Арктический вектор геологических исследований Arctic vector of geological research

УДК 549.211:550.4:549.6

DOI: 10.19110/2221-1381-2018-8-13-19

СИНГЕНЕТИЧЕСКИЕ И ПРОТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ОЛИВИНА В АЛМАЗАХ ИЗ КИМБЕРЛИТОВ ЯКУТИИ ПО ДАННЫМ КР- И ИК-СПЕКТРОСКОПИИ

Л. Д. Бардухинов^{1,2}, З. В. Специус¹, Р. В. Монхоров^{1,2}¹ Научно-исследовательское геологическое предприятие АК «АЛРОСА» (ПАО), Мирный
*bardukhinovld@alrosa.ru*² Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ

Приведены результаты оптико-спектроскопических исследований включений оливина в алмазах из кимберлитовых трубок «Заполярная», «Комсомольская-Магнитная», «Ботубинская», «Юбилейная», «Комсомольская», «Айхал» и «Мир» Якутской алмазоносной провинции с целью установления признаков их сингенетического и протогенетического образования по отношению к минералу-хозяину. Алмазы с включениями оливина были представлены кристаллами I разновидности, согласно классификации Ю. Л. Орлова. По данным рамановской спектроскопии определено остаточное давление в алмазах, а также с помощью рамановской и ИК-спектроскопии алмазов определены критерии сингенетичности оливинов.

Ключевые слова: алмазы, включения, кимберлит, оливины, рамановская спектроскопия, ИК-спектроскопия.

PROTOGENETIC AND SYNGENETIC INCLUSIONS OF OLIVINE IN DIAMONDS FROM KIMBERLITES OF YAKUTIA ACCORDING TO RAMAN AND IR-SPECTROSCOPY

L. D. Bardukhinov^{1,2}, Z. V. Spetsius¹, R. V. Monkhorov^{1,2}¹Scientific Investigation Geology Enterprise ALROSA OJSC, Mirny²Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude

The results of optical-spectroscopic studies of olivine inclusions in diamonds from kimberlite pipes «Zapolyarnaya», «Komsomolskaya-Magnitnaya», «Botuobinskaya», «Yubileynaya», «Komsomolskaya», «Aikhal» and «Mir» of the Yakutsk diamondiferous province are presented to establish signs of syngenetic and protogenetic growth in relation to the host mineral. Diamonds with inclusions of olivine were represented by crystals of type I according to the classification of Yu. L. Orlov. According to Raman spectroscopy data residual pressure in diamonds are determined. The criteria for the syngeneity of olivines have been determined based on Raman spectroscopy and IR spectroscopy of diamonds.

Keywords: diamonds, inclusions, kimberlites, olivines, Raman spectroscopy, IR-spectroscopy.

Введение

Несомненным является факт, что природные алмазы кристаллизовались в мантии и благодаря кимберлитовым и лампроитовым магмам были вынесены на поверхность [2, 6]. Заключение в алмазах включений во многих случаях являются ценным и практически единственным достоверным источником информации о среде и Р-Т-условиях образования алмаза в верхней мантии. Исследования, полученные в результате изучения минеральных и флюидных включений в алмазах, позволили установить парагенезисы минеральных включений: ультраосновной (перидотитовый) — У(П)-тип парагенезиса включений и эклогитовый — Э-тип [6, 12] — и приблизиться к пониманию процесса природного алмазообразования.

При изучении включений в большинстве случаев до сих пор применяется деструктивный подход по отношению

к минералу-хозяину, при этом включение выводится на поверхность в результате при шлифовки или даже дробления и только потом определяется его химический состав. Ввиду экономической и геологической ценности алмаза, особенно в валовых исследованиях алмазов, разрушение минерала-хозяина нецелесообразно и не всегда представляется возможным. Одним из оптико-спектроскопических методов, который возможно применять при изучении включений в алмазах неразрушающим способом, является спектроскопия комбинационного рассеяния. Рамановская спектроскопия (КР-спектроскопия) совместно с ИК-спектроскопией, предоставляющей информацию о структурных дефектах в алмазе, позволяют установить минеральную фазу включений, оценить остаточное давление в алмазах и температурно-временные характеристики их образования без разрушения минерала-хозяина.

