

УДК 548.2:548.5:549.211:549.621.14:550.4

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ОРИЕНТИРОВКИ ОЛИВИНА И АЛМАЗА ИЗ КИМБЕРЛИТОВОЙ ТРУБКИ УДАЧНАЯ, ЯКУТИЯ

© 2017 г. Ю. В. Сереткин^{1,2}, В. Л. Скворцова³, А. М. Логвинова^{1,2,*},
академик РАН Н. В. Соболев^{1,2}

Поступило 29.12.2016 г.

Кристаллографическая ориентировка алмаза и включений оливина изучена методом монокристаллической рентгеновской дифрактометрии для 19 включений оливина из трёх алмазов кимберлитовой трубки Удачная. Не обнаружено ни одного включения, ориентировка которого отвечала бы эпитаксиальному критерию.

DOI: 10.7868/S0869565217280209

Многое из того, что мы знаем о генезисе и распределении алмаза в мантии Земли, было выведено косвенно по характеристикам минеральных включений в алмазе. Эти включения были классифицированы на основании времени их образования относительно алмаза-“хозяина” [1–4]: сингенетические включения были сформированы одновременно с алмазом. Протогенетические включения представляют собой уже существующий материал, который был захвачен растущим алмазом.

Выявление сингенетических включений давно имеет первостепенное значение в алмазных исследованиях [2, 4, 5]. В самом деле, поскольку алмаз ведёт себя как инертный контейнер, любая геологическая информация, полученная при изучении сингенетического включения, такая как давление и температура образования, возраст и геохимия родительской среды, должна также однозначно относиться к алмазу-“хозяину”.

Очевидно, что совместный рост минерала-включения и минерала-матрицы предполагает и их определённую ориентацию друг относительно друга. П. Хартман [6] объясняет обнаруженную ориентировку оливина в алмазе (010) оливина // (111) алмаза и [101] оливина // [101] алмаза [7] как следствие возможного эпитаксиального

соответствия [7], основанного на сходстве длин периодов по этим направлениям в структурах оливина и алмаза на своих контактных плоскостях. Та же ориентация была обнаружена для одного из четырёх оливиновых включений (остальные три не показывают никакой специальной ориентации), представленных в [8]. Было отмечено, что отношение между эпитаксиальными включениями и их хозяином будет представлять собой доказательство сингенезиса [9].

На сегодня исследований, посвящённых определению ориентации включений, достаточно мало [5], и требуется накопление статистического материала для каких-либо обобщений о возможности либо невозможности использования подобного критерия для оценки их сингенетичности. Современные методы дифракционных исследований позволяют надёжно и достаточно экспрессно проводить такие исследования. Так, недавно [10] были представлены результаты изучения монокристалльного рентгеноструктурного анализа ориентировки 43 включений оливина в 20 алмазах из трубки Удачная. Перспективным в этом направлении представляется также метод дифракции обратно рассеянных электронов [11]. Хотя с учётом приведённых работ список изученных включений существенно пополнился, требуются дальнейшие исследования для накопления экспериментальных данных.

В работе изложены результаты изучения методом монокристаллической рентгеновской дифрактометрии 19 включений оливина трёх образцов алмаза из трубки Удачная.

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

² Новосибирский государственный университет

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

*E-mail: logv@igm.nsc.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Изучены три образца из трубки Удачная из коллекции А.П. Руденко. Уплощённые по [111] кристаллы № 20, 44 и 72 размерами $\sim 2 \times 2 \times 0,5$ мм содержали соответственно 10, 5 и 4 включения оливина, ориентировку которых можно было измерить.

Ориентации включений оливина в каждом алмазе были определены методом монокристалльной рентгеновской дифрактометрии на четырёхкружном дифрактометре Oxford Diffraction Xcalibur Gemini, оснащённом CCD-детектором (излучение MoK_α , 50 кВ, 30 мА, графитовый монохроматор, коллиматор 0,3 мм). Расстояние образец–детектор 85 мм. Алмазы были наклеены на стеклянную нить и установлены на дифрактометрической головке. В том случае, когда включения расположены рядом, оптическую юстировку проводили по одному из них. Все сгруппированные включения попадают в рентгеновский пучок, и их дифракционные данные накапливаются в одном эксперименте. Оцененная погрешность определения ориентации кристалла при его смещении с центра рентгеновского пучка не превышает 2° [10]. Если включения были значительно разнесены друг от друга и существовал риск, что такое включение окажется вне рентгеновского пучка, то каждое такое включение юстировалось

и измерялось отдельно. Накопление дифракционного массива проводилось в полной сфере отражений методом ω -сканирования с шириной сканирования $1^\circ/\text{фрейм}$. Наборы дифракционных 2D-фреймов (570–730 фреймов в одном эксперименте) были обработаны с помощью программного обеспечения CrysAlis 171.37.35 (Agilent).

