, что мы не можем убрать вопросительный знак из заголовка статьи.

Мы благодарны г-же Шреммер (лаборатория подготовки образцов для исследования Института геологии, минералогии и геофизики, Рурский университет, Бохум) за сложную переполровку и химико-механическую обработку образцов алмаза.

Работа поддержана грантом РФФИ 14-05-00262.

ЛИТЕРАТУРА

Бакуменко И.Т., Соболев Н.В., Хохряков А.Ф., Чепуров А.И. Ограниченные включения в кристаллах алмаза // Докл. АН СССР, 1984, т. 278, № 6, с. 1461—1465.

Ефимова Э.С., Соболев Н.В. Распространенность минеральных включений в якутских алмазах // Докл. АН СССР, 1977, т. 237 (6), с. 1475—1478.

Зюзин Н.И. О характере ориентировки включений граната в якутских алмазах // Геология и геофизика, 1967, (6) 126—128.

Логвинова А.М., Вирт Р., Томиленко А.А., Афанасьев В.П., Соболев Н.В. Особенности фазового состава наноразмерных кристаллофлюидных включений в аллювиальных алмазах северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1634—1648.

Пальянов Ю.Н., Хохряков А.Ф., Борздов Ю.М., Дорошев А.М., Томиленко А.А., Соболев Н.В. Включения в синтетических алмазах // ДАН, 1994, т. 338, № 1, с. 78—80.

Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии // Новосибирск, Наука, 1974, 246 с.

Соболев Н.В., Бартошинский З.В., Ефимова Э.С., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н. Ассоциация оливин—гранат—хромдиопсид из якутского алмаза // Докл. АН СССР, 1970, т. 192 (6), с. 1349—1352.

Соболев Н.В., Боткунов А.И., Бакуменко И.Т., Соболев В.С. Кристаллические включения с октаэдрической огранкой в алмазах // Докл. АН СССР, 1972, т. 204, с. 117—120.

Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Реймерс Л.Ф., Захарченко О.Д., Махин А.И., Усова Л.В. Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 358—370.

Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Логвинова А.М., Суходольская О.В., Солодова Ю.П. Распространенность и состав минеральных включений в крупных алмазах Якутии // ДАН, 2001, т. 376 (3), с. 382—386.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С. Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1588—1606.

Футергендлер С.И., Франк-Каменецкий В.А. Ориентированные вросстки оливина, граната и хромшпинелида в алмазах // Зап. ВМО, 1961, т. 90 (2), с. 90—106.

Cohen E. Über Einschlüsse in südafrikanischen Diamanten // Neues Jahrbuch Miner., Geol., Pal., 1876, p. 752—753.

Day A., Trimby P. Channel 5, 2005, p. 339, HKL-Technology, Hobro.

Gebauer D., Schertl H.-P., Brix M., Schreyer W. 35 Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps // Lithos, 1997, v. 41, p. 5—24.

Griffith W.L., Jaques A.L., Sie S.H., Ryan C.G., Cousens D.R., Suter G.F. Conditions of diamond growth: a proton microprobe study of inclusions in west Australian diamonds // Contr. Miner. Petrol., 1988, v. 99, p. 143—158.

Harris J.W. The recognition of diamond inclusions, Pt. 1: Syngenetic inclusions // Indust. Dia. Rev., 1968a, v. 28, p. 402—410.