Одним из наиболее распространённых силикатных включений в алмазах является оливин. Известно, что большинство включений оливина в литосферных алмазах, как правило, характеризуются пониженным содержанием фаялитового минала и, соответственно, повышенной магнезиальностью [14]. В работе [13] отмечается, что для подавляющего большинства изученных оливинов-включений в алмазах магнезиальность $[100 \text{ Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe})]$ определена между 91 и 94 %. Исследования оливинов из ксенолитов, и в первую очередь из кимберлитов, позволили выделить два типа: оливины I генерации (макрокристаллы) и оливины II генерации (в основном менее 0.5 мм).

Ранее были определены содержания кальция в кристаллах оливина из магматических пород основного-ультраосновного состава, образовавшихся в различных геодинамических обстановках и разделенных на 3 фациальные разности, различающиеся по глубине образования [5]. Эти данные в свете закономерностей, установленных на оливинах из экспериментальных расплавов, позволяют предполагать, что кристаллы оливина в ряде случаев потеряли первичный кальций либо имели немагматический генезис. Таким образом, только низкокальциевые оливины, представляющие включения этого минерала в алмазах из

кимберлитов, вероятно, свидетельствуют о нерасплавном генезисе кристаллов алмаза, выносимых кимберлитовыми магмами [5], и их наиболее вероятном образовании в процессе мантийного метасоматоза [2].

Основной целью выполненных исследований явилось выявление возможности диагностики сингенетического или протогенетического роста включений оливина в алмазах неразрушающими методами КР- и ИК-спектроскопии и последующего использования результатов спектроскопических исследований при проведении прогнозно-поисковых работ на алмазы.

Описание образцов и методика исследования

Образцы. Кристаллы с включениями оливинов были отобраны для исследования из геологических коллекций алмазов из кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции (ЯАП): «Заполярной» (22 шт.), «Комсомольской-Магнитной» (10 шт.), «Юбилейной» (15 шт.), «Комсомольской» (6 шт.), «Ботубинской» (13 шт.), «Ай-хал» (7 шт.) и «Мир» (8 шт.) (рис. 1). Включения оливина в алмазах находились как в виде множественных скоплений, так и отдельных индивидов. Оливины представлены бес-

Рис. 1. Алмазы с включениями оливинов из тр. «Юбилейная»

Fig. 1. Diamonds with inclusions of olivine from «Uibileinaya» kimberlite pipes

цветными кристалликами различного размера, в основном от 10 до 500 мкм, которые находятся в периферийных зонах алмазов или в центре кристаллов. Внешний вид включений оливина весьма разнообразен. Обычно они имеют форму хорошо ограненных кристаллов с ясно различимыми гранями разного габитуса. Алмазы с включениями оливина были представлены кристаллами I разновидности, согласно классификации [4]. Более половины изученных алмазов помимо включений оливина содержали в себе хромиты. Все исследования включений проведены без разрушения алмаза-хозяина.

Рамановская спектроскопия. Съемка спектров комбинационного рассеяния включений в алмазах выполнена на рамановском микроскопе InVia с конфокальной оптикой (фирма Renishaw, Великобритания). Все спектры были сняты при комнатной температуре. Источник возбуждения — твердотельный лазер рамановского микроскопа, λ — 532 нм, мощность — 100 мВт. Использовалась отражательная голографическая дифракционная решетка 1800 лин/мм, измеряемый спектральный диапазон при возбуждающем излучении 532 нм составлял $0 \div 1800 \text{ см}^{-1}$. Объектив 50× (Leica). Приёмником излучения служила Пельтье-охлаждаемая CCD-матрица 1024×256 , размер пикселя 26 мкм. Заявленное производителем спектральное разрешение не хуже 0.5 см^{-1} в видимом диапазоне, калибровка осуществлялась с помощью кремневого стандарта по линии 520 см^{-1} (при использовании соответствующих комбинаций источников света, объективов и решеток), воспроизводимость не хуже 0.1 см^{-1} . В некоторых спектрах присутствуют узкие (0.05 нм) паразитные пики, обусловленные срабатыванием матричного CCD-приемника при случайном воздействии космических лучей.

