

## Типоморфные характеристики кристаллов алмаза с включениями оливина из россыпи Эбелях и кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции

С.С. Угапьева\*, А.Д. Павлушин\*, С.В. Горяйнов\*\*

\*Институт геологии алмазов и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

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

Приведены результаты изучения особенностей морфологии, характера структурной ориентировки и расчета остаточного давления по спектрам комбинационного рассеяния во включениях оливина в алмазах из россыпи Эбелях и кимберлитовых месторождений Якутской алмазоносной провинции с целью установления признаков сингенетичности и условий их внедрения в алмазы из месторождений различных генетических типов. Изученные алмазы с включениями оливина представлены кристаллами I разновидности по минералогической классификации Ю.Л. Орлова. Морфология включений оливина, как в кимберлитовых, так и в россыпных алмазах, проявляет зависимость формы от их расположения в объеме материнского кристалла. Методом рентгеноструктурного анализа выявлена закономерная ориентировка включений оливина в алмазах из кимберлитов и произвольная в кристаллах из россыпи Эбелях. По данным рамановской спектроскопии – различиям в спектрах, зафиксированных для «напряженного» включения внутри алмаза и выведенного на поверхность, когда давление сброшено, рассчитана средняя величина остаточного давления  $P_f = 4,7 \pm 0,5$  ГПа, соответствующая условиям кристаллизации при модельной температуре роста алмаза  $1200^\circ\text{C}$ . По этим значениям оценка глубины кристаллизации алмазов из трубок Айхал и Удачная составляет не менее 165 км. Полученные данные свидетельствуют, что критериями сингенетичности для включений оливина из кимберлитовых трубок являются выявленная на основе рентгенографических исследований закономерная структурная ориентировка включений относительно алмаза-хозяина, отражающая эпитактическое срастание оливина с алмазом, и искаженная форма включений, соответствующая его положению в пространстве кристалла-хозяина. Для включений оливина в алмазах из россыпи Эбелях единственным критерием сингенетичности является искажение внешней симметрии минерала-узника в зависимости от положения в объеме алмаза относительно пирамид роста и элементов внешнего ограничения октаэдрического кристалла.

Ключевые слова: алмаз, включения, кимберлит, морфология, оливин, рамановская спектроскопия, рентгенография, Якутская алмазоносная провинция.

*The results of study of morphology features, type of structural orientation and calculation of residual pressure by Raman spectroscopy in olivine inclusions in diamonds from the Ebelyakh placer and kimberlite pipes of the Yakutian diamondiferous province are provided in order to identify syngenetic signs, physical parameters of their intrusion into diamonds from deposits of different genetic types. The studied diamonds with olivine inclusions are presented by crystals of the I variety on mineralogical classification of Yu.L. Orlov. The morphology of the olivine inclusions both in the kimberlite diamonds and in the diamonds from the Ebelyakh placer shows that olivine form depends on their arrangement in a volume of a host crystal. Epitaxial orientation of olivine inclusions in diamonds from kimberlites and non-epitaxial orientation in crystals from the Ebelyakh placer are observed by X-Ray method. The residual pressure value  $P_f = 4.7 \pm 0.5$  GPa corresponding to crystallization conditions at a model temperature of diamond growth  $1200^\circ\text{C}$  is calculated by Raman spectroscopy. According to these values the depth of diamond crystallization for the Aikhal and the Udachnaya pipes is not less than 165 km. The syngenetic signs for olivine inclusions from kimberlites are the epitaxial structural orientation in host crystal and features of their morphology. For olivine inclusions in diamonds from the Ebelyakh placer only one syngenetic sign is established.*

---

\*УГАПЬЕВА Саргылана Семеновна – м.н.с., Sargylana-ugapeva@yandex.ru; \*ПАВЛУШИН Антон Дмитриевич – к.г.-м.н., с.н.с., a.d.pavlushin@diamond.ysn.ru; \*\*ГОРЯЙНОВ Сергей Владимирович – к.ф.-м.н., с.н.с., svg@igm.nsc.ru.

## ТИПОМОРФНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА С ВКЛЮЧЕНИЯМИ ОЛИВИНА

Key words: diamond, inclusions, kimberlite, morphology, olivine, Raman spectroscopy, X-Ray, Yakutian diamondiferous province.