- Harris J.W.** The recognition of diamond inclusions. Pt-2: Epigenetic mineral inclusions // *Indust. Dia. Rev.*, 1968b, v. 28, p. 335.
- Hartmann P.** A discussion on «oriented olivine inclusions in diamond» // *Amer. Miner.*, 1954, v. 39, p. 674—675.
- Klein-BenDavid O., Logvinova A.M., Schrauder M., Spetius Z.V., Weiss Y., Hauri E.H., Kamin-sky F.V., Sobolev N.V., Navon O.** High-Mg carbonatitic microinclusions in some Yakutian diamonds — a new type of diamond-forming fluid // *Lithos*, 2009, v. 112S, p. 648—659.
- Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V.** Nanometre-sized mineral and fluid inclu-sions in cloudy Siberian diamonds: new insights on diamond formation // *Europ. J. Miner.*, 2008, v. 20 (3), p. 317—331.
- Meyer H.O.A.** Genesis of diamond: A mantle saga // *Amer. Miner.*, 1985, v. 70, p. 344—355.
- Meyer H.O.A.** Inclusions in diamonds / Ed. P.H. Nixon // *Mantle xenoliths*, Wiley, Chichester, 1987, p. 501—523.
- Meyer H.O.A., Boyd F.R.** Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // *Geo-chim. Cosmoch. Acta*, 1972, v. 36, p. 1255—1274.
- Mitchell R.S., Giardini A.A.** Oriented olivine inclusions in diamond // *Amer. Miner.*, 1953, v. 38, p. 136—138.
- Nestola F., Nimis P., Ziberna L., Longo M., Marzoli A., Harris J.W., Manghnani M.H., Fedortchouk Y.** First crystal-structure determination of olivine in diamond: Composition and implications for provenance in the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2011, v. 305, p. 249—255.
- Nestola F., Nimis P., Angel R.J., Milani S., Bruno M., Prencipe M., Harris J.W.** Olivine with diamond imposed morphology included in diamond. Syngeneses or protogeneses? // *Int. Geol. Review*, 2014, v. 56, № 13, p. 1658—1667.
- Orlov Y.L.** The mineralogy of the diamond. Wiley & Sons, 1977.
- Pearson D.G., Shirey S.B.** Isotopic dating of diamonds // *Econ. Geol. Spec. Publ., SEG Reviews*, 1999, Ch. 6, p. 143—171.
- Schertl H.-P., Schreyer W.** The pyrope-coesite rocks and their country rocks at Parigi, Dora Maira Mas-sif, Western Alps: detailed petrography, mineral chemistry and PT-path // *Contr. Miner. Petrol.*, 1991, v. 108, p. 1—21.
- Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshaw S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J.** Diamonds and the geology of mantle carbon // *Rev. Miner. Geochem.*, 2013, v. 75, p.
- Sobolev N.V., Yefimova E.S.** Composition and petrogenesis of Ti-oxides associated with diamond // *Int. Geol. Rev.*, 2000, v. 42, p. 758—767.
- Sobolev N.V., Snyder G.A., Taylor L.A., Keller R.A., Yefimova E.S., Sobolev V.N., Shimizu N.** Ex-treme chemical diversity in the mantle during eclogitic diamond formation: evidence from 35 garnet and 5 py-roxene inclusions in a single diamond // *Int. Geol. Rev.*, 1998, v. 40 (7), p. 567—578.
- Sobolev N.V., Sobolev N.V., Snyder G.A., Yefimova E.S., Taylor L.A.** Significance of eclogitic and related parageneses of natural diamonds // *Int. Geol. Rev.*, 1999, v. 41 (2), p. 129—140.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** Olivine inclusions in Siberian diamonds: high precision approach to minor elements // *Europ. J. Miner.*, 2008, v. 20 (3), p. 305—315.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., So-bolev A.V.** Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamond and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 112S, p. 701—713.
- Stachel T., Harris J.W.** The origin of cratonic diamonds—constraints from mineral inclusions // *Ore Geol. Rev.*, 2008, v. 34, p. 5—32.
- Sutton J.R.** Inclusions in diamond from South Africa // *Mining Mag.*, 1921, v. 6, p. 208—210.
- Taylor L.A., Anand M., Promprated P., Floss C., Sobolev N.V.** The significance of mineral inclusions in large diamonds from Yakutia, Russia // *Amer. Miner.*, 2003, v. 88 (5—6), p. 912—920.
- Wiggers de Vries D.F., Winter D.A.M., Drury M.R., Bulanova G.P., Pearson D.G., Davies G.R.** Three-dimensional cathodoluminescence imaging and electron backscatter diffraction: looks for studying the genetic nature of diamond inclusions // *Contr. Miner. Petrol.*, 2011, v. 161 (4), p. 565—579.
- Williams A.F.** The genesis of diamond, 2 vols. London, 1932, E. Benn.
- Zhang Z.M., Schertl H.-P., Shen K., Wang J.L., Liou J.G.** Source of coesite inclusions within inherited magmatic zircons from Sulu UHP rocks, eastern China and their bearing for fluid-rock interaction and SHRIMP dating // *J. Metamorph. Geol.*, 2009, v. 27, p. 317—333.
- Zhou W., Wang Z.L.** Advanced scanning microscopy for nanotechnology // *Techniques and applications*, 2006, New York, Springer-Verlag, p. 456.

*Поступила в редакцию
12 августа 2014 г.*