ИК-спектроскопические исследования алмазов проводились на ИК-Фурье-спектрометре VERTEX 70 (Bruker) в комплексе с ИК-микроскопом Hyperion 2000. Диапазон измерений: $400\text{—}5500 \text{ см}^{-1}$. Была выполнена съемка интегральных (со всего объема кристалла) спектров. Нормирование спектров осуществлялось по поглощению в двухфоновной области [1, 17]. По спектрам определялись концентрации A-, B1- дефектов алмазов [17]. Коэффициенты поглощения на частотах 1973 см^{-1} и 2500 см^{-1} (соответственно $\alpha_{1973} = 12.5 \text{ см}^{-1}$ и $\alpha_{2500} = 4.9 \text{ см}^{-1}$) были выбраны в качестве параметров внутреннего стандарта. Содержание общего азота (N_{tot}) определялось как сумма концентраций A и B1. Агрегация азота B рассчитывалась как $B = B1/N_{\text{tot}} \cdot 100$.

Результаты и обсуждение

Положение и интенсивность рамановских сдвигов в спектре характеризует кристаллическое строение и химический состав минерала. Рамановский спектр оливина имеет характерный набор из двух интенсивных линий около $825 \text{ см}^{-1}(K_1)$ и $855 \text{ см}^{-1}(K_2)$, которым соответствуют колебания кристаллической решетки связи Si — O (асимметричное растяжение и симметричное валентное колебание соответственно).

Положение полосы около $825 \text{ см}^{-1}(K_1)$ в спектре включения оливина в алмазе, рассчитанное остаточное давление [16] и содержание азота [17] в алмазе приведены в таблице.

Рамановский спектр оливина зависит от химического состава [15]; соответствующее рамановское исследование на синтетических минералах группы оливина (форстерит, фаялит, кнебелит и тефроит) позволило вывести формулу для расчета магнетиальности. Известны уравне-

ния [16] для одновременного расчета магнетиальности оливинов и остаточного давления в алмазах, при этом авторы апробировали их при расчете на реальном включении оливина в алмазе из тр. «Интернациональная», получении значения магнетиальности и давления (91.6 ± 0.6) и (0.32 ± 0.05) ГПа соответственно.

Одновременный рост алмаза и его сингенетического включения происходит в некоторой постоянной среде, но после подъема алмаза на поверхность возникает разница в параметрах объемного расширения по причине декомпрессии и охлаждения, между включением и минералом-хозяином, что приводит к увеличению давления на включении со стороны алмаза. Так называемое остаточное давление можно определить по сдвигам линий в рамановских спектрах, зафиксированных для включения внутри алмаза. Наиболее интенсивные полосы валентных колебаний SiO_4 -групп в спектре оливина наблюдались в виде дублета с максимумами около 825 и 857 см^{-1} , которые имеют скорость сдвига по давлению (2.81 ± 0.09) и (2.69 ± 0.12) $\text{см}^{-1}/\text{ГПа}$ для фаялитового минала ($\text{Mg\#} = 0$); 3.51 и $3.26 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для форстерита ($\text{Mg\#} = 100$) [16].

В кимберлитовых трубках Якутии наиболее распространены включения оливина с магнетиальностью $91\text{—}94 \%$; для расчета остаточного давления в алмазах использована скорость сдвига $3.46 \text{ см}^{-1}/\text{ГПа}$ для среднего значения магнетиальности 93% . Следует отметить, что расчёты остаточного давления при магнетиальности 91 и 94% не имеют значимых различий. Для определения остаточного давления в алмазах использовано положение полосы K_1 и ее сдвиг относительно полосы, зарегистрированной для оливина магнетиальностью 93% и при нулевом давлении 823.4 см^{-1} [16].

