

УДК 549.211

**А.М. Логвинова, Д.А. Зедгенизов, Н.В. Соболев**

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН  
630090, г. Новосибирск-90, Россия, пр. Акад. Коптюга, 3  
E-mail: logv@igm.nsc.ru

## ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ И КРИСТАЛЛОФЛЮИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В АЛМАЗАХ

---

Проведен сравнительный анализ минеральных и кристаллофлюидных включений в алмазах на примере трубки Интернациональная Мало-Ботуобинского района Якутской алмазоносной провинции. Показано, что минеральные включения захватываются на определенных стадиях роста алмаза-матрицы и образуются в результате взаимодействия насыщенного летучими компонентами карбонатсодержащего расплава с силикатными материнскими породами (протолитом). Кристаллофлюидные включения, локализованные в центральной части алмаза-матрицы, представляют собой полифазные наноразмерные образования, большинство фаз которых либо не встречены в виде индивидуальных включений в алмазе (апатит, клиногумит), либо отмечены в единичных случаях (карбонаты, флогопит, периклаз). Такие включения являются дочерними фазами алмазогенерирующего расплава/флюида и наиболее полно отражают его состав.

**Введение.** Алмазы в пределах Якутской алмазоносной провинции встречаются как в коренных месторождениях — кимберлитовых трубках, так и в аллювиальных отложениях. До сих пор многие аспекты генезиса природных алмазов остаются дискуссионными. Наиболее значимую информацию в этом вопросе несут захваченные алмазом в процессе роста включения. Геохимические исследования сингенетических минеральных и кристаллофлюидных включений в алмазах свидетельствуют о существовании многокомпонентного алмазообразующего субстрата, который формируется в мантии Земли. Многолетние комплексные исследования природных алмазов и целенаправленные экспериментальные работы в этой области привели большинство исследователей к выводам о том, что мантийная среда кристаллизации алмаза — это насыщенные летучими компонентами расплавы или флюиды [6, 10, 13—15, 20, 25, 30—32, 34, 37, 44—46]. Однако до сих пор вопрос о составе алмазообразующих сред остается неоднозначным. Практически единственным источником ин-

формации служат захваченные алмазом во время роста включения, из которых лучше всего изучены минеральные. К числу наиболее принципиальных и общепризнанных научных результатов, полученных еще в начальный период изучения минеральных включений в алмазах, принадлежит доказательство существования двух главных геохимических типов субстрата, в котором образуются природные алмазы: ультраосновного и эклогитового состава [10, 29, 31]. В качестве промежуточного, переходного типа рассматривается вебстерит-пироксенитовый парагенезис [11]. Большинство исследователей [10, 29, 31, 39, 45] показано, что основные сингенетические минералы-включения ультраосновного парагенезиса — это оливин, субкальциевый высокохромистый магнезиальный гранат (пироп), клинопироксен с низкой железистостью и примесь хрома, хромит, энстатит, сульфиды (пентландит, моносульфидный твердый раствор на основе пентландита  $Mss_{Ni}$ ). Для эклогитовой минеральной ассоциации характерны не содержащие Cr минералы: омфацит, альмандиновый гранат, коэсит, рутил, сульфиды (пирротин, моносульфидный твердый раствор на основе пирротина  $Mss_{Fe}$ ), ильменит, калие-

© А.М. ЛОГВИНОВА, Д.А. ЗЕДГЕНИЗОВ,  
Н.В. СОБОЛЕВ, 2013

вый полевой шпат, самородное железо, циркон [10, 13]. Минеральные включения встречаются в алмазах достаточно редко, причем частота встречаемости варьирует в зависимости от их генетического источника. По данным [2], в алмазах из кимберлитовых трубок Якутской алмазоносной провинции резко преобладают (более 90 %) включения ультраосновного парагенезиса, особенно выделяются оливин (около 50 %) и хромит (до 40 %). Обнаруженные в процессе исследований минеральные сростки флогопита и доломита, флогопита и пироксена [12, 35] свидетельствуют о присутствии флюида в алмазообразующем субстрате [40]. Однако флогопит в виде включения в алмазе встречен в единичных случаях [12, 20, 30, 35].

В последние годы внимание исследователей акцентируется на исследовании флюидных и флюидсодержащих включений в алмазах различного генезиса [17, 21, 23, 27, 28]. Такие исследования стали возможными лишь с появлением современной высокоточной аналитической аппаратуры, позволяющей идентифицировать отдельные фазы, не превышающие по размеру 200 нм. Проведенные нами ранее исследования показали, что такие кристаллофлюидные включения представляют собой полифазные образования и по составу отличаются от известных минеральных включений в алмазах из конкретного источника [6, 27, 28]. Предполагается, что ассоциации наноразмерных кристаллофлюидных включений — это набор дочерних фаз мантийных флюидов или насыщенных летучими расплавами, которые были захвачены алмазом в процессе роста. Таким образом, исследование флюидов, идеально сохранившихся в виде включений в алмазах, дает уникальную возможность для определения состава среды и реконструкции условий образования алмазов. В данной статье на примере алмазов из кимберлитовой трубки Интернациональная Якутской алмазоносной провинции мы попытаемся интерпретировать выявленные различия в составе минеральных и кристаллофлюидных включений.

**Образцы и методы исследования.** В основу работы положены результаты комплексных исследований алмазов, содержащих минеральные включения, из кимберлитовой трубки Интернациональная Мало-Ботубинского кимберлитового района Якутской алмазоносной

провинции и сравнение их с алмазами, содержащими кристаллофлюидные включения.

Для решения поставленной задачи была выбрана следующая последовательность проведения исследований. Из представительной выборки (около 10000 кристаллов) алмазов были отобраны 86 кристаллов, содержащих минеральные включения. В большинстве случаев кристаллы представлены прозрачными бесцветными остросреберными октаэдрами либо кристаллами переходной формы. Однако встречены и алмазы с коричневым, лиловым нацветом, а также так называемые оболочечные кристаллы [8]. Предварительные исследования морфологии кристаллов проведены с помощью методов оптической и электронной сканирующей микроскопии. Для этого использовали стереоскопические микроскопы *Zeiss Stemi SV-6* и поляризационный микроскоп *Zeiss Axiolab*, электронный сканирующий микроскоп *JEOL JSM-6380LA*.

