

УДК 550.4:551.2+548.4+549.21.211+549.731.15

ВАРИАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И РЕДКИЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ МНОЖЕСТВЕННЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ МАГНЕЗИОХРОМИТА В АЛМАЗАХ ЯКУТИИ

© 2021 г. А. М. Логвинова¹, А. О. Серебрянников¹, академик РАН Н. В. Соболев^{1,*}

Поступило 14.07.2021 г.
После доработки 04.08.2021 г.
Принято к публикации 09.08.2021 г.

Изучены зональность алмазов с помощью катодолюминесценции (КЛ) и химический состав минеральных включений в шести типичных алмазах из кимберлитов Якутии. Алмазы пришлифованы на специальном оборудовании до выведения на поверхность включений, размерами 10–200 мкм. Включения характеризуются морфологией, отражающей влияние вмещающих алмазов. Множественные включения и сростки магнезиохромита, оливина, пироба и флогопита расположены как в центральных, так и периферических зонах алмазов. В трех алмазах зафиксированы значимые различия в составе магнезиохромитов в разных зонах роста, а в трех других таких различий не обнаружено. Подавляющее большинство (5 из 6 изученных алмазов) по особенностям состава магнезиохромита, оливина и флогопита относятся к преобладающему в алмазах из различных алмазоносных провинций Земли дунит-гарцбургитовому парагенезису. В одном из алмазов впервые зафиксирован лерцолитовый парагенезис, идентифицированный по составу включения пироба в магнезиохромите. Сложная история роста алмазов и вариации химического состава включенных минералов свидетельствуют о возможности сосуществования сингенетических и протогенетических включений в одном и том же кристалле алмаза.

Ключевые слова: зональность алмазов, катодолюминесценция, минеральные включения в алмазах, магнезиохромит, оливин, пироб, флогопит, дунит-гарцбургитовый парагенезис, лерцолитовый парагенезис

DOI: 10.31857/S2686739721110086

Хромшпинелиды являются постоянными акцессорными минералами широкой серии ультраосновных пород, представленных дунитами, гарцбургитами, лерцолитами, вебстеритами и верлитами в различных геологических обстановках и относящихся к различным фациям глубинности. Наряду с оливином и пиробом они относятся к наиболее характерным минералам кимберлитов и зафиксированы практически во всех кимберлитовых телах не только Якутии [1, 2], но и всех алмазоносных провинций земного шара, а также в алмазоносных лампроитах Австралии [3]. В отличие от оливина, полностью серпентинизированного в подавляющем большинстве кимбер-

литовых тел, хромшпинелиды, составляющие незначительную часть концентрата тяжелой фракции кимберлитов, обычно фиксируются, в основном, в виде редких неизменных, либо частично измененных [1] зерен, а также с отчетливыми реакционными соотношениями с пиробом [4]. Уже первые обстоятельные исследования особенностей состава хромшпинелидов, ассоциирующих с алмазами в монокристаллах и поликристаллических агрегатах, а также в ксенолитах ультраосновных пород и концентратах кимберлитов Якутии, впервые выполненные почти для 1000 образцов с помощью рентгеновского микроанализатора с электронным зондом, позволили выявить исключительное разнообразие в содержании Cr_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , FeO и TiO_2 , не имеющее аналога ни в одном типе горных пород [1, 2]. В концентратах алмазоносных кимберлитов существенная роль принадлежит высокохромистым магнезиохромитам, аналогичным по составу

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

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

ву включениям в алмазах и поликристаллических агрегатах алмаза [1, 2].

По аналогии с оливинами магнезиохромиты относятся к наиболее распространенным включениям в алмазах, что подтверждено многолетними исследованиями как визуальными, так и инструментальными, и продемонстрировано в серии обобщений [1–3, 5].

Дополнительным следствием повышенного внимания к хромшпинелидам являются попытки выявления взаимной ориентировки с алмазом, соответствующей эпитаксиальному критерию, методом монокристалльной рентгеновской дифрактометрии минералов, включенных в алмазах. Такие попытки проводились в ряде работ [6–9] и не привели к положительному результату, хотя в ранних обобщениях в отдельных случаях указывается на закономерную ориентировку включений и алмаза [5]. Новейшими исследованиями было установлено, что только отдельные включения магнезиохромита в нескольких алмазах демонстрируют в разнообразных комбинациях включений перидотитового парагенезиса ориентировку, близкую к ориентировке алмаза-матрицы [9]. Аналогичные результаты были получены авторами работ [7, 8], причем было впервые отмечено [8], что вокруг каждого включения имеется тонкая пленка флюида, вероятно, препятствующая получению положительного результата, что было также показано для наноразмерных включений оливина [6].