Анализ рамановских спектров включений оливина в алмазах показал, что эти полосы имели максимальные сдвиги по частоте для включения в образце из тр. «Юбилейная»: 827.8 ; 858.1 см^{-1} . Расчетное значение остаточного давления составило 1.27 ГПа . В результате установленное остаточное давление во включениях (см. таблицу) может быть использовано для оценки давления в момент кристаллизации алмаза при помощи геобарометра [11].

Совокупность данных по рамановской спектроскопии включений оливинов в алмазах из изученных кимберлитовых трубок позволяет провести оценку генетической природы включений. Предполагается, что рамановские спектры сингенетических и протогенетических включений оливина отличаются дополнительными полосами в спектрах (рис. 2, в), которые указывают на захват стороннего материала среды образования. Так, в протогенетических включениях оливина зафиксированы полосы в рамановском спектре около 1060 см^{-1} , возможно отвечающие за комбинационное рассеяние аморфного углерода [10].

В работе [3] показаны результаты исследования, позволяющие с некоторой точностью ответить на вопрос о совместном образовании алмаза и оливина. На этих сведениях и полученных результатах разработан метод по выявлению закономерностей взаимной ориентировки алмаза и включения на восьми кристаллах оливина в четырех алмазах из кимберлитовой трубки «Юбилейная» методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD).

Рамановская спектроскопия наряду с методом дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) позволяет изучать ориентацию кристаллов оливина [9]. В наших исследованиях эпитаксиальное соотношение между вклю-

Рис. 2. КР-спектры оливина в алмазах из кимберлитовой трубки «Ботуобинская»: а — нормальный спектр оливина; б, с — спектры оливинов с признаками протогенетического образования

Fig. 2. Raman spectra of olivine in diamonds from «Botuobinskaya» kimberlite pipe: а — the normal spectrum of olivine; б, с — spectra of olivines with signs of protogenetic formation

чением и вмещающим его алмазом определено по характеристикам рамановского спектра оливинов.

Предполагается, что при взаимной ориентировке кристаллов «узника» и «хозяина» наблюдается спектр, изображенный на рисунке 2, а. Предположено, что рамановские спектры оливина (рис. 2, б), полученные при аналогичной ориентировке алмаза под объективом микроско-

па, могут отвечать за их эпитаксиальный рост, соответственно, могут являться протогенетическими включениями, образовавшимися раньше алмазов. Спектры КР оливина, отснятые с разных граней, имеют различный набор относительной интенсивности основных полос, в частности около 825 и 857 см⁻¹.

Предполагаемая ориентировка кристалла оливина внутри алмаза проявляется в спектре КР в зависимости от измеряемой грани оливина, а так как все алмазы (в большей части октаэдрического габитуса) при измерении ориентировались относительно их граней (111), то появление высокоинтенсивной полосы около 825 см⁻¹ может говорить о попадании плоскости поляризации лазера микроскопа на грань оливина, разориентированную относительно грани алмаза.

В целом эпитаксиальное соотношение алмаза и оливина, как и его определение, предложенное по характеристике спектров КР, не могут являться основными критериями при определении сингенетического происхождения оливина, но могут быть использованы в исследованиях с сохранением целостности алмаза.

В то же время установлено, что алмазы с протогенетическими включениями (по данным КР-спектроскопии) довольно часто имеют повышенные содержания азота (более 400 at.ppm.), характерные для алмазов эклогитового генезиса [7], в то время как для сингенетических оливинов (по данным КР-спектроскопии) типичны низкие содержания азота.

Критерием сингенетичности включений оливинов в алмазах можно считать эпитаксиальное соотношение между включением и вмещающим его алмазом, которое можно с некоторой точностью определить по характеру спектров КР.