Методом шлифовки и полировки минеральные включения были выведены на поверхность алмаза-матрицы. В десяти случаях были изготовлены плоскопараллельные пластинки толщиной около 300 мкм, вырезанные параллельно грани ромбододекаэдра. Электронные изображения включений в характеристических рентгеновских лучах получены на сканирующем электронном микроскопе *JSM-6510* с энергодисперсионным спектрометром *INCA Energy-350*, на этом же приборе определено наличие (либо отсутствие) субмикроскопических фаз внутри каждого выявленного минерального включения.

Химический состав находящихся в единой полировке с алмазом-матрицей включений исследован с помощью микроанализатора с электронным зондом *JXA-8100 Jeol* (Япония). Исходя из того, что минеральные включения располагаются незакономерно в пределах захватившего их кристалла и вывести их на поверхность пластины одновременно не возможно, исследования по идентификации отдельных включений проводили на спектрометре комбинационного рассеяния *Horiba Jobin-Yvon LabRAM HR800* с возбуждением лазерным излучением с длиной волны 514,5 или 325,03 нм. После подшлифовки кристаллов алмаза определялся химический состав включений.

С целью изучения распределения примесей азота, водорода, карбонатных и силикатных

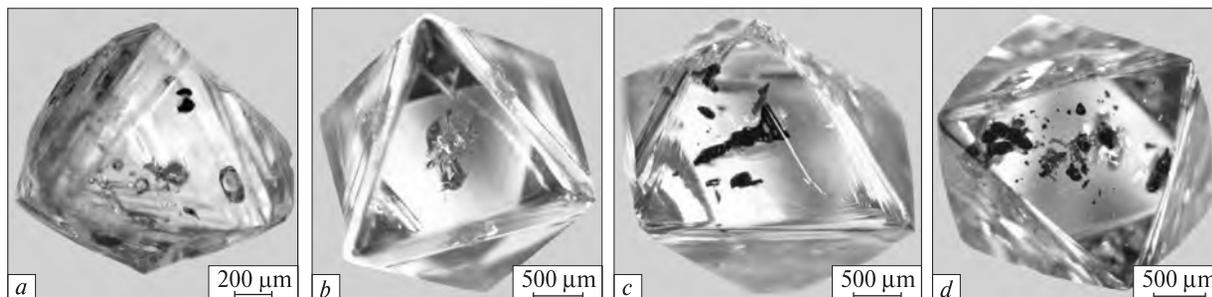


Рис. 1. Октаэдрические кристаллы алмаза из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия), содержащие минеральные включения: *a* — оливин, хромит, пироп; *b* — омфациит; *c, d* — множественные включения хромита и оливина

Fig. 1. Octahedral crystals of diamond with mineral inclusions from kimberlite pipe Internatsionalnaya (Yakutia): *a* — olivine, chromite, pyrope; *b* — omphacite; *c, d* — chromite and olivine

включений на ИК-Фурье спектрометре (FTIR) VERTEX 70 (фирма Bruker), оснащённом микроскопом HYPERION 2000, были измерены спектры ИК-поглощения. Спектры с апертурой 50 мкм регистрировали для алмазов в диапазоне  $7500\text{--}750\text{ см}^{-1}$  при разрешении  $2\text{ см}^{-1}$ . Отдельные зоны роста исследованных алмазов выявлены с помощью метода КЛ с использованием сканирующего электронного микроскопа LEO-1430 VP с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром.

**Минеральные включения.** Исследование включений в алмазах имеет особое значение, если доказана их сингенетичность алмазу-матрице. Критерии сингенетичности достаточно хорошо исследованы Н.В. Соболевым [10]. Однако даже в тех случаях, когда такие критерии не установлены или есть сомнения в сингенетическом характере включений [45], даже их протогенетический характер [30] свидетельствует о геохимическом типе алмазообразующей среды. Большинство минеральных включений в алмазах, при условии отсутствия трещин, доходящих до поверхности, относятся к сингенетическим. В качестве наиболее информативных для генетических заключений можно рассматривать только прото- и сингенетические включения.

Минеральные включения в алмазах редки. По опубликованным данным, средняя частота встречаемости включений в алмазах не превышает 1 % [36], хотя может быть существенно выше, как, например, для алмазов Венесуэлы [42]. В трубке Интернациональная, по нашим данным, минеральные включения обнаружены приблизительно в 0,8 % алмазов. Все включения имеют форму, не свойственную минералам при их свободном росте, а

имеют "отрицательную форму" алмаза-матрицы. Наиболее распространенными включениями оказались оливин (рис. 1, *a*) и хромит (рис. 1, *c, d*). Гранат идентифицирован в десяти случаях, причем восемь из них относятся к ультраосновному парагенезису. В пяти алмазах зафиксированы включения энстатита. Клинопироксены отмечены в пяти образцах, в четырех из которых идентифицирован хромдиопсид (ультраосновной тип парагенезиса). Пироксен эцлогитового типа представлен омфациитом (рис. 1, *b*). В двух алмазах диагностированы включения рутила. Минеральные включения встречаются как одиночные, так и группами (рис. 1) в одном алмазе-матрице. Хромшпинелиды часто образуют срастания с оливином. Пироксены, как правило, окружены системой трещин (рис. 1, *b*). Это служит, по-видимому, свидетельством того, что при снижении давления происходит его сброс. Размеры включений не превышали 200 мк. Исследования на сканирующем электронном микроскопе показали, что все минеральные включения такого типа однородны по составу. Состав 78 включений оливина из данной выборки алмазов опубликован [41]. Химический состав остальных исследованных включений приведен в таблице. Однотипные включения в одном алмазе-матрице могут несколько различаться по химическому составу. Например, в образцах IR-05-22, IR2-21 и IR2-22 содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в составе хромитов варьирует от 61 до 63 мас. % (таблица). Такие включения, по-видимому, были захвачены на разных стадиях роста алмаза-матрицы [26]. В девяти случаях зафиксированы включения разных минералов в пределах одного алмаза-матрицы (рис. 1, *a, c, d*; таблица).