### Введение

В настоящее время на северо-востоке Сибирской платформы ведется промышленная эксплуатация крупных по запасам алмазоносных россыпей, однако, их коренные источники до сих пор не обнаружены. Связь алмазов с кимберлитовыми телами не установлена [1]. Изучение минеральных включений в кристаллах алмаза позволяет определить физико-химические особенности среды алмазообразования и глубину их зарождения в недрах Земли. Включения в алмазах, как известно, обладают высокой генетической информативностью. Основной проблемой является установление сингенетичности включения и алмаза-хозяина, без чего невозможна корректная интерпретация результатов исследования.

В данной статье приводятся результаты комплексного изучения морфологии и характера структурной ориентировки включений оливина в алмазах из россыпи Эбеях и кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции. Произведен расчет величины остаточного дав-

ления в напряженных включениях по спектрам комбинационного рассеяния (спектры КР). Основной задачей исследования является установление признаков сингенетичности, механизма и физических условий внедрения включений оливина в кристаллы алмаза. Учитывая, что включения отражают условия образования материнского кристалла, их комплексное изучение в алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы и сравнение с таковыми из кимберлитовых тел позволит оценить отличия и получить новые данные, способствующие решению проблемы установления их коренного источника.

### Объекты и методы исследования

Изучены 14 кристаллов алмаза с включениями оливина из коллекции ИГАБМ СО РАН, представляющих кимберлитовые трубки Мир (1 образец), Айхал (3 образца), Удачная (4 образца), им. XXIII съезда КПСС (1 образец) и россыпь Эбеях (5 образцов). Описание образцов алмаза и примененных методов исследования отражено в таблице.

**Результаты исследований кристаллов алмаза с включениями оливина**

Место-рождение	Номер образца	Форма кристалла алмаза	Положение оливина в алмазе	Форма включения оливина	Тип структурной ориентировки включения в алмазе	Химический состав оливина, мол. %	Спектры КР, $\nu$ , $\text{cm}^{-1}$
1	2	3	4	5	6	7	8
Мир	616	Шпинелевый двойник	Вершина	Изометричная	-	-	-
			Ребро октаэдра	Удлиненная			
Айхал	2004	Октаэдр	Ядро	Изометричная	-	-	~826,14; ~857,17
			Вершина	Изометричная	-	-	
			Ребро октаэдра	Удлиненная	Совпадение [011] алмаза с [101] оливина	Fo-92,36	
	2114	Октаэдр	Ядро	Изометричная	-	Fo-91,89	-
			Вершина	Изометричная			
			Ребро октаэдра	Удлиненная			
2262	Переходная к додекаэдру	Ядро	Изометричная	-	-	-	
		Вершина	Изометричная				

1	2	3	4	5	6	7	8
Удачная	3207	Октаэдр	Ребро октаэдра	Удлиненная	Произвольная	–	–
	3273	Октаэдр	Вершина	Изометричная	Плоскость (010) оливина параллельна [111] алмаза	Fo–93,0	~823,47; ~855,71
	3636	Переходная к додекаэдру	Ядро	Изометричная	–	–	–
			Вершина	Изометричная			
	3638	Октаэдр	Ядро	Изометричная	Плоскость (010) оливина параллельна [111] алмаза	Fo–92,58	~825,23; ~854,34
			Вершина	Изометричная			
им. XXIII съезда КПСС	4161	Октаэдр	Ядро	Изометричная	–	–	–
			Вершина	Изометричная			
Эбелях	6003	Додекаэдр	Ядро	Таблитчатая, изометричная	–	Fo–93,32	–
			Ребро октаэдра	Изометричная, удлиненная	Произвольная –		
	6008	Додекаэдр	Ядро	Изометричная, удлиненная	–	Fo–92,63	–
			Ребро октаэдра	Удлиненная, таблитчатая	–		
	6034	Додекаэдр	Ядро	Изометричная	Произвольная	Fo–92,51	~822,9; ~855,4
				Таблитчатая	–		
	6047	Додекаэдр	Ядро	Изометричная	Произвольная	Fo–92,95	~825,0; ~854,6
				Ребро октаэдра	Удлиненная		
	6070	Додекаэдр	Ядро	Таблитчатая	–	Fo–91,84	–
				Изометричная	–		
			Ребро октаэдра	Удлиненная	Произвольная		

Примечание. Fo – форстерит.