В настоящем сообщении приводятся новые данные по исследованию вариаций химического состава множественных включений магнезиохромитов и ассоциирующих минералов в шести кристаллах алмаза из четырех главных коренных месторождений алмаза Якутии: кимберлитовых трубок Мир, Интернациональная, Юбилейная и Комсомольская.

Алмазы, имеющие размеры до 2 мм, содержащие визуально непрозрачные ограненные множественные включения, отобраны для наших исследований из специальных фондов. Алмазы относятся к разновидности I [5] и представлены плоскогранными октаэдрами, частично кристаллами комбинационной формы, образованными в результате ступенчато-пластинчатого развития граней {111}, и додекаэдроидом (рис. 1, 2).

В процессе работы всего исследовано 23 кристалла алмаза размером до 2 мм с множественными включениями магнезиохромита. Исследования выведенных в единую полировку с алмазом-матрицей включений выявило тенденции изменения химического состава в зависимости от нахождения их в разных ростовых зонах алмаза. В большинстве случаев состав включений практически не различался, только в трех кристаллах алмаза были зафиксированы включения магне-

зиохромита, расположенные согласно катодолюминесценции (КЛ-изображениям) в разных зонах. Из-за ограниченности требуемого объема публикации в статье приведены 6 образцов с наиболее показательным соотношением зоны локализации включений в кристалле-матрице и их химического состава.

Для исследования состава минеральных включений кристаллы алмаза-матрицы (рис. 1, 2) были пришлифованы на специальном оборудовании с использованием шлифовального круга с порошковым алмаз-железным напылением до выведения включений, имеющих размеры от 10 до 200 мкм в единую полировку с алмазом-матрицей. Этот весьма трудоемкий процесс требует множества дополнительных специальных приспособлений, включающих наличие специальных зажимных цанг разного размера, нескольких зажимных устройств, фиксирующих цангу и, непосредственно, сам алмаз в определенном положении и т.д. и навыков в его проведении.

Отдельные зоны роста исследованных алмазов, а также зоны с преимущественным расположением включений выявлены методом катодолюминесценции с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Химический состав минеральных включений определялся с помощью микроанализаторов с электронным зондом Camebax-micro фирмы "САМЕСА" и JXA-8100 фирмы "JEOL" с применением стандартной методики. Особое внимание уделялось определению микропримесей, таких, как Ni, Zn, Mn, Si и V в хромшпинелидах [10]. Аналитические исследования проводились в "ЦКП Многоэлементных и изотопных исследований СО РАН".

Различная ростовая история изученных шести кристаллов алмаза отражена на рис. 1 (б, д, з, л) и рис. 2 (б, д) в КЛ-изображениях различной интенсивности. Номера, представленные на КЛ-изображениях алмазов, а также в правой части рисунков вместе с символами включенных минералов демонстрируют общий вид и расположение включений на пришлифованной поверхности каждого алмаза-матрицы. Морфология зерен включенных минералов отражает влияние вмещающих алмазов в разной степени: от полного или почти полного сохранения первичной огранки (обр. Mts-31, I-5-15, Yubk-235) до почти полностью резорбированных зерен (обр. Kms-81, I-5-23, Mts-30).

В отличие от рис. 1, на котором показаны множественные включения магнезиохромита в четырех образцах алмаза, причем в двух из них (Kms-84 и Mts-31) в магнезиохромите зафиксированы также включения оливина, рис. 2 демонстрирует редкие парагенезисы магнезиохромита:

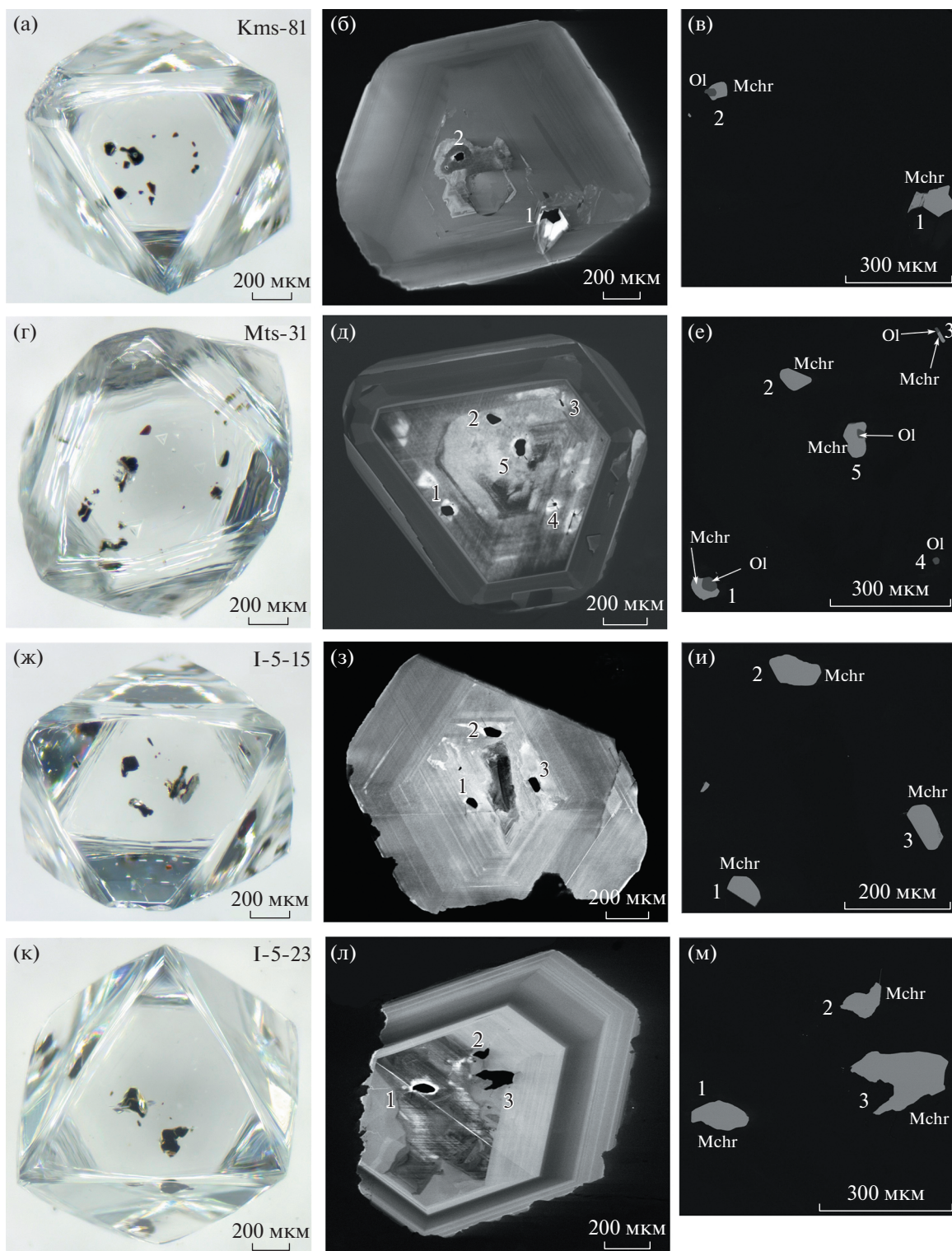


Рис. 1. Общий вид кристаллов алмаза из кимберлитовых трубок Комсомольская (Kms-81), Мир (Mts-31), Интернациональная (I-5-15 и I-5-23) перед шлифованием (а, г, ж, к), КЛ изображения тех же алмазов с номерами пришлифованных включений (б, д, з, л); положение пришлифованных включений в каждом алмазе (в, е, и, м). Условные обозначения: Mchr – магнезиохромит, Ol – оливин. Номера включений соответствуют номерам анализов в табл. 1.