Наряду с алмазами, содержащими относительно крупные минеральные включения, выделяется группа кристаллов, содержащих множественные минеральные микровключения, ассоциирующие, как правило, с сульфидами, КСl и вероятными флюидными включениями [7] (рис. 2). В трубке Интернациональная такие скопления включений представлены как эклогитовым, так и перидотитовым парагене-

зисами (рис. 3), причем, как и в большинстве алмазов, последний тип преобладает. В алмазе эклогитового типа сосуществуют рутил, ом-фацит (MgO — 10,5; CaO — 16,7; Na<sub>2</sub>O — 3,7 мас. %), сульфид (пирротин) (рис. 2), а в алмазе ультраосновного типа выделяются ассоциации оливина (#Mg-92) с сульфидом (пентландит) и оливина с высокохромистой шпинелью (около 63 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

**Химический состав минеральных включений в алмазах из трубки Интернациональная**  
**Chemical composition of mineral inclusions in diamonds from pipe Internatsionalnaya**

Sample	Incl	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	Na <sub>2</sub> O	Total
<i>Гранат / Garnet</i>												
IR-05-13	1	42,0	0,10	18,1	7,02	5,96	0,22	23,1	2,29	He опр.	0,01	98,80
IR-05-16	1	41,6	0,05	17,1	8,17	6,83	0,34	22,6	1,97	" "	0,02	98,66
IR-05-20	1	41,9	0,18	21,1	2,24	8,04	0,33	20,1	5,37	" "	0,03	99,24
IR-4	1	42,3	0,28	22,0	1,64	9,55	0,42	19,5	4,75	" "	0,03	100,5
IR-6	1	41,5	0,32	22,2	0,04	15,90	0,34	15,7	4,04	" "	0,13	100,2
<i>Хромит / Chromite</i>												
IR-05-17	1	0,05	0,08	7,06	63,9	16,1	0,15	11,9	He опр.	0,08	He опр.	99,32
	2	0,06	0,08	6,99	63,6	16,3	0,18	12,0	" "	0,09	" "	99,30
	3	0,05	0,07	7,17	62,7	16,0	0,15	12,0	" "	0,06	" "	98,20
	4	0,05	0,08	7,04	62,3	16,2	0,14	11,9	" "	0,09	" "	97,80
	5	0,05	0,08	7,13	63,8	16,1	0,16	12,0	" "	0,07	" "	99,39
IR-05-21	1	0,06	0,10	6,92	63,5	16,0	0,14	11,9	" "	0,06	" "	98,68
IR-05-22	1	0,05	0,07	7,93	62,5	16,2	0,15	11,9	" "	0,08	" "	98,88
	2	0,04	0,07	6,75	64,2	16,1	0,19	11,9	" "	0,04	" "	99,29
IR-05-18	1	0,05	0,07	6,39	61,0	16,0	0,15	13,1	" "	0,08	" "	96,84
IR-05-14	1	0,05	0,11	7,92	62,6	16,3	0,16	12,1	" "	0,06	" "	99,30
IR2-14-2	1	0,08	0,14	7,95	62,1	16,0	0,26	12,9	" "	0,08	" "	99,51
IR2-17	1	0,05	0,10	7,20	63,3	15,8	0,26	12,8	" "	0,08	" "	99,59
	2	0,06	0,11	7,16	63,1	15,8	0,28	12,9	" "	0,09	" "	99,50
IR2-21	1	0,04	0,13	6,97	63,6	15,6	0,27	12,8	" "	0,09	" "	99,50
	2	0,06	0,13	7,61	61,6	15,7	0,27	12,9	" "	0,08	" "	98,35
IR2-22	1	0,08	0,08	6,82	63,8	15,7	0,27	12,7	" "	0,08	" "	99,53
	2	0,06	0,09	8,02	61,9	16,0	0,28	12,8	" "	0,07	" "	99,22
IR3-10		0,06	1,06	9,16	59,0	16,5	0,27	13,4	" "	0,11	" "	99,56
<i>Клинопироксен / Clinopyroxene</i>												
IR-11	1	55,8	0,06	1,04	0,68	2,43	He опр.	18,2	21,7	He опр.	0,74	100,7
IR-17	1	55,3	0,09	0,91	1,01	2,86	" "	18,4	20,6	" "	0,83	100,0
	2	55,1	0,09	0,87	1,02	2,82	" "	18,4	20,4	" "	0,83	99,53
<i>Энстатит / Enstatite</i>												
IR-05-4	1	57,9	0,02	0,54	0,35	4,67	0,11	34,6	0,31	" "	0,13	98,63
	2	58,1	0,03	0,56	0,34	4,70	0,11	35,0	0,33	" "	0,13	99,30
IR-05-12	1	57,7	0,03	0,70	0,30	4,69	0,10	35,0	0,34	" "	0,12	98,98
	2	57,9	0,02	0,70	0,29	4,60	0,08	35,2	0,35	" "	0,10	99,24
IR-3	1	58,0	0,02	0,69	0,45	4,08	0,10	36,8	0,33	" "	0,06	100,5
IR-9	1	58,1	0,03	0,48	0,10	5,61	0,14	35,2	0,41	" "	0,04	100,1
IR-10	1	58,0	0,02	0,63	0,43	4,02	0,10	37,0	0,27	" "	0,16	100,6

Примечание. He опр. — не определялось.

Note: He опр. — not determined.