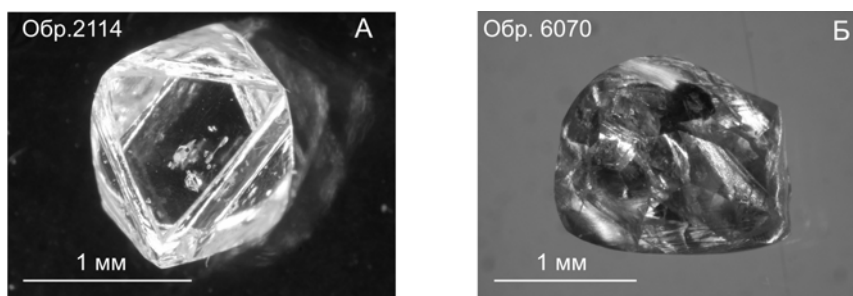
Морфология кристаллов алмаза и включений оливина изучена методом оптической микроскопии. Химический состав оливинов проанализирован на электронном микроскопе JSM 6480LV с энергодисперсионной приставкой INCA Energy 350 «Oxford instruments» (аналитик Н.В. Христофорова), рентгенографические исследования проводились С.С. Угапьевой на рентгеновской установке УРС-0.3, камера РКОП-А,  $\text{Cu}$  – излучение, в отделе физико-химических методов анализа ИГАБМ СО РАН. Спектры КР регистрировались на спектрометре LabRam HR800 «Horiba Jobin Yvon» с 1024-канальным LN/CCD-детектором в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН (аналитик к.ф.м.н. С.В. Горяйнов) [2, 3]. Спектры КР возбуждались излучением твердотельного неодимового лазера с длиной волны 532 нм и мощностью 50 мВт. Рассеянный в 180-градусной геометрии свет собирался микроскопом «Olympus» BX41. Объектив микроскопа MPLAN 50× с рабочим расстоянием  $\text{WD}=0,37$  мм и численной апертурой 0,75 фокусировал лазерный луч до фокального пятна диаметром 2 мкм. Спектральное разрешение составляло  $3 \text{ см}^{-1}$  в стоковой области частот около  $1300 \text{ см}^{-1}$ . Спектры КР получены последовательно для минерала-узника, находящегося в глубине алмаза-хозяина, и затем для включения, выведенного на поверхность. Методика расчета остаточного давления приведена в работе С.В. Горяйнова и др. [4].

## Результаты и обсуждение

*Морфология кристаллов алмаза и включений оливина.* Образцы алмаза из кимберлитовых трубок представлены октаэдрическими кристаллами I разновидности по минералогической классификации Ю.Л. Орлова [5] (рис. 1, А). Для них характерны октаэдры с гранями, покрытыми тригональными и дитригональными слоями роста, параллельной или сноповидной штриховкой, часто наблюдается полицентрическое строение граней кристаллов. Среди скульптур растворения отмечены отрицательные обратно ориентированные тригональные ямки травления. Размеры образцов по длинной оси не превышают 4 мм. Кристаллы алмаза из россыпи Эбелях представлены прозрачными кривоугонными додекаэдроидами светло-коричневого цвета (рис. 1, Б). Для них присуща округлая ромбододекаэдрическая форма с гранным швом, расположенным вдоль короткой диагонали ромбических граней, что типично для форм растворения. Обычное скрытослоистое строение граней иногда осложняется шагреньевым микро-рельефом, полосами пластической деформации и кавернами травления.

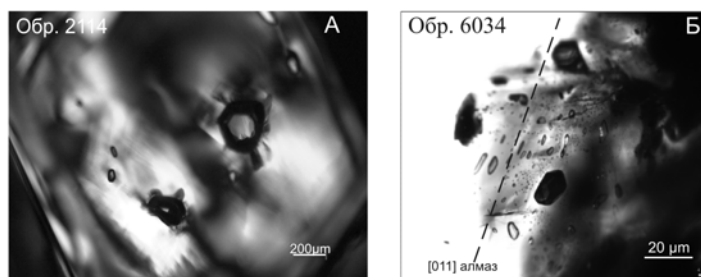
В исследованных образцах включения оливина, как в россыпных, так и в кимберлитовых алмазах в основном представлены групповыми включениями (рис. 2, А).