Для алмазов с включениями оливинов из ряда трубок были получены спектры ИК-поглощения. По данным ИК-спектроскопии, алмазы с включениями оливинов имеют широкие вариации как по содержанию общего азота, так и по его агрегации (рис. 3, а). Содержание общего азота в алмазах варьирует от 0 до 800 at. ppm, причем у большей части кристаллов с включениями оливинов отмечены пониженные (менее 400 at. ppm) концентрации структурного азота. Агрегация азота у исследуемых кристаллов имеет значения в основном более 20 и менее 60 %. Алмазы из трубки «Ботуобинская» с включениями оливина имеют два тренда по содержанию общего азота: от 0 до 100 at.ppm и от 300 до 1200 at.ppm (рис. 2, б), такое же двойное распределение имеют кристаллы из трубки «Заполярная», что может указывать на существование нескольких генераций алмазов [8].

Данные по кристаллам с включениями оливина, имеющими признаки сингенетичного роста, были выделены из общей базы по коллекции исследуемых алмазов (рис. 3,б), при этом для кристаллов с сингенетическими включениями получены зависимости соотношений концентрации и процентного содержания азота В-формы в алмазах. Вычисленные уравнения зависимости N_{tot} В (%) для кристаллов с сингенетическими включениями оливина позволят в дальнейшем, после набиротки достаточного количества определений, использовать их как один из признаков, идентифицирующих единичные находки алмазов с включением оливина на предмет принадлежности их к известному коренному источнику.

Рис. 3. Суммарная концентрация азота (N_{tot} , at. ppm) и ее агрегация (B, %) в алмазах с включениями оливина из кимберлитовых трубок: а — все изученные алмазы с включениями оливина; б — алмазы только с сингенетическими включениями оливина

Fig. 3. The total concentration of nitrogen (N_{tot} , at. ppm) and its aggregation (B, %) in the diamonds with inclusions of olivine from kimberlite pipes: а — all studied diamonds with inclusions of olivine; б — only diamonds with syngenetic inclusions of olivine

Закключение

Таким образом, в соответствии с результатами проведенной работы, можно утверждать о возможности присутствия как сингенетических, так и протогенетических включений оливина в алмазах из кимберлитов Якутии, что может быть диагностировано комплексом методов рамановской и ИК-спектроскопии алмазов. Различные значения остаточного давления в алмазах с включениями оливина в каждом конкретном месторождении также указывают на различные условия формирования; в большинстве случаев установлено, что повышенное остаточное давление наблюдается в алмазах с высоким содержанием примеси азота. В качестве критерия сингенетического роста можно рассматривать эпитаксиальное соотношение между включением и вмещающим его алмазом.

Алмазы с включениями оливинов имеют широкие значения концентрации азота (0–800 at.ppm) и его агрегации (0–70 %), при этом обнаруживаются характерные зависимости в соотношении N_{tot} –B % для каждого конкретного месторождения. Предлагается, что последнее обстоятельство может быть использовано при проведении прогнозно-поисковых работ на алмазы.

Литература

1. Бокий Г. Б., Безруков Г. Н., Ключев Ю. А., Налётов А. М., Неница В. И. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986. 222 с.
2. Костровицкий С. И., Спеццус З. В., Яковлев Д. А., Фон-дер-Флаасс Г. С., Суворова Л. Ф., Богуш И. Н. Атлас корен-

ных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: Типография ООО «МГТ», 2015. 480 с.

3. Нойзер Р. Д., Шергл Г. П., Логвинова А. М., Соболев Н. В. Исследование включений оливина в сибирских алмазах методом дифракции обратнорассеянных электронов: признаки сингенетического роста? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1–2. С. 416–425.

4. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 264 с.

5. Пономарев Г. П. Содержания кальция в кристаллах природного оливина как показатель их генезиса // Литосфера. 2014. № 5. С. 57–70.

6. Соболев В. С., Соболев Н. В., Лаврентьев Ю. Г. Включения в алмазе из алмазоносного эклогита // Доклады РАН. 1972. Т. 207. № 1. С. 164–167.