Определение взаимной ориентировки включений оливина, зафиксированных в алмазах при высоких давлениях [12], выполнено с использованием программы OrientXplot 4.2 [13]. Для сравнения относительных ориентаций включений в различных алмазах необходимо принимать во внимание неоднозначность выбора кристаллографических направлений оливина и алмаза, обусловленную их симметрией. Эта неопределенность устраняется пересчётом матриц ориентации каждого включения и алмаза–“хозяина” с применением соответствующих операций симметрии; в результате выбранное кристаллографическое направление оливина оказывается в указанной кристаллографической асимметрической единице алмаза [10]. Полученные абсолютные и относительные ориентации всех включений в координатной системе алмаза показаны на рис. 1; пересчитанные значения углов между координатными направлениями включения и кристалла-матрицы даны в табл. 1.

Таблица 1. Углы между кристаллографическими направлениями оливина (a, b, c) и алмаза (a_1, a_2, a_3) для изученных включений по данным монокристалльного рентгеноструктурного анализа

Оливин	a			b			c		
	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3	a_1	a_2	a_3
Образец 20									
1	105,94	44,09	129,74	74,16	45,92	48,36	22,78	89,55	112,77
2	113,47	43,98	124,67	96,04	54,53	36,14	24,33	67,57	98,94
3	107,01	24,89	107,61	67,60	66,37	33,57	28,71	82,62	117,58
4	115,58	35,37	112,67	90,92	65,14	24,88	25,60	66,55	99,70
5	116,83	32,29	73,39	27,49	67,02	75,74	84,46	68,61	157,84
6	69,44	23,83	101,54	155,10	67,34	80,22	76,56	83,00	15,21
7	66,23	28,19	104,27	155,32	65,32	89,59	83,73	77,22	14,28
8	63,40	35,35	111,49	153,35	65,17	99,07	88,55	66,55	23,50
9	70,51	22,23	100,26	151,42	68,04	72,65	69,96	86,74	20,33
10	45,10	45,05	92,94	134,91	44,96	88,24	86,68	89,17	3,42
Образец 44									
1	81,75	23,04	111,35	152,77	73,65	68,85	64,25	74,22	30,83
2	110,60	21,17	85,34	20,80	69,78	85,34	87,26	84,00	173,40
3	114,38	30,77	107,59	57,62	60,18	46,96	42,55	83,11	131,72
4	100,96	14,98	100,09	46,06	75,03	47,77	46,01	89,64	136,01
5	95,29	16,85	105,95	111,67	77,09	25,57	22,37	79,36	70,56
Образец 72									
1	125,19	35,86	83,95	39,98	60,60	65,51	73,49	71,36	154,68
2	126,54	38,44	79,71	39,90	60,78	65,41	76,19	67,36	153,07
3	128,31	39,56	81,58	42,26	59,18	64,18	74,89	67,77	152,65
4	132,29	42,42	87,29	42,30	47,89	86,68	89,36	85,76	175,71