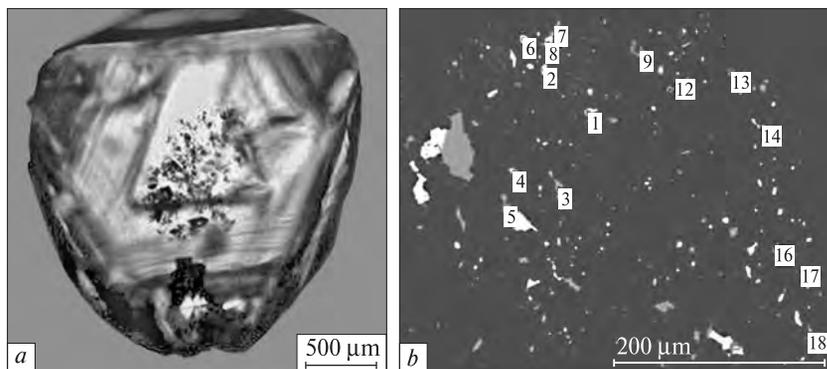


Рис. 2. Кристалл алмаза октаэдрического габитуса из трубки Интернациональная (Якутия), содержащий множественные микровключения (а); б — минеральные микровключения в обратно-рассеянных электронах: 1, 4, 12, 17 — рутил; 2, 6, 11, 14 — пирротин; 3, 5, 7, 9, 13, 15, 18 — омфацит

Fig. 2. Octahedral diamond crystal from pipe Internatsionalnaya (Yakutia) with multiple microinclusions (a); b — back-scattered image of multiple mineral microinclusions: 1, 4, 12, 17 — rutile; 2, 6, 11, 14 — pyrrhotite; 3, 5, 7, 9, 13, 15, 18 — omphacite

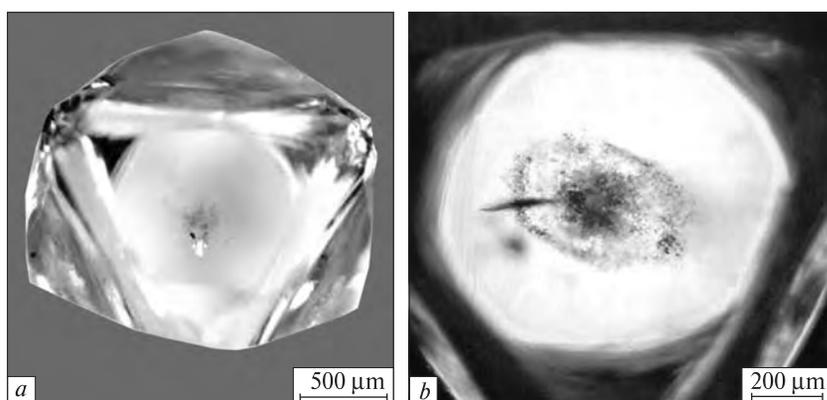


Рис. 3. Микрофотографии "облакоподобных" скоплений полифазных наноразмерных включений в центральной части кристаллов алмаза из трубки Интернациональная (Якутия)

Fig. 3. Optical micrographs of the cloudy diamonds from pipe Internatsionalnaya (Yakutia). There are many nano-dimensional inclusions in the central core of diamond crystal

Анализ полученных по минеральным включениям данных свидетельствует о значительном преобладании ультраосновного парагенезиса в алмазах из трубки Интернациональная, что подтверждает общую закономерность для кимберлитов Якутии [2].

**Кристаллофлюидные включения.** В кимберлитовых трубках достаточно часто встречаются кристаллы алмаза различного габитуса, в центральной части которых находятся темнокоричневые скопления множественных наноразмерных включений — так называемые облакоподобные образования. Такие включения в центральной части алмаза дают уникальную информацию о стадиях его зарождения и роста. Подобные включения исследованы с применением методов ИК, КР-спектроскопии [18, 32, 47] и просвечивающей микроскопии [6, 27].

В результате проведенных ранее исследований алмазов из трубки Интернациональная выявлено, что индивидуальное включение в облакоподобном скоплении представляет собой полифазное образование, размеры которого не превышают 800 нм. Включение состоит из кристаллических фаз (карбонаты, силикаты, оксиды, сульфиды, галогениды) и флюида, а также аморфного нераскristalлизованного вещества [27]. В целом, в этой совокупности фаз преобладают карбонаты, ассоциирующие в большинстве случаев с флюидными пузырьками и галогенидами (KCl).

Карбонаты преимущественно были диагностированы как доломит, Fe-обогащенный доломит, реже — Ba, Sr-содержащие карбонаты [27]. Эти данные также подтверждены ИК-спектроскопическими исследованиями [4, 5, 9].

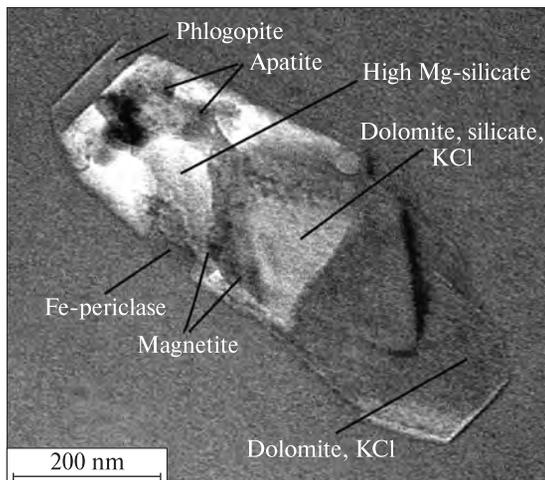


Рис. 4. Полифазное наноразмерное включение из "облакоподобного" скопления в алмазе из трубки Интернациональная (Якутия), по [27]

Fig. 4. TEM bright field image of the polyphase nanodimensional inclusion inside the diamond from pipe Internationalnaya (Yakutia) [27]

В исследованных образцах зафиксированы характерные для доломита [38] интенсивные полосы поглощения на 880 и 1448  $\text{см}^{-1}$ , а также карбонатные полосы поглощения более сложного характера: наряду с полосами поглощения кальцита (877, 1435  $\text{см}^{-1}$ ), анкерита (877, 1430  $\text{см}^{-1}$ ) отмечены полосы (860–865 и 1435, 1455  $\text{см}^{-1}$ ) в области поглощения карбонатных фаз, содержащих Ba и Sr. Полученные данные показывают, что карбонатные микровключения в исследованных алмазах представлены широким рядом карбонатов: доломит, кальцит, анкерит, а также карбонатными фазами, содержащими Ba и Sr. Среди минеральных включений в микро- и макроалмазах Якутии, имеющих размеры более 50 мкм, из упомянутых фаз не обнаружен только доломит [11]. Дополнительно отмечено, что в составе перидотитового парагенезиса в алмазе трубки Мир отмечен магнетит [15].