7. Спеццус З. В., Богуш И. Н., Ковальчук О. Е. // ИК-картирование алмазных пластин из ксенолитов эклогитов и перидотитов трубки Нюрбинская (Якутия): генетические следствия // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1–2. С. 442–454.

8. Bulanova G. P. The formation of diamond // J. Geochem. Explor. 1995. V. 53. P. 1–23.

9. Chopelas A. Single crystal Raman spectra of forsterite, fayalite, and monticellite // American Mineralogist. 1991. V. 76. No. 7–8. P. 1101–1109.

10. Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A (2004) 362. P. 2477–2512.

Результаты определения остаточного давления и содержания азота в алмазах

The results residual pressure and nitrogen content in diamonds

Образец Sample	K1, см ⁻¹	Сдвиг КР Raman shift, см ⁻¹	∂P, GPa	N _{tot} , ppm	B, %	Образец Sample	K1, см ⁻¹	Сдвиг КР Raman shift, см ⁻¹	∂P, GPa	N _{tot} , ppm	B, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
a-2	823.86	0.46	0.13	362.3	49.6	k-12	824.67	1.27	0.37	45.1	12.2
a-4	824.42	1.02	0.29	400.5	64.6	k-43	826.12	2.72	0.79	660.7	31.8
a-6	823.59	0.19	0.05	333.3	48.3	k-44	823.68	0.28	0.08	150.7	26.6
a-7	826.12	2.72	0.79	24.8	0.0	k-60	826.33	2.93	0.85	469.7	69.4
a-15	826.06	2.66	0.77	118.8	38.8	k-68	826.46	3.06	0.88	30.5	9.9
a-19	826.24	2.84	0.82	385.4	31.0	k-100	824.17	0.77	0.22	310.9	40.3
a-21	825.68	2.28	0.66	110.6	20.2	z-76	825.30	1.90	0.55	514.3	38.8
km-48	824.51	1.11	0.32	256.8	40.7	z-86	824.82	1.42	0.41	414.1	38.3
km-50	825.53	2.13	0.62	305.1	45.7	z-177	823.59	0.19	0.05	640.8	46.6
km-74	825.38	1.98	0.57	197.3	28.5	z-219	823.65	0.25	0.07	562.1	58.3
km-235	824.30	0.90	0.26	206.1	26.8	z-237	826.33	2.93	0.85	748.4	58.4
km-169	824.82	1.42	0.41	402.4	42.0	z-246	824.30	0.90	0.26	40.4	21.2
km-423	825.22	1.82	0.53	176.0	42.2	z-256	826.36	2.96	0.86	705.3	33.7
km-573	825.56	2.16	0.62	0.0	0.0	z-275	824.02	0.62	0.18	640.3	46.2
km-588	825.10	1.70	0.49	345.1	50.8	z-305	823.62	0.22	0.06	182.3	39.7
km-651	824.26	0.86	0.25	101.8	17.2	z-343	824.14	0.74	0.21	267.7	47.8
km-691	824.11	0.71	0.21	54.4	10.1	z-364	823.74	0.34	0.10	67.7	22.5
m-1	826.33	2.93	0.85	599.0	100.0	z-372	826.06	2.66	0.77	159.2	35.1
m-6	823.92	0.52	0.15	450.8	44.8	z-432	825.62	2.22	0.64	53.2	29.9
m-18	825.50	2.10	0.61	546.2	18.3	z-435	826.30	2.90	0.84	422.9	26.7
m-21	824.08	0.68	0.20	712.7	42.4	z-442	824.14	0.74	0.21	541.4	42.9
m-23	825.93	2.53	0.73	142.2	8.7	z-469	824.23	0.83	0.24	97.7	33.8
m-25	824.14	0.74	0.21	140.5	55.2	z-476	824.17	0.77	0.22	255.8	26.1
m-26	823.74	0.34	0.10	0.0	0.0	z-515	825.93	2.53	0.73	493.5	37.7
m-33	825.07	1.67	0.48	515.1	100.0	z-530	823.96	0.56	0.16	59.8	31.3
u-1	825.72	2.32	0.67	279.2	53.1	z-593	826.27	2.87	0.83	180.2	14.6
u-3	826.09	2.69	0.78	65.9	30.9	z-598	826.30	2.90	0.84	157.9	40.2
u-5	823.89	0.49	0.14	135.5	40.3	z-642	823.83	0.43	0.12	64.5	31.5
u-16	825.20	1.80	0.52	578.8	20.6	b_6	825.90	2.50	0.72	118.8	44.3
u-18	824.97	1.57	0.45	0.0	0.0	b_106	823.50	0.10	0.03	1153.5	36.4
u-24	823.71	0.31	0.09	199.5	59.6	b_107	825.00	1.60	0.46	297.8	15.0
u-28	823.59	0.19	0.05	363.3	36.3	b_154	826.40	3.00	0.87	749.5	39.1
u-32	823.96	0.56	0.16	0.0	0.0	b_283	824.90	1.50	0.43	5.1	18.6
u-33	826.39	2.99	0.87	0.0	0.0	b_420	824.00	0.60	0.17	106.0	20.1
u-34	827.8	4.4	1.27	98.2	34.9	b_519	824.70	1.30	0.38	347.1	20.1
u-37	825.38	1.98	0.57	173.2	49.5	b_768	825.90	2.50	0.72	554.2	30.4
u-39	826.09	2.69	0.78	44.6	26.4	b_671	826.30	2.90	0.84	408.9	25.0
u-40	823.92	0.52	0.15	0.0	0.0	b_699	823.90	0.50	0.14	15.4	20.5
u-42	826.21	2.81	0.81	123.7	37.0	b_795	824.20	0.80	0.23	38.3	41.8
u-44	823.46	0.06	0.02	133.0	50.9	b_829	824.50	1.10	0.32	62.6	27.4
-	-	-	-	-	-	b_957	823.70	0.30	0.09	16.6	21.0