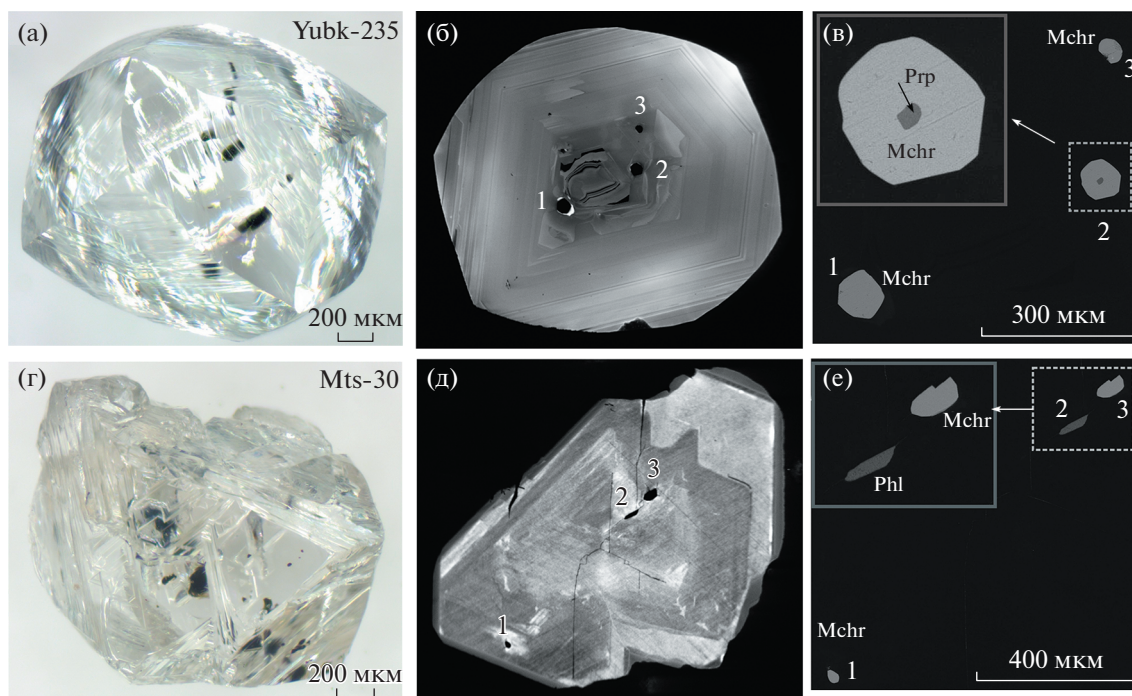


Рис. 2. Общий вид двух кристаллов алмаза из кимберлитовых трубок Юбилейная (Yubk-235) и Мир (Mts-30) перед шлифованием (а, г), КЛ-изображения тех же алмазов с номерами пришлифованных включений, положение пришлифованных включений в каждом алмазе. Условные обозначения: Prp – пироп, Phl – флогопит. На рис. (в, е) пунктиром и стрелками показано положение увеличенных врезок редких включений.

с пиропом лерцолитового парагенезиса (обр. Yubk-235) и с флогопитом (обр. Mts-30). Химические составы ассоциирующих минералов представлены в табл. 1. Номера анализов идентичны номерам включений на рис. 1 и 2.

Уникальным по представительности доступных для анализа включений магнезиохромита и оливина является обр. Mts-31 (рис. 1г, 1д, 1е), в котором на пришлифованной поверхности видны четыре включения магнезиохромита, причем три из них содержат оливин в виде включений и сростка. Анализы включений представлены в табл. 1 и характеризуются близкими составами оливина (см. табл. 1) с Fo 93.4–93.6, но с различиями в составах магнезиохромита от 60.1–61.1 мас. % Cr₂O₃ и 8.47–8.78 мас. % Al₂O₃ во внутренней зоне алмаза (ан. 2 и 5) до 63.1–63.2 мас. % Cr₂O₃ и 6.82–6.88 мас. % Al₂O₃ во внешней зоне (ан. 1 и 3). Содержание Cr₂O₃ приведено только для изолированного включения оливина (ан. 4), во избежание влияния фона от ассоциирующих магнезиохромитов.

Достаточно четкие различия в содержании Cr₂O₃ и Al₂O₃, а также Mg# характерны для обр. Kms-81 с уменьшением Mg# и увеличением Cr# к внешней части образца.

Остальные два образца, представленные на рис. 1, I-5-15 (ж, з, и) и I-5-23 (к, л, м) содержат по

три включения магнезиохромита, приуроченных к внутренним зонам алмазов. Составы включений в каждом из образцов (см. табл. 1) практически не различаются.