Далее по распространенности в рассматриваемой совокупности фаз следуют силикаты: высококремниевая слюда и Al-содержащий высокомагнезиальный силикат. Как указано в работе [23], Si-обогащенная слюда — важный индикатор высококаалиевой активности в алмазогенерирующем субстрате. Слюды с высоким содержанием Si в субмикроскопических включениях были также диагностированы в алмазах из кимберлитовой трубки Коффифонтейн (Ю. Африка) [18]. Флогопит также является редким включением в микро-

и макроалмазах [11]. В работе [27] отмечено, что оксиды в полифазных наноразмерных включениях из алмазов трубки Интернациональная представлены ильменитом и магнетитом. Для ильменита характерна устойчивая примесь Nb и Mg, в магнетите присутствует Ti. Макровключения ильменита и магнетита весьма редки в алмазах [35] и устойчивое их присутствие в изолированных кристаллофлюидных включениях, имеющих негативную алмазную огранку, служит убедительным свидетельством их первичного характера. В каждом случае оксиды ассоциируют с апатитом, карбонатами и галогенидами. Апатит — обычная фаза в центральных микровключениях [24, 27].

В каждом наноразмерном включении фиксируется высокое содержание K и Cl. Большинство исследователей склоняются к факту присутствия в таких субмикроскопических включениях KCl [18, 23, 27]. Во всех образцах в облакоподобном скоплении микровключений отмечено резкое увеличение содержания водорода.

Полифазные наноразмерные включения в алмазах весьма трудно отнести к определенному типу парагенезиса из-за отсутствия реперных для ультраосновного или эклогитового типа минеральных фаз. Единственный путь к решению этого вопроса — изучение присутствующих в ассоциации сульфидов. Известно, что для ультраосновного типа характерно преобладание пентландита, а для эклогитового — пирротина [3]. Наличие фазы пирротина и отсутствие хрома и никеля в наноразмерных полифазных включениях позволяют предположить, что все изученные алмазы с облакоподобными включениями из трубки Интернациональная принадлежат к эклогитовому парагенезису (рис. 4) [27].

**Обсуждение результатов.** Сложная эволюция кристаллов алмаза сопровождается многократными процессами роста и растворения в изменяющихся термодинамических и химических условиях среды образования. Длительная история кристаллов алмаза от момента их зарождения особенно наглядно выявляется при изучении внутренней структуры и свойств алмаза, а также при изучении минеральных включений, расположенных в разных ростовых зонах, что свидетельствует о дискретности процессов природного минералообразования. Ранее нами продемонстрирована неоднородность состава пироповых гранатов в

пределах одного кристалла алмаза-матрицы, находящихся в разных зонах роста [26]. В настоящей работе также выявлены различия в составе однотипных включений в пределах одного образца. Вероятно, это можно объяснить изменением состава захватываемого алмазом-матрицей вещества в результате многостадийного взаимодействия насыщенного летучими расплава/флюида с мантийными породами ультраосновного и основного состава.

На этапе зарождения и развития зародышей, характеризующемся пересыщением среды минералообразования углеродом, высокими скоростью кристаллизации и дефектностью кристаллизующегося алмаза, происходит захват расплавного/флюидного вещества, продуцирующего углерод для образования алмаза. Именно этими причинами можно объяснить появление в зародышевой зоне алмаза скопления множественных наноразмерных включений, представляющих собой полифазные образования. В алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная подобные включения имеют однотипный набор фаз: флогопит, апатит, магнетит, карбонаты (доломит, кальцит, Sr, Ba-карбонаты), ильменит, Al-содержащий высокомагниевого силикат (клиногумит), KCl, пирротин, графит, нераскристаллизованное стекло и флюид, содержащий воду в молекулярном виде [33, 47]. Именно такие включения несут наиболее достоверную информацию о составе алмазогенерирующего расплава/раствора в каждом конкретном участке алмазоносной литосферной мантии.

Изучение алмазов из разных месторождений мира позволило выявить широкие вариации состава субмикроскопических включений [4, 16, 22, 33, 38, 47]. Постоянное присутствие высококальциевых фаз еще раз свидетельствует о важной роли K в алмазогенерирующем субстрате. В настоящее время в алмазах из разных месторождений мира описаны включения дочерних фаз мантийных жидкостей, основной характеристикой которых служит высокая концентрация  $K_2O$  вне зависимости от концентраций других компонентов. Например, в алмазах из кимберлитовой трубки Джваненг (Ботсвана) было отмечено, что валовый состав микровключений непрерывно варьирует между двумя крайними членами: карбонатитовым и водно-силикатным [38]. Карбонатитовый флюид обогащен такими компо-