Размер включений оливина в кимберлитовых алмазах колеблется от 20 до 300 мкм, в алмазах



**Рис. 1.** Алмазы с включениями оливина:

А – группа включений оливина в алмазе из тр. Айхал (обр. 2114); Б – алмаз с включениями оливина из россыпи Эбелях (обр. 6070)



**Рис. 2.** Оливины в алмазах:

А – включения оливина в алмазе из тр. Айхал при скрещенных николях (обр. 2114); Б – включения оливина в алмазе из россыпи Эбелях (обр. 6034)

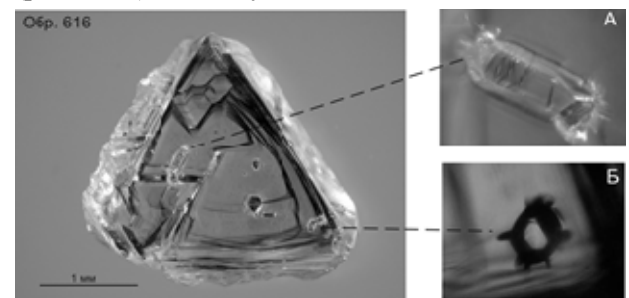
из россыпи Эбелях – в пределах 25 мкм по длинной оси. Нередко включения в россыпных и кимберлитовых окружены радиальными трещинами – розетками, как правило, повторяющими направления спайности в алмазе по (111) (рис. 2, Б). Для оливинов в алмазах наиболее характерны изометричные и вытянутые в одном направлении формы, реже встречаются уплощенные включения. По нашим наблюдениям форма оливинов в исследованных кристаллах из кимберлитов непосредственно зависит от их расположения в объеме материнского кристалла-октаэдра. В ядре или вблизи вершины октаэдра алмаза включение обычно имеет изометричную форму. Удлиненные включения оливина призматической формы чаще расположены вдоль ребра октаэдра алмаза (рис. 3, А, Б). Такая закономерность отчетливо наблюдается в алмазах из кимберлитовых трубок, так как хорошо образованная форма материнского кристалла идеальна для визуального наблюдения кристаллографических направлений.

Для алмазов из россыпи Эбелях также характерны подобные формы включений, но чаще распространены мелкие оливины удлиненной и таблитчатой форм. Оливины изометричной формы более крупные и расположены ближе к центру додекаэдроида. С учетом наблюдения октаэдрической ростовой зональности в додекаэдроидах выявленные нами закономерности формы включений в целом близки к кимберлитовым. Так, группы включений оливина вытянутой формы расположены параллельно оси удлинения друг друга в объеме додекаэдроида, совпадая с плоскостью (111) алмаза, как показано на рис. 2, Б.

Таким образом, из микроскопических наблюдений следует, что форма включений оливина зависит от кристаллографического направления и формы ростовой зональности кристалла-хозяина, а также положения включения в его объеме. Тяготение включения к ядру, вершине, ребру октаэдра либо к центру пирамиды роста октаэдра сказывается на форме самого включения. В целом эта закономерность объясняется принципом симметрии – диссимметрии П. Кюри. В трактовке И.И. Шафрановского [6, с. 46] – «в течение роста кристалл сохраняет лишь те элементы симметрии, которые совпадают с элементами симметрии кристаллообразующей среды». Если элементы внутреннего строения реального октаэдрического кристалла алмаза и их комбинации рассматривать как кристаллообразующую среду по отношению к сингенетичному включению минерала-узника, мы получим следующие виды симметрии кристаллообразующей среды. Ядро октаэдра – симметрия  $m\bar{3}m$ , его вершина – симметрия  $4mm$ , пирамида роста октаэдра – симметрия  $3m$ . В свою очередь, области граничащих смежных пирамид роста октаэдра