В двух алмазах, представленных на рис. 2, обнаружены редкие включения. В образце Yubk-235 (рис. 2а, 2б, 2в) выявлен пироп в магнезиохромите. В отличие от преобладающих в алмазах высокохромистых субкальциевых пиропов, относящихся к дунит-гарцбургитовому парагенезису без клинопироксена с существенной примесью кноррингитового (MgCr) компонента, являющихся четким индикатором присутствия алмазов при поисковых работах [11], обнаруженный пироп по соотношению содержания (мас. %) Cr₂O₃ 6.05 и CaO 5.37 (см. табл. 1) относится к лерцолитовому парагенезису [1], а хромшпинелид, ассоциирующий с ним, существенно отличается по составу (<60 мас. %) от типичных магнезиохромитов, включенных в алмазы [1, 12, 13], характеризующихся содержанием Cr₂O₃, превышающим 60–62 мас. % (рис. 3). Такой парагенезис зафиксирован в алмазе впервые.

Ранее нами была предпринята попытка оценки распространенности включений в крупных алмазах из трех промышленных месторождений Якутии кимберлитовых трубок Мир, Удачная и Айхал из специальных фондов [14]. Масса каждого из этих кристаллов превышает 10.8 карата.

Таблица 1. Химический состав минеральных включений в алмазах (мас. %)

1. Магнезиохромит														
Образец	№ вкл-ния	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	ZnO	NiO	V ₂ O ₃	Сумма	Cr#	Mg#
Kms-81	1	0.11	0.35	6.34	63.9	14.8	0.17	12.8	0.08	0.07	0.24	98.86	87.1	63.2
	2	0.06	0.41	7.91	61.2	14.8	0.18	13.4	0.08	0.07	0.25	98.36	83.8	65.8
Mts-31	1	0.05	0.19	6.88	63.2	16.7	0.19	12.0	0.08	0.06	0.36	99.71	86.0	59.4
	2	0.08	0.20	8.78	60.1	16.6	0.17	12.6	0.11	0.09	0.39	99.12	82.1	61.9
	3	0.04	0.17	6.82	63.1	16.4	0.18	12.0	0.10	0.06	0.34	99.21	86.1	59.8
I-5-15	1	0.12	0.11	6.82	63.0	16.7	0.18	12.1	0.07	0.07	0.34	99.51	86.1	60.0
	2	0.01	0.10	7.17	63.1	16.7	0.16	12.4	0.05	0.06	0.34	100.2	85.5	61.1
I-5-23	1	0.12	0.08	6.82	63.0	16.6	0.19	12.1	0.04	0.06	0.32	99.33	86.1	60.1
	2	0.08	0.06	6.68	62.7	17.1	0.17	12.0	0.09	0.06	0.32	99.26	86.3	59.8
	3	0.09	0.05	6.87	62.9	16.6	0.18	12.2	0.10	0.06	0.31	99.36	86.0	60.6
Yubk-235	1	0.17	0.87	14.2	54.8	13.0	0.11	15.5	0.03	0.06	0.20	98.94	72.1	71.4
	2	0.19	0.82	13.2	55.7	12.8	0.11	15.2	0.08	0.08	0.16	98.34	73.9	70.9
	3	0.15	0.83	14.4	53.9	12.7	0.13	15.7	0.06	0.08	0.17	98.12	71.5	72.9
Mts-30	1	0.03	0.43	7.69	60.9	17.3	0.18	12.3	0.07	0.09	0.35	99.34	84.2	60.5
	2	0.09	0.44	7.69	60.5	17.0	0.18	12.3	0.06	0.08	0.35	98.69	84.1	60.6

2. Оливин

Образец	№ вкл-ния	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Сумма	Fo
Mts-31	1	40.9	<0.01	н.о.	—	6.42	0.10	51.0	0.01	0.36	98.79	93.4
	3	41.2	<0.01	н.о.	—	6.34	0.09	51.2	0.01	0.38	99.22	93.5
	4	41.0	<0.01	н.о.	0.15	6.29	0.10	51.1	<0.01	0.34	98.99	93.5
	5	40.8	<0.01	н.о.	—	6.28	0.09	51.3	0.02	0.35	98.84	93.6
Kms-81	1	41.6	<0.01	н.о.	—	5.52	н.о.	52.1	<0.01	0.34	99.56	94.4