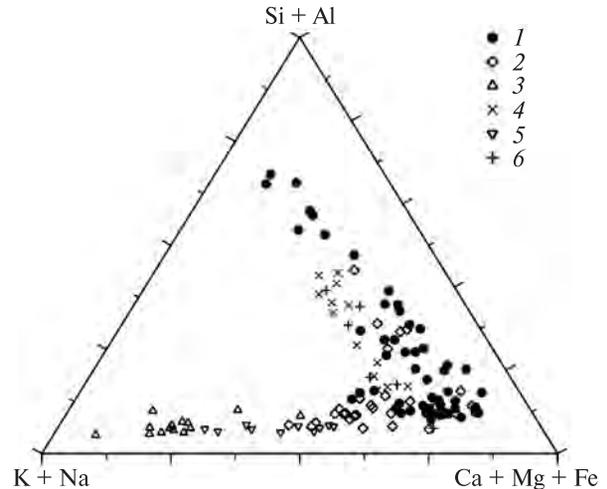


Рис. 5. Особенности состава микровключений минералообразующей среды в алмазах из разных месторождений мира [4]: 1 — трубка Интернациональная (Якутия), 2 — трубка Удачная (Якутия), 3 — Дайвик (Канада), 4 — Джваненг (Ботсвана), 5 — Коффифонтейн (Ю. Африка), 6 — Бразилия

Fig. 5. Peculiarities of composition of microinclusions of mineral-forming media for diamonds from various world mineral deposits [4]: 1 — pipe Internatsionalnaya (Yakutia), 2 — pipe Udachnaya (Yakutia), 3 — Dayvik (Canada), 4 — Dgeaneng (Botswana), 5 — Koffifonteyin (South Africa), 6 — Brazil

нентами, как  $CO_2$ ,  $CaO$ ,  $FeO$ ,  $MgO$  и  $P_2O_5$ . Водные флюиды в большей мере насыщены  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ . Важной характеристикой включений из алмазов кимберлитовой трубки Интернациональная является отношение K/Cl, достигающее в ряде образцов 3,6. Как показано в работе [19], величина этого соотношения для мантии значительно выше и составляет около 7. Это свидетельствует об обогащении состава среды кристаллизации указанных выше алмазов хлоридными рассолами. На рис. 5 показаны точки валового состава кристаллофлюидных включений в алмазах из кимберлитовых трубок Якутии (Интернациональная, Удачная, Юбилейная), а также из других месторождений мира [17, 22, 38]. Непрерывные переходы между параметрами состава водно-силикатных и карбонатитовых включений указывают на возможную смесимость этих жидкостей в условиях стабильности алмаза. Образование выделенных ассоциаций кристаллофлюидных включений в алмазах в каждом месторождении, вероятно, обусловлено эволюцией глубинного расплава, насыщенного летучими компонентами. Установлено, что состав такого расплава/раствора для трубки

Интернациональная соответствует карбонатно-силикатному тренду, а для трубок Юбилейная и Удачная — хлоридно-карбонатному. Значительное перекрытие в области состава, обогащенного карбонатами, свидетельствует о том, что именно расплавы с повышенной карбонатитовой составляющей оказываются наиболее эффективной средой [4].

Для аллювиальных алмазов северо-востока Сибирской платформы, имеющих несколько генетических источников, "центральные" наноразмерные включения также, как и в указанных выше случаях, имеют определенный набор фаз. В одном типе алмазов полифазные наноразмерные включения состоят из магнетита, доломита, клиногумита, шпинели и флюидной фазы. В другом — из обогащенных Ва и Sr карбонатов, железистой шпинели, обогащенных Ti фаз, ферропериклаза и флюида [6]. Эти фазы практически не встречаются в виде индивидуальных минеральных включений в алмазах этого региона. Минеральные включения в алмазах северо-востока Сибирской платформы, как и во всех кимберлитовых телах, относятся к двум типам парагенезиса: ультраосновному и эцлогитовому, и представлены всеми типичными для них фазами. Преобладает среди аллювиальных алмазов этого района эцлогитовый тип [43].

Среди минеральных включений в алмазах из трубки Интернациональная идентифицированы пироповый гранат, оливин, хромшпинель, хромдиопсид, энстатит, омфациит, железистый альмандинный гранат, рутил, коэсит, сульфиды (пирротин, пентландит, моносульфидный твердый раствор). В нескольких образцах зафиксированы включения сростков двух минералов. Преобладающее количество минеральных включений из указанной трубки относится к ультраосновному парагенезису.

Минеральные включения захватываются на последующих этапах кристаллизации алмаз-матрицы. Они, как правило, локализуются в определенной (промежуточной) ростовой зоне [26]. По данным [1], можно выделить промежуточный этап кристаллизации, отличающийся колебаниями физико-химических условий, проявляющийся в наличии многослойной тонкой зональности и колебаниях физических свойств, и заключительный этап, характеризующийся наиболее стабильными условиями среды минералообразования. Од-

нако определить соотношение алмазного вещества, сформированного на каждом из этих этапов, весьма сложно. Мы считаем, что минеральные включения захватываются на определенных стадиях роста алмаза-матрицы и образуются в результате взаимодействия насыщенного летучими компонентами карбонатсодержащего расплава с силикатными материнскими породами ультраосновного и основного состава. В результате такого взаимодействия подплавленные зоны могут представлять собой гомогенное расплавленное вещество с вновь раскристаллизованными кристаллами минералов (оливин, гранат, шпинель, пироксены и т. д.). Алмаз в процессе роста может захватить как расплав, так и индивидуальные включения минералов. В первом случае включения кристаллизуются одновременно с алмазом-матрицей и являются сингенетическими. Часть минеральных включений в алмазах, по нашим предположениям, были захвачены уже в твердом состоянии и являются протогенетическими.