Примечание. Условные обозначения включений оливинов из алмазов разных кимберлитовых трубок: а — тр. «Айхал», km — тр. «Комсомольская-Магнитная», u — тр. «Юбилейная», k — тр. «Комсомольская», z — тр. «Заполярная», b — тр. «Ботубинская», m — тр. «Мир»; N_{tot} — содержание общего азота; B — агрегация азота; K1 — положение пика около 825 см⁻¹; ∂K1/∂P (скорость сдвига рамановской линии) = 3.46 см⁻¹/GPa (при Mg# = 93%); сдвиг КР рассчитан относительно 823.4 см⁻¹.

Note. The legend of olivines from inclusions in diamonds from different kimberlite pipes: a — «Aykhāl», km — «Komsomolskaya-Magnitnaya», u — «Ubileinaya», k — «Komsomolskaya», z — «Zapolyrnaya», b — «Botuobinskaya», m — «Mir»; N_{tot} — total nitrogen content; B — nitrogen aggregation; K1 — peak position around 825 cm⁻¹; ∂K1/∂P (the speed of the shift of Raman lines) = 3.46 cm⁻¹/GPa (at Mg# = 93 %); the Raman Shift is calculated relative to 823.4 cm⁻¹.

11. Izraeli E. S., Harris J. W., Navon O. Raman barometry of diamond formation // *Earth and Planetary Science Letters*. 1999. V. 173. P. 351–360.

12. Meyer H. O., Boyd F. R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // *Geo Cosm. Acta*. 1972. V. 36. P. 1255–1274.

13. Sobolev N., Logvinova A., Zedgenizov D., Pokhilenko N., Malygina E., Kuzmin D., Sobolev A. Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*. 2009. V. 112. P. 701–713.

14. 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.

15. Takashi Mouriand, Masaki Enami. Raman spectroscopic study of olivine-group minerals // *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2008. V. 103. P. 100–104.