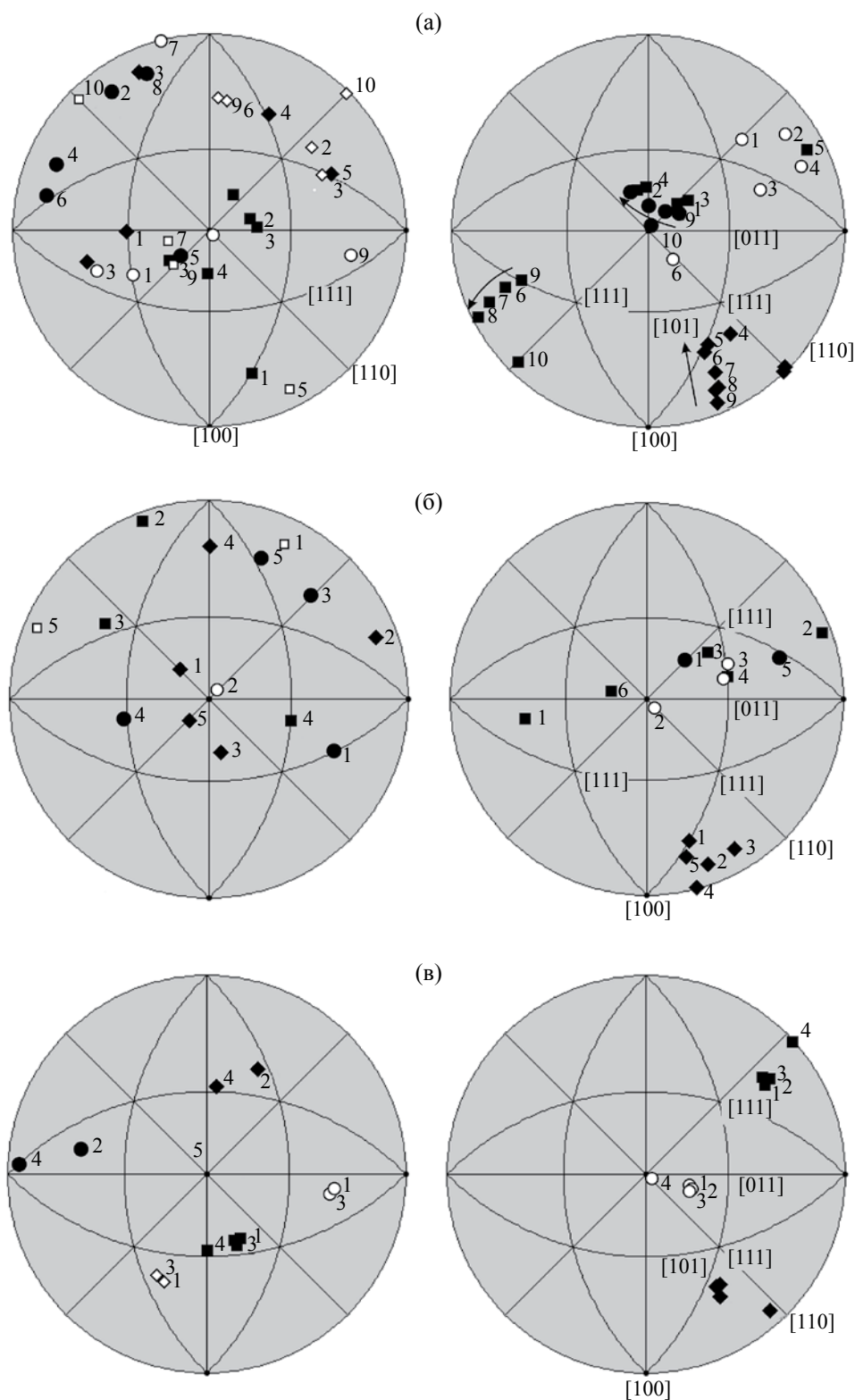


Рис. 1. Абсолютная (слева) и относительная (справа) ориентировки кристаллов оливина в кристаллографической системе алмаза-матрицы в изученных образцах 20 (а), 44 (б), 72 (в). Оси алмаза направлены: a_1 – вниз, a_2 – вправо, a_3 – по правилу правой системы координат. Оси a , b и c оливина показаны соответственно квадратами, ромбами и кружками. Закрашенные символы отмечают положительное направление вектора, пустые – отрицательное.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящем эксперименте не обнаружено ни одного включения, ориентировка которого отвечала бы эпитаксиальному критерию Хартмана [6]. Из 10 включений образца 20 четыре (9, 6, 7, 8) образуют ряд регулярно развёрнутых друг относительно друга (на $6,6^\circ$, $13,5^\circ$ и $18,8^\circ$) кристаллов (рис. 1). Оси a , b и c включения 10 ориентированы параллельно кристаллографическим направлениям алмаза-матрицы [110], [1–10] и [001] соответственно. Ось b оливина 1 также параллельна [110] алмаза, однако два других координатных направления ориентированы со значительным разворотом относительно указанных кристаллографических направлений алмаза. Остальные четыре оливина не демонстрируют какой-либо закономерной ориентировки в матрице алмаза.

Образец 44 содержит пять включений; их оси b развернуты друг относительно друга в пределах 17° (рис. 1), однако два других координатных направления ориентированы произвольно.