**Заключение.** На примере одной отдельно взятой кимберлитовой трубки выявлены различия между кристаллофлюидными и минеральными включениями в алмазах. Показано, что наноразмерные кристаллофлюидные полифазные включения были захвачены алмазом-матрицей на зародышевой стадии его образования и наиболее полно отражают состав алмазообразующего субстрата. Согласно полученным нами данным, такие включения относятся к эцлогитовому типу парагенезиса. Минеральные же включения захватываются на следующей стадии кристаллизации алмаз-матрицы. Они образуются в результате взаимодействия насыщенного летучими карбонатсодержащего расплава с силикатными материнскими породами (протолитом). Около 80 % всех исследованных минеральных включений в алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная принадлежат к ультраосновному парагенезису, что подтверждает общую закономерность для кимберлитов Якутии. Различия в составе однотипных включений, заключенных в одном алмазе-матрице, свидетельствуют о важной роли метасоматических мантийных процессов в ходе кристаллизации алмаза.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 12-05-00508).*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бескрованов В.В. Онтогенез алмаза. — М. : Наука, 1992. — 167 с.
2. Ефимова Э.С., Соболев Н.В. Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Докл. АН СССР. — 1977. — 237, № 6. — С. 1475—1478.
3. Ефимова Э.С., Соболев Н.В., Поспелова Л.Н. Включения сульфидов в алмазах и особенности их парагенезиса // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. — 1983. — Ч. 112, вып. 3. — С. 300—310.
4. Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С. Особенности состава среды алмазообразования : по данным изучения микровключений в природных алмазах // Зап. Рос. минерал. об-ва. — 2007. — Ч. 136. — С. 159—172.
5. Логвинова А.М., Вирт Р., Федорова Е.Н., Соболев Н.В. "Облакоподобные" наноразмерные включения в алмазах Якутии : особенности состава и парагенезиса // Там же. — С. 173—187.
6. Логвинова А.М., Вирт Р., Томиленко А.А. и др. Особенности фазового состава наноразмерных кристаллофлюидных включений в аллювиальных алмазах северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика. — 2011. — 52, № 11. — С. 1634—1648.
7. Логвинова А.М., Зедгенизов Д.А., Соболев Н.В. Пироксенитовый парагенезис многочисленных минеральных и вероятных флюидных включений в микроалмазе из кимберлитовой трубки Мир, Якутия // Докл. АН СССР. — 2001. — 380. — С. 363—367.
8. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. — М. : Наука, 1984. — 222 с.
9. Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С. и др. Особенности состава облакоподобных микровключений в октаэдрических алмазах из кимберлитовой трубки Интернациональная (Якутия) // Геология и геофизика. — 2011. — 52, № 1. — С. 107—121.
10. Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. — Новосибирск : Наука, 1974. — 263 с.
11. Соболев Н.В. Парагенезисы алмазов и проблема глубинного минералообразования // Зап. Всесоюз. минерал. об-ва. — 1983. — Ч. 112, вып. 4. — С. 389—397.
12. 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. — 50, № 12. — С. 1588—1606.
13. Anand M., Taylor L.A., Misra K.C. et al. Nature of diamonds in Yakutian eclogites : views from eclogite tomography and mineral inclusions in diamond // Lithos. — 2004. — 77. — P. 333—348.
14. Boyd F.R., Gurney J.J. Diamonds and the African lithosphere // Science. — 1986. — 232. — P. 472—477.
15. Bulanova G.P. The formation of diamond // J. Geochim. Explor. — 1995. — 53. — P. 1—23.
16. Guthrie G.D., Veblen D.R., Navon O., Rossman G.R. Submicrometer fluid inclusions in turbid-diamond coats // Earth. and Planet. Sci. Lett. — 1991. — 105 (1—3). — P. 1—12.
17. Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O. Brine inclusions in diamonds : a new upper mantle fluid // Ibid. — 2001. — 187. — P. 323—332.
18. Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O. Fluid and mineral inclusions in cloudy diamonds from Koffifontein, South African // Geochim. et cosmochim. acta. — 2004. — 68 (11). — P. 2561—2575.
19. Jambon A., Deruelle B., Dreibus G., Pineau F. Chlorine and bromine abundance in MORB : the contrasting behavior of Mid Atlantic Ridge and East Pacific Rise and implications for chlorine geodynamic cycle // Chem. Geol. — 1995. — 126. — P. 101—117.
20. Harris J.W. Diamond geology // The Properties of Natural and Synthetic Diamonds / Ed. J.E. Field. — London : Acad. Press, 1992. — P. 345—393.
21. Klein-BenDavid O., Izraeli E., Hauri E., Navon O. Mantle fluid evolution — a tale of one diamond // Lithos. — 2004. — 77. — P. 243—253.
22. Klein-BenDavid O., Logvinova A.M., Schrauder M. et al. High-Mg carbonatitic microinclusions in some Yakutian diamonds — a new type of diamond-forming fluid // Ibid. — 2009. — 112, suppl. 2. — P. 648—659.
23. Klein-BenDavid O., Wirth R., Navon O. TEM imaging and analysis of microinclusions in diamonds : a close look at diamond-growing fluids // Amer. Miner. — 2006. — 91. — P. 353—365.
24. Lang A.R., Walmsley J.C. Apatite inclusions in natural diamond coat // Phys. and Chem. Miner. — 1983. — 9. — P. 6—8.
25. Litvin Y.A. High-pressure mineralogy of diamond genesis // Geol. Soc. Amer. Spec. Pap. — 2007. — P. 83—103.
26. Logvinova A.M., Taylor L.A., Floss C., Sobolev N.V. Geochemistry of multiple diamond inclusions of harzburgitic garnets as examined in situ // Intern. Geol. Rev. — 2005. — 47. — P. 1223—1233.
27. Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V. Nanometer-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds : new insights on diamond formation // Eur. J. Miner. — 2008. — 20. — P. 317—331. — (Spec. Issue on Diamonds).
28. Logvinova A.M., Wirth R., Sobolev N.V. Black cluster and cloudy nano-inclusions in the core of Yakutian diamonds : TEM investigation // 9th Intern. Kimberlite Conf. : Extended Abstr. — 2008. — 9IKC-A-00380.
29. Meyer H.O.A. Chrome pyrope : an inclusion in natural diamond // Science. — 1968. — 160. — C. 1446—1447.
30. Meyer H.O.A. Inclusions in diamonds // Mantle xenoliths : Chichester / Ed. P.H. Nixon. — John Wiley and Sons, 1987. — P. 501—522.
31. Meyer H.O.A., Boyd F.R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // Geochim. et cosmochim. acta. — 1972. — 36. — P. 1255—1273.
32. Navon O. Formation of diamonds in the Earth's mantle // Proc. of the 7<sup>th</sup> Intern. Kimberlite Conf. : Red Roof Designs / Eds J. Gurney, S. Richardson, D. Bell. — Cape Town, 1999. — P. 584—604.
33. Navon O., Hutcheon I.D., Rossman G.R., Wasserburg G.J. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions // Nature. — 1988. — 335. — P. 784—789.