16. Yasuzuka T., Isibashi H., Simultaneous determination of Mg# and residual pressure in olivine using micro-Raman spectroscopy // *Journal of Mineralogist and Petrological Sciences*. 2009. V. 104. P. 395–400.

17. Zaitsev A. M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin: Springer Heidelberg, 2001. P. 502.

References

1. Boki G. B., Bezrukov G. N., Klyuev Yu. A., Naletov A. M., Nepsha V. I. *Prirodnye i sinteticheskie almazы* (Natural and synthetic diamonds). Moscow: Nauka, 1986, 222 p.

2. Kostrovitskiy S. I., Spetsius Z. V., Yakovlev D. A., Von der Flaass G. S., Suvorova L. F., Bogush I. N. *Atlas korennykh mestorozhdeniy almazov Yakutskoy kimberlitovoy provincii* (Atlas of primary diamond deposits of the Yakutian kimberlite province). Mirny: MGT, 2015, 480 p.

3. Nojzer R. D., SHertl G. P., Logvinova A. M., Sobolev N. V. *Issledovanie vklyuchenij olivina v sibirskih almazah metodom difrakcii obratno rasseyannykh ehlektronov: priznaki singeneticheskogo rosta?* (In the study of olivine inclusions in Siberian diamonds by the method of diffraction of back-scattered electrons are evidence for syngenetic growth?). *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, pp. 416–425.

4. Orlov Y. L. *Mineralogiya almaza* (Mineralogy of diamond). Moscow: Nauka, 1984, 264 p.

5. Ponomarev G. P. *Soderzhaniya kalciya v kristallakh prirodnogo olivina kak pokazatel' ih genezisa* (Calcium Content in

natural olivine crystals as an indicator of their Genesis). *Lithosphere*, 2014, No. 5, pp. 57–70.

6. Sobolev V. S., Sobolev N. V., Lavrent'ev Yu. G. *Vklyucheniya v almaze iz amazonosnogo ehklogita* (Inclusions in diamond from diamond eclogite). *Doklady Earth Sciences*, 1972, V. 207, No. 1, pp. 164–167.

7. Specius Z. V., Bogush I. N., Kovalchuk O. E. *IK-kartirovanie almaznykh plastin iz ksenolitov ehklogitov i peridotitov trubki Nyurbinskaya (Yakutiya): geneticheskie sledstviya* (IR-mapping of diamond plates from xenoliths of eclogites and peridotites of the Nyurbinskaya tube (Yakutia): genetic consequences). *Geologiya i geofizika*, 2015, V. 56, No. 1–2, pp. 442–454.

8. Bulanov G. P. The formation of diamond. *J. Geochem. Explor.* 1995, v. 53, pp. 1–23.

9. Chopelas A. Single crystal Raman spectra of forsterite, fayalite, and monticellite. *American Mineralogist*. 1991, v. 76, No. 7–8, pp. 1101–1109.

10. Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nano-diamond. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2004) 362, pp. 2477–2512.

11. Izraeli E. S., Harris J. W., Navon O. Raman barometry of diamond formation. *Earth and Planetary Science Letters*. 1999, V.173, p. 351–360.

12. Meyer H. O., Boyd F. R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds. *Geo Cosm. Acta*. 1972, V. 36, p. 1255–1274.

13. Sobolev N., Logvinova A., Zedgenizov D., Pokhilenko N., Malygina E., Kuzmin D., Sobolev A. Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia. *Lithos*. 2009, V. 112, pp. 701–713.

14. 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), pp. 305–315.

15. Takashi Mouriand, Masaki Enami. Raman spectroscopic study of olivine-group minerals. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*. 2008, V. 103, pp. 100–104.

16. Yasuzuka T., Isibashi H., Simultaneous determination of Mg# and residual pressure in olivine using micro-Raman spectroscopy. *Journal of Mineralogist and Petrological Sciences*. 2009, V. 104, pp. 395–400.

17. Zaitsev A. M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin: Springer Heidelberg, 2001, pp. 502.