

УДК 549.211:543.42 (470.11)

Г.Ю. Криулина<sup>1</sup>, В.К. Гаранин<sup>2</sup>, Е.А. Васильев<sup>3</sup>, В.О. Кязимов<sup>4</sup>, О.П. Матвеева<sup>5</sup>,  
П.В. Иванников<sup>6</sup>

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О СТРОЕНИИ КРИСТАЛЛОВ АЛМАЗА КУБИЧЕСКОГО ГАБИТУСА ИЗ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА<sup>7</sup>

Приведены данные исследования алмаза кубического габитуса из Архангельской алмазоносной провинции. Показано, что визуально схожие по внешней морфологии и цвету кубические кристаллы алмаза отличаются по внутреннему строению, дефектно-примесному составу и генезису.

*Ключевые слова:* алмаз, кубический габитус, месторождение им. М.В. Ломоносова, спектральный тип.

In this work the study of diamond cubic habit from the Arkhangelsk diamond province. It was shown that visually similar cubic diamond crystals on the external morphology and color are completely different in their internal structure, the defect-impurity composition and genesis.

*Key words:* diamond, structural type, cubic habit, M.V. Lomonosov diamonds deposit.

**Введение.** Месторождение им. М.В. Ломоносова локализовано в пределах Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции (ААП), расположенной на севере европейской части России. Месторождение состоит из 6 кимберлитовых трубок, сложенных кимберлитами II типа [Гаранин, 2001]. В настоящее время производится промышленная разработка трубки Архангельская. Широкое распространение алмазов кубического габитуса в кимберлитовых трубках — типоморфная особенность месторождения им. М.В. Ломоносова [Кудрявцева и др., 2005]. Нами исследованы кристаллы из промышленной пробы трубки Архангельская, а ранее изучены алмазы с близкими характеристиками из трубки им. Карпинского-1.

Отметим, что кристаллы кубического габитуса на месторождении им. М.В. Ломоносова весьма разнообразны. Неординарность этих алмазов очевидна — уже при первичном минералогическом описании невозможно отнести многие из них к одной из разновидностей, выделенных Ю.Л. Орловым в минералогической классификации [Орлов, 1984]. Им описаны три разновидности, в которых габитус кристаллов мог быть кубическим: II (визуально одно-

родные прозрачные желтые кубические кристаллы с волокнистым строением), III (просвечивающие серые кристаллы с зонально-секториальным внутренним строением) и IV (кристаллы с прозрачным бесцветным октаэдрическим ядром, образованным при послойном росте, и непрозрачной волокнистой оболочкой, формирующейся при развитии кристаллов кубического габитуса). Однако на всех кимберлитовых месторождениях доминируют (80–98%) алмазы I разновидности, форма роста которых — октаэдр, они встречаются в природе в виде октаэдрических, комбинационных и додекаэдрических кристаллов.

В статье представлены результаты изучения внутреннего строения выделенных нами групп алмаза, при этом кристаллы образуют переходные ряды от одной группы к другой (либо по цветовым, либо по морфологическим характеристикам), наиболее контрастные различия наблюдаются в конечных членах этих рядов.

**Материалы и методы исследования.** Для исследования отобраны прозрачные, визуально однородные желтые, оранжево-коричневые кристаллы кубического габитуса с разной интенсивностью окраски и с ровными или седловидными гранями, а также

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, науч. с.; e-mail: galinadiamond@gmail.com

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, вед. науч. с., профессор, докт. геол.-минер. н.; e-mail: vgaranin@mail.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, вед. инженер; e-mail: msudiamond@gmail.com

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный горный институт (Технический университет) имени Г.В. Плеханова, кафедра ГРМПИ, вед. инженер; e-mail: simphy12@mail.ru

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный горный институт (Технический университет) имени Г.В. Плеханова, кафедра ГРМПИ, вед. инженер.

<sup>6</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физической электроники, науч. с., канд. геол.-минер. н.; e-mail: petr@ccl.msu.su

<sup>7</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 гг.» (госконтракт № 16.518.11.7101 от 27 октября 2011 г.).

комбинационные кристаллы с гранями куба и тетрагексаэдроиды. По принятой в России минералогической классификации Орлова [1984] они относятся к II разновидности. Масса кристаллов 0,04–0,4 ст. Чтобы раскрыть их внутреннее строение, алмазы подшлифовывали параллельно плоскости (100) примерно на половину объема.

Дефектно-примесный состав кристаллов исследован по профилю кристаллов (центральная часть и периферия) методом инфракрасной спектроскопии (ИКС). Регистрацию спектров проводили на фурье-спектрометре VERTEX-70 фирмы «Bruker» с микроскопом «Nuregion-1000». Спектры регистрировали со спектральным разрешением 4 и 1 см<sup>-1</sup>. Концентрацию дефектов пересчитывали в соответствии с данными работ [Boyd et al., 1994, 1995]. Относительная погрешность определения значений коэффициента поглощения дефектов А и В составляла до 10% в зависимости от формы, толщины, наличия включений; относительная погрешность определения общей концентрации азота и степени агрегации — до 20%. Определяли концентрацию дефектов азота А (1282 см<sup>-1</sup>), В (1175 см<sup>-1</sup>), С (1135 см<sup>-1</sup>). Относительное содержание плейтелетс (Р) и водородных центров (Н) в алмазах оценивается по значениям коэффициента поглощения полос на 1370–1362 и 3107 см<sup>-1</sup> соответственно.

Исследования методом фотолюминесценции проведены на спектрофлуориметре «Fluorolog