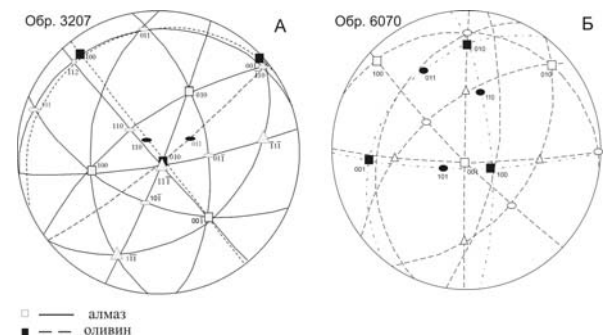
отражают симметрию кристаллообразующей среды –  $2mm$ . Соответственно, симметрия каждого элемента реального многогранника алмаза накладывает свой отпечаток на симметрию одновременно развивающегося с ним включения. В ядре кристалла можно ожидать изометричную форму сингенетичного включения, в пределах пирамиды роста – уплощенную таблитчатую форму, в пределах границ смежных пирамид роста возможно появление вытянутых призматических форм включений. Включения, расположенные ближе к вершинам кристалла, вероятно, могут приближаться к пирамидально-призматическим формам. Таким образом, проявление закономерности искажения внешней симметрии включений оливина в зависимости от их положения в объеме кристалла алмаза может служить одним из визуальных признаков сингенетичности включения оливина по отношению к алмазу.

**Рентгенография.** Для определения совпадения элементов симметрии оливина и алмаза (характера структурной ориентировки минерала-узника относительно кристалла-хозяина) проведены рентгенографические исследования. Установлено, что в образцах 3207, 3273, 3638, 2004 из кимберлитовых трубок Айхал и Удачная преобладают закономерно ориентированные включения оливина: в трех случаях из четырех (рис. 4, А). Два случая совпадения [011] алмаза



**Рис. 3.** Положение включений оливина в шпинелевом двойнике алмаза из тр. Мир (обр. 616):

А – вытянутый оливин, расположенный вдоль ребра октаэдра; Б – изометричное включение оливина на вершуске алмаза-хозяина



**Рис. 4.** Пример стереографических проекций:

А – закономерно ориентированное включение оливина в обр. 3207 из тр. Удачная; Б – произвольно ориентированное включение оливина в обр. 6070 из россыпи Эбелях

с [101] оливина, при таком положении минерал-узник имеет удлиненную форму; один вид закономерного срастания – плоскость (010) оливина параллельна [111] алмаза, в этом случае форма оливина изометричная. При произвольной ориентировке оливина в алмазе углы между главными направлениями минерала-узника и кристалла-хозяина не превышают  $15^\circ$ . Для включений оливина в алмазах из россыпи Эбелях нами не выявлено совпадения каких-либо элементов симметрии ни в одном из 5 кристаллов алмаза. Стереографическая проекция ориентировки включения в алмазе 6070 показана на рис. 4, Б.

Согласно результатам предыдущих исследований С.И. Футергендлера и др. [7] и Дж. Гарриса и др. [8], закономерная ориентировка включений оливина в алмазах свидетельствует об одновременном росте минерала-узника и кристалла-хозяина. Предполагается, что произвольно ориентированные включения оливина в алмазах захвачены ими в процессе кристаллообразования и имеют протогенетическое происхождение. Однако данный вывод справедлив лишь при рассмотрении ориентировки включений без учета их внешней морфологии. Допустимым является и то, что сингенетическое включение может быть ориентировано в алмазе-хозяине незакономерно.

*Рамановская спектроскопия.* Система «алмаз – включение», будучи равновесной при росте, становится неравновесной после подъема алмаза на поверхность по причине декомпрессии и охлаждения. Из-за разницы в параметрах объемного расширения включения находятся в алмазах под высоким давлением, отражающим давление образования системы «алмаз – включение» [9]. Величину давления можно установить по различиям в спектрах КР, зафиксированных для включения внутри алмаза и затем выведенных на поверхность с помощью шлифовки, когда давление сброшено [4]. Анализ «напряженных» включений в алмазах методом спектроскопии КР проводился с учетом того, что химический состав включений одного минерала в объеме матрицы одинаковый. Химический состав включений оливина, как в россыпных [10], так и в кимберлитовых алмазах, не отличается, характеризуется повышенной магниальностью (91,5 – 94,1% Fo) и содержанием никеля (0,31 – 0,74% массы NiO). Полученные при комнатной температуре спектры КР «напряженных» и «ненапряженных» включений оливина в алмазе приведены на рис. 5. Наиболее интенсивные полосы валентных колебаний