Особенность образца 72 заключается в том, что три из четырёх включений оливина ориентированы параллельно друг другу; углы между соответствующими координатными осями лежат в пределах 4° . При этом их ориентировка не отвечает требованиям к эпитаксиальному срастанию оливина и алмаза [5]. Четвёртое включение развёрнуто относительно трёх других на $\sim 20^\circ$.

Присутствие нескольких одинаково ориентированных включений оливина в одном алмазе ранее было обнаружено Ф. Нестола с соавторами [10]. Можно согласиться с авторами, что это самый интригующий и необычный результат исследования. Причины их сосуществования в общем не ясны. Авторы [10] выдвигают две версии для объяснения этого: модификация формы включения после инкапсуляции и селективное частичное растворение оливина в процессе роста алмазов. Первую гипотезу авторы сами считают маловероятной. Второй механизм – селективное частичное растворение захваченного растущим алмазом включения – они считают более предпочтительным. Данная гипотеза нам кажется надуманной, а своей у нас нет. Так что мы просто констатируем тот факт, что такие включения встречаются, и нельзя сказать, что исключительно редко.

Одно из включений оливина в образце 72 удалось вывести на поверхность алмаза, пришлифовать и определить его состав с помощью микроанализатора с электронным зондом JXA 8100 по стандартной методике. Его $Mg\#$ [100Mg/(Mg+Fe)] соответствует типичному гарцбургитовому оливину 93,08 и превышает среднее значение, определённое для выборки из 44 включений оливина в алмазах трубки

Удачная [14], равное 92,8. Содержание (мас. %): SiO₂ 41,6; MgO 51,4 и примесей: NiO 0,38; FeO 6,82; MnO 0,10; Cr₂O₃ 0,03; CaO 0,01, сумма 100,25 – находится в пределах типичных для включений оливина в алмазах указанной трубки.

Нам представляется, что необходимо дальнейшее расширение исследования взаимной ориентировки включений и вмещающего алмаза [5], причём повышенное внимание должно быть обращено на множественные включения различных ассоциирующих минералов в одном алмазе. Недостаточно ограничиваться только самым распространённым включением – оливином, типичным как в микроалмазах, так и в особо крупных алмазах, масса которых превышает 10 карат [15].

Исследование выполнено за счёт гранта РФФИ № 14–05–00262 и гранта РНФ № 14–17–00602.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Harris J.W.* // *Industr. Diamond Rev.* 1968. V. 28. P. 402–410.
2. *Соболев Н.В., Боткунов А.И., Бакуменко И.Т., Соболев В.С.* // *ДАН.* 1972. Т. 204. № 1. С. 117–120.
3. *Prinz M., Manson V., Hlava P.F., Keil K.* // *Phys. and Chem. Earth.* 1975. V. 9. P. 797–815.
4. *Meyer H.O.A.* In: *Mantle Xenoliths.* Chichester.: Wiley, 1987. P. 501–522.
5. *Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshaw S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J.* // *Revs Mineral. and Geochem.* 2013. V. 75. P. 355–421.
6. *Hartmann P.* // *Amer. Mineral.* 1954. V. 39. P. 674–675.
7. *Mitchell R.S., Giardini A.A.* // *Amer. Mineral.* 1953. V. 38. P. 136–138.
8. *Футергендлер С.И., Франк-Каменецкий В.А.* // *Зап. ВМО.* 1961. Т. 90. С. 230–236.
9. *Орлов Ю.А.* *Минералогия алмаза.* М.: Наука, 1973.
10. *Nestola F., Nimis P., Angel R.J., Milani S., Bruno M., Prencipe M., Harris J.W.* // *Intern. Geol. Rev.* 2014. V. 56. P. 1658–1667.
11. *Neuser R.D., Schertl H.-P., Logvinova A.M., Sobolev N.V.* // *Rus. Geol. and Geophys.* 2015. V. 56. № 1–2. P. 321–329.
12. *Angel R.J., Alvaro M., Nestola F., Mazzucchelli M.J.* // *Rus. Geol. and Geophys.* 2015. V. 56. № 1–2. P. 211–220.
13. *Angel R.J., Milani S., Alvaro M., Nestola F.* // *J. Appl. Crystallogr.* 2015. V. 48. P. 1330–1334.
14. *Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V.* // *Lithos.* 2009. V. 112S. P. 701–713.
15. *Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Логвинова А.М., Суходольская О.В., Солодова Ю.П.* // *ДАН.* 2001. Т. 376. № 3. С. 382–386.