3. Пироп

Образец	№ вкл-ния	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Сумма	Cr#	Mg#
Yubk-235	1	41.3	0.32	19.5	6.05	4.9	0.48	21.4	5.37	99.32	17.2	88.6

4. Флогопит

Образец	№ вкл-ния	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	K ₂ O	NiO	BaO	Cl	Сумма	Cr#	Mg#
Mts-30	1	41.5	0.62	12.6	1.79	2.93	<0.01	24.5	10.6	0.28	0.57	0.18	95.57	8.7	93.7

Примечание: Cr# [100Cr/(Cr+Al)]; Mg# [100Mg/(Mg+Fe)]; Mg# = Fo для оливина; н.о. — не определялось.

Среди крупных алмазов резко возрастает количество октаэдрических кристаллов (более 90%). Для серии образцов при их изучении были выявлены обнажающиеся на поверхности алмаза включения пироба и хромшпинелида. Фрагменты этих

включений были извлечены из 56 кристаллов алмаза и проанализированы. Основной особенностью состава пироба является преобладание высокохромистых пиробов, бедных кальцием, что типично для всех алмазов перидотитового параге-

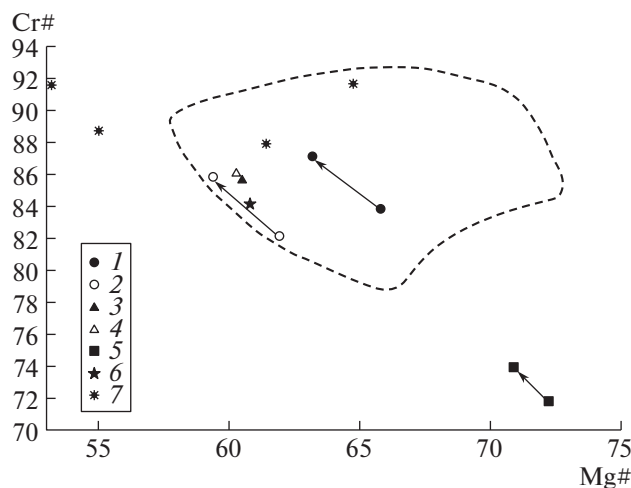


Рис. 3. Вариации состава включений магнезиохромита в процессе роста изученных алмазов: Kms-81 (1), Mts-31 (2), I-5-15 (3), I-15-23 (4), Yubk-235 (5), Mts-30 (6). Положение точек состава магнезиохромитов, извлеченных из внешней части четырех образцов крупных алмазов трубки Удачная (7) по [14]. Стрелками указано общее направление понижения температуры роста алмазов. Пунктирная линия оконтуривает область вариаций состава магнезиохромитов в алмазах по [9, 19].

незиса [1, 11, 13, 15]. Хромшпинелиды также характеризуются типичным составом, присущим включениям в алмазах [1, 2, 8, 12]. Вместе с тем отмечено присутствие в отдельных образцах магнезиохромитов аномального состава с содержанием (мас. %) Cr_2O_3 67.3–68.6 и Al_2O_3 2.02–2.68 (Cr# 94.5–95.8 и Mg# 47.2–50.0). Не исключено, что часть необычных составов магнезиохромитов может относиться к вторичным хромшпинелидам, как это показано для образца МР-9 из поликристаллического агрегата алмаза [1].

Флогопит, обнаруженный в образце Mts-30, относится к числу наиболее редких включений в алмазах, подтверждая участие летучих в их образовании [16]. Для трети изученных авторами 34 образцов алмазов с включениями флогопита и биотита [16] флогопит ассоциирует с магнезиохромитом, содержащим Cr_2O_3 от 61.7 до 66.3 мас. %, причем в трех образцах установлен Cl от 0.25 до 0.49 мас. %. В представленном в настоящей работе обр. Mts-30 также содержится 0.18 мас. % Cl, что вносит дополнительный вклад в дискуссию о роли хлора в образовании кимберлитов и алмазов [16]. Здесь зафиксирована примесь ВаО до 0.57 мас. % (см. табл. 1). По низкому Cr# 8.7, высокому Mg# 93.7 и низкой примеси TiO_2 0.62 мас. % флогопит относится к дунит-гарцбургитовому парагенезису.

Следует подчеркнуть, что разнообразие выявленных в настоящем исследовании минералов, ассоциирующих с магнезиохромитом в алмазах, не исчерпывается приведенными примерами. В работе [17] описывается пример находки включения перовскита в ассоциации с четырьмя включениями магнезиохромита, содержащими от 64.1

до 64.6 мас. % Cr_2O_3 и оливином (Fo 93), а также титаната серии LIMA в ассоциации с магнезиохромитом, энстатитом и пиропом в полиминеральном включении в алмазе.

Дискуссия, обсуждающая соотношение алмаза и включенных минералов, практически не затрагивает проблему сложного характера роста самих алмазов, выявляемого рядом подходов, в число которых входят катодоллюминесценция, анализ изменения состава включенных минералов (см. рис. 3) [12, 18–20], а также сопоставление соотношения алмазов и ассоциирующих минералов в известных ксенолитах алмазосодержащих перидотитов в кимберлитах [9, 15].

В период роста индивидуальных кристаллов алмаза происходит постепенное снижение температуры, что убедительно показано применением Zn-геотермометра для хромшпинелидов, включенных в алмазы с определением температурного интервала при росте конкретного кристалла алмаза до 400°C при понижении температуры, а интервал >100°C является обычным [9, 12, 19], что успешно использовано в работе [19].

Присутствие в неизменном образце мегакристаллического алмазосодержащего дунита включений магнезиохромита и оливина в алмазе, полностью включенном в оливине, позволяет рассматривать оливин в качестве сингенетического включения по отношению к алмазу [15]. То же самое относится к магнезиохромиту, изменяющему свой состав в процессе роста алмаза, хотя в ряде работ часть таких включений характеризуется в качестве протогенетических [7–9]. Для обсуждаемой коллекции шести алмазов следует учитывать количество зон роста и размеры кристаллов, ко-

торые (2 мм) являются минимальными для установления вероятной эволюции состава включений в процессе роста. К сожалению, незначительный размер изученных нами алмазов, не превышающий 2 мм, позволяет отметить только тенденцию к понижению температуры во время роста, показанную на рис. 3 стрелками. Эта тенденция полностью соответствует выявленной закономерности понижения температуры в процессе роста индивидуальных алмазов [9, 12, 14, 19, 20].

На конкретном примере алмаза из трубки Удачная [20] продемонстрировано, что применение метода дифракции обратно-рассеянных электронов (EBSD) в сочетании с трехмерным катодолюминесцентным изображением является исключительно важным при решении вопроса о времени роста включения. Получено доказательство сингенетического характера магнезиохромита в алмазе из трубки Удачная [20].

Сложная история роста алмаза, сопровождаемая его зональностью, с вариациями состава включений оливина и, особенно, магнезиохромита в разных зонах свидетельствует о связи роста алмаза с ростом и переменным составом минеральных включений и возможности сосуществования сингенетических и протогенетических минеральных включений в одном и том же алмазе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность рецензентам, замечания которых позволили существенно улучшить статью.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГМ СО РАН и при поддержке гранта РФФИ (проект № 20-05-00293).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sobolev N.V.* Deep Seated Inclusions in Kimberlites and Composition of the Upper Mantle. 1977. American Geophysical Union. Washington DC. 279 p.
2. *Соболев Н.В., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г. и др.* Особенности состава хромшпинелидов из алмазов и кимберлитов Якутии // Геология и геофизика. 1975. 16 (11). С. 7–24.
3. *Griffin W.L., Ryan C.G., Gurney J.J., et al.* Chromite Macrocrysts in Kimberlites and Lamproites: Geochemistry and Origin // Proc. of the Fifth Intern. Kimb. Conf. Brazil. 1994. V. 1. P. 366–387.
4. *Соболев В.С., Соболев Н.В.* Ксенолиты в кимберлитах Северной Якутии и вопросы строения мантии Земли // Доклады АН СССР. 1964. Т. 158 (1). С. 108–111.
5. *Orlov Y.L.* The Mineralogy of the Diamond. 1977. John Wiley and Sons. NY. 235 p.
6. *Hwang S.L., Shen P., Yui T.F., et al.* Low Energy Phase Boundary Pairs and Preferred Crystallographic Orientations of Olivines in Nanometer-sized Fluid Inclusions of Aykhal diamond // Lithos. 2018. V. 322. P. 392–404.
7. *Nestola F., Zaffiro G., Mazzucchelli M.L., et al.* Diamond-inclusion System Recording Old Deep Lithosphere Conditions at Udachnaya (Siberia) // Sci. Rep. 2019. V. 9. 12586.
8. *Nimis P., Angel R.J., Alvaro N., et al.* Crystallographic Orientations of Magnesiochromite Inclusions in Diamonds: What Do They Tell Us? // Contrib. Mineral. Petrol. 2019. V. 174:29.
9. *Соболев Н.В., Сереткин Ю.В., Логвинова А.М. и др.* Кристаллографическая ориентировка и геохимические особенности минеральных включений в алмазах // Геология и геофизика. 2020. Т. 61 (5–6). С. 774–793.
10. *Лаврентьев Ю.Г., Карманов Н.С., Усова Л.В.* Электронно зондовые определения состава минералов: микроанализатор или сканирующий электронный микроскоп? // Геология и геофизика. 2015. Т. 56 (8). С. 1473–1482.
11. *Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н. и др.* Хромовые пиропы из алмазов Якутии // Доклады АН СССР. 1969. Т. 189 (1). С. 162–165.
12. *Griffin W.L., Sobolev N.V., Ryan C.G., et al.* Trace Elements in Garnets and Chromites: Diamond Formation in the Siberian Lithosphere // Lithos. 1993. V. 29 (3–4). P. 235–256.
13. *Туркин А.И., Соболев Н.В.* Пироп-кноррингитовые гранаты: обзор экспериментальных данных и природных парагенезисов // Геология и геофизика. 2009. Т. 50 (12). С. 1506–1523.
14. *Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Логвинова А.М. и др.* Распространенность и состав минеральных включений в крупных алмазах Якутии // ДАН. 2001. Т. 376 (3). С. 382–386.
15. *Илупин И.П., Ефимова Э.С., Соболев Н.В. и др.* Включения в алмазе из алмазоносного дунита // Доклады АН СССР. 1982. Т. 264 (2). С. 454–456.
16. *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.
17. *Sobolev N.V., Yefimova E.S.* Composition and Petrogenesis of Ti-oxides Associated with Diamonds // Intern. Geol. Rev. 2000. V. 42 (8). P. 758–767.
18. *Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., et al.* Diamonds and the Geology of Mantle Carbon // Rev. Mineral. Geochem. 2013. V. 75. P. 355–421.
19. *Bulanova G.P.* The Formation of Diamond // J. Geochem. Explor. 1995. V. 53. P. 1–23.
20. *Wiggers de Vries D.F., Drury M.R., de Winter D.A.M., et al.* Three-dimensional Cathodoluminescence Imaging and Electron Back Scatter Diffraction: Tools for Studying the Genetic Nature of Diamond Inclusions // Contrib. Mineral. Petrol. 2011. V. 161. P. 565–579.

COMPOSITIONAL VARIATIONS AND RARE PARAGENESES OF MULTIPLE MAGNESIOCHROMITE INCLUSIONS IN YAKUTIAN DIAMONDS

A. M. Logvinova^a, A. O. Serebryannikov^a, and Academician of the RAS N. V. Sobolev^{a, #}

^a V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russian Federation

[#] E-mail: sobolev@igm.nsc.ru

Diamond zonation by cathodoluminescence (CL) and chemical compositions of mineral inclusions in six typical diamonds from Yakutian kimberlites are studied. Diamonds were polished by special device up to appearance of mineral inclusions of 10–200 micrometers in size on the surface of diamond plates. Inclusions morphology is affected by diamond matrices. Multiple inclusions as well as intergrowths of magnesiochromites, olivines, pyrope and phlogopite are located either in central or in peripheral diamond zones. Significant differences in magnesiochromite compositions are detected in different growth zones of three diamonds but three other diamonds have similar compositions in central zones. Complicated growth of included minerals allows to conclude on the possibility of coexistence of syngenetic and protogenetic inclusions within single diamond.

Keywords: diamonds zonation, cathodoluminescence (CL), mineral inclusions in diamonds, magnesiochromite, olivine, pyrope, phlogopite, dunite-harzburgitic paragenesis, lherzolic paragenesis