SiO<sub>4</sub>-групп в спектре оливина наблюдались в виде дублета с максимумами около 825 и 857 см<sup>-1</sup>, которые имеют значительную скорость сдвига по давлению  $2,81 \pm 0,09$  и  $2,69 \pm 0,12$  см<sup>-1</sup>/ГПа, что проявляется в виде увеличенных значений частот полос в «напряженных» включениях. Анализ спектров КР показал, что эти полосы имели максимальные сдвиги по частоте для включения в образце 2004 (тр. Айхал):  $\sim 826,14$  и  $857,17$  см<sup>-1</sup>. Именно этот дублет был использован для определения остаточного давления  $P_i$  в оливиновом включении, причем частоты для нулевого давления были найдены экспериментально по спектрам КР оливинового включения, выведенного на поверхность:  $\sim 824,2$  и  $856,2$  см<sup>-1</sup>. Спектры КР, полученные от оливинового включения образца 2004, дали максимальный сдвиг каждой из полос дублета на величину  $\Delta\nu = 2,1 \pm 0,2$  и  $1,1 \pm 0,2$  см<sup>-1</sup>, что соответствует внутреннему остаточному давлению во включении  $P_i = 0,32 \pm 0,05$  ГПа, вычисленному по формулам работ [11, 12]  $\nu = 825$  см<sup>-1</sup> +  $2,81P_i$ . Согласно Е.С. Израели [11], по этому остаточному давлению во включении можно оценить давление кристаллизации алмаза, которое по нашим расчетам составляет  $P_f = 4,7 \pm 0,5$  ГПа при модельной температуре его роста 1200 °С.

Сравнительный анализ спектров КР включений оливина в алмазах из россыпи Эбелях (образцы 6034, 6047) по включениям, заключенным в алмаз и затем выведенным на поверхность, показал, что сдвиги частот незначительны для каждой из полос дублета  $\Delta\nu = \pm 0,3$  см<sup>-1</sup> ( $\sim 822,9 - 823,2$  см<sup>-1</sup> и  $855,4 - 855,7$  см<sup>-1</sup>) и рассчитывать давление кристаллизации алмаза в данном случае не представляется возможным. Рассчитанные значения по сравнению с полученными для включений оливина в кимберлитовых алмазах

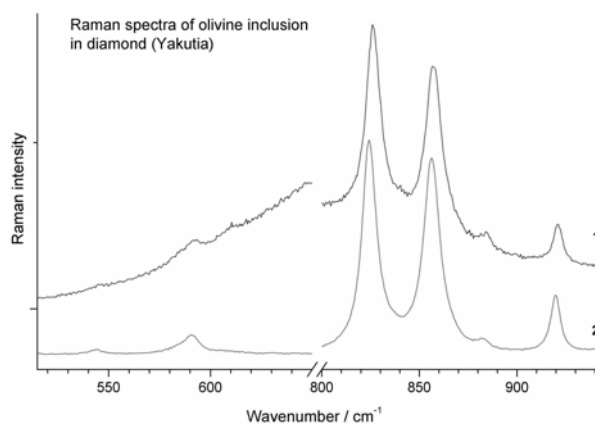


Рис. 5. Спектры КР напряженного (1) и выведенного на поверхность включений оливина (2) в алмазе из тр. Айхал (обр. 2004)

свидетельствуют о том, что оливины в россыпных алмазах находятся в менее напряженном состоянии и, возможно, эти показатели прямо зависят от структурной ориентировки оливинов в алмазе.

### Выводы и заключение

Новые данные по включениям оливина в алмазах из россыпи Эбелях и их сравнительный анализ с таковыми в кимберлитовых трубках Удачная, Айхал, Мир, им. XXIII съезда КПСС свидетельствуют об их схожести по химическому составу и признаках закономерности искажения форм включений оливина в зависимости от положения минерала-узника в объеме кристалла-хозяина.