34. *Palyanov Y.N., Shatsky V.S., Sobolev N.V., Sokol A.G.* The role of mantle ultrapotassic fluids in diamond formation // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* — 2007. — **104**, No 22. — P. 9122–9127.
35. *Prinz M., Manson O.V., Hlava P.F., Keil K.* Inclusions in diamonds : garnet lherzolite and eclogite assemblages // *Phys. and Chem. Earth.* — 1975. — **9**. — P. 797–815.
36. *Richardson S.H., Gurney J.J., Erlank A.J., Harris J.W.* Origin of diamonds in old enriched mantle // *Nature.* — 1984. — **310**. — P. 198–202.
37. *Safonov O.G., Perchuk L.L., Litvin Yu.A.* Melting relations in the chloride-carbonate-silicate systems at high pressure and the model for formation of alkalic diamond-forming liquids in the upper mantle // *Earth and Planet. Sci. Lett.* — 2007. — **253**. — P. 112–128.
38. *Schrauder M., Navon O.* Hydrous and carbonatitic mantle fluids in fibrous diamonds from Jwaneng, Botswana // *Geochim. et cosmochim. acta.* — 1994. — **58**. — P. 761–771.
39. *Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J. et al.* Diamonds and the geology of mantle carbon // *Revs Mineral. and Geochem.* — 2013. — **75**. — P. 355–421.
40. *Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A. et al.* Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from Yakutian kimberlites : a comparative study / *Lithos.* — 2004. — **77**. — P. 225–242.
41. *Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A. et al.* Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Ibid.* — 2009. — **112**, suppl. 2. — P. 701–713.
42. *Sobolev N.V., Yefimova E.S., Channer D.M. et al.* Unusual upper mantle beneath Guianiano Guyana Shield, Venezuela : evidence from diamond inclusions // *Geology.* — 1988. — **26**. — P. 971–974.
43. *Sobolev N.V., Yefimova E.S., Koptil V.I.* Mineral inclusions in diamonds in the Northeast of the Yakutian diamondiferous province // *Proc. VII Intern. Kimberlite Conf.* / Eds J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson. — Cape Town, 1999. — **2**. — P. 816–822.
44. *Stachel T., Harris J.W.* The origin of cratonic diamonds — constraints from mineral inclusions // *Ore Geol. Rev.* — 2008. — **34**. — P. 5–32.
45. *Taylor L.A., Keller R.A., Snyder G.A. et al.* Diamonds and their mineral inclusions and what they tell us : A detailed "pull-apart" of a diamondiferous eclogite // *Intern. Geol. Rev.* — 2000. — **42**. — P. 959–983.
46. *Wyllie P.J., Ryabchikov I.D.* Volatile components, magmas, and critical fluids in upwelling mantle // *J. Petrol.* — 2000. — **41**. — P. 1195–1206.
47. *Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Sobolev N.V.* Carbonatitic melts in cuboid diamonds from Udachnaya kimberlite pipe (Yakutia) : evidence from vibrational spectroscopy // *Miner. Mag.* — 2004. — **68**. — P. 61–73.

Поступила 17.04.2013

*А.М. Логвінова, Д.О. Зедгенізов, М.В. Соболев*

#### ГЕНЕТИЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МІНЕРАЛЬНИХ І КРИСТАЛОФЛЮЇДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ У АЛМАЗАХ

Проведено порівняльний аналіз мінеральних і кристалофлюїдних включень у алмазах на прикладі трубки Інтернаціональна Мало-Ботубінського району Якутської алмазонасної провінції. Показано, що мінеральні включення захоплюються на певних стадіях зростання алмазу-матриці й утворюються внаслідок взаємодії насиченого леткими компонентами карбонатвмісного розплаву з силікатними материнськими породами (протолітом). Кристалофлюїдні включення, локалізовані в центральній частині алмазу-матриці, є поліфазними нанорозмірними утвореннями, більшість фаз яких або не траплялися у вигляді індивідуальних включень у алмазі (апатит, клиногуміт), або зафіксовані в поодиноких випадках (карбонати, флогопіт, периклаз). Такі включення є дочірніми фазами алмазогенерувального розплаву/флюїду і якнайповніше характеризують його склад.

*A.M. Logvinova, D.A. Zedgenizov, N.V. Sobolev*

#### GENETIC INTERPRETATION OF MINERAL AND CRYSTAL-FLUID INCLUSIONS IN DIAMONDS

A comparative analysis of the mineral and crystal-fluid inclusions in diamonds from the kimberlite pipe Internatsionalnaya (Yakutia) revealed differences between them. It is shown that mineral inclusions are trapped at certain stages of the diamond-host growth. They are formed as a result of interaction of volatile carbonate-bearing rocks with silicate parent rocks (protolith). Typically, mineral inclusions are monomineral and homogeneous. About 80 % of all investigated mineral inclusions in diamonds from the pipe Internatsionalnaya belong to peridotite paragenesis, which confirms the general pattern for the Yakutian kimberlites. The nano-dimensional crystal-fluid inclusions are located in the center of the diamond-host and are composed of multiphase assemblages, which include solid phases (silicates, oxides, carbonates), halides and fluid bubbles, most of which do not occur as individual inclusions in diamond (apatite, clinohumite) or marked in a few cases (carbonates, phlogopite, periclase). They most completely characterize the composition of diamond-forming substrate. The obtained results on composition of mineral and crystal-fluid inclusions in diamonds testify to the significant role of deep metasomatic processes with the involvement of incompatible elements in diamond formation.