Уточнены критерии сингенетичности для кристаллов алмаза с включениями оливина из россыпи Эбелях и кимберлитовых трубок ЯАП. Для включений оливина из кимберлитовых трубок ими являются: закономерная структурная ориентировка включений относительно алмаза-хозяина, отражающая эпитактическое срастание оливина с алмазом; морфология включений, соответствующая его положению в пространстве кристалла-хозяина. Для включений оливина в алмазах из россыпи Эбелях единственным зафиксированным нами критерием сингенетичности является искажение морфологии минерала-узника. В ряде случаев так же, как и в алмазах из кимберлитовых трубок, морфология включений проявляет зависимость искажения внешней формы от симметрии алмаза-хозяина, положения в объеме кристалла, что позволяет предположить их сингенетичное происхождение вне зависимости от зафиксированной ориентировки.

Расчет остаточного давления во включениях оливина в алмазах из кимберлитовых трубок Айхал и Удачная дал значения, близкие для расчетной величины термодинамических условий роста алмазов из кимберлитов, соответствующие глубине зарождения алмазов не менее 165 км. На основании эмпирических данных и стойкой зависимости напряженности включений от их структурной ориентировки в алмазе можно утверждать, что для закономерно ориентированных включений оливина характерно напряженное состояние, обусловленное гетерометрией кристаллических решеток алмаза и оливина, находящихся в эпитактическом срастании друг с другом. Данная закономерность распространяется на все исследованные кри-

сталлы из россыпи Эбелях и этим отличает их от алмазов кимберлитового генезиса.

Авторы благодарят В.П. Афанасьева (ИГМ СО РАН) за содействие в проведении аналитических работ и помощь в интерпретации материалов.

*Работа выполнена в рамках проекта НИР ИГАБМ СО РАН № VIII.72.1.3.*

### Литература

1. Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П. и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, № 3. – С. 335 – 353.
2. Goryainov S.V., Krylov A.S., Pan Yu et al. Raman investigation of hydrostatic and nonhydrostatic compressions of OH- and F-apophyllites up to 8 GPa // Journal of Raman Spectroscopy. – 2012. – 43. – P. 439–447.
3. Goryainov S.V., Likhacheva A.Y., Rashchenko S.V. et al. Raman identification of lonsdaleite in Popigai impactites // Journal of Raman Spectroscopy. – 2014. – 45. – P. 305–313.
4. Sobolev N.V., Fursenko B.A., Goryainov S.V. et al. Fossilized high pressure from the Earth's deep interior: The coesite-in-diamond barometer // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2000. – V. 97, № 22. – P. 11875–11879.
5. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. – М.: Наука, 1984.
6. Шафрановский И.И. Очерки по минералогической кристаллографии. – Л.: Недра, 1974. – 67 с.
7. Футергендлер С.И., Франк-Каменецкий В.А. Об эпитактической природе некоторых включений в алмазах // Рентгенография минерального сырья. – 1964. – № 4. – С. 97–107.
8. Гаррис Дж.У., Генрикс Р.К., Мейер Г.О.А. Ориентация включений силикатных минералов в природном алмазе // Рост кристаллов. – 1967. – № 8. – С. 118 – 123.
9. Каги Х., Одаке Ш., Фукура С., Зедгенизов Д.А. Определение глубины образования алмаза методом спектроскопии КР: разработка и приложение метода // Геология и геофизика. – 2009. – Т. 50, № 12. – С. 1524 – 1529.
10. Пироговская К.Л., Зедгенизов Д.А., Барашков Ю.П. Алмазы с включениями оливина из аллювиальных россыпей бассейна р. Эбелях // Отечественная геология. – 2002. – № 4. – С. 24 – 26.
11. Israeli E.S., Harris J.W., Navon O. Raman barometry of diamond formation // Earth and Planetary Science Letters. – 1999. – V. 173 – P. 351–360.
12. Yasuzuka T., Ishibashi H., Arakawa M. et al. Simultaneous determination of Mg# and residual pressure in olivine using micro-Raman spectroscopy // Journal of Mineralogical and Petrological Sciences. – 2009. – 104. – P. 395 – 400.

*Поступила в редакцию 07.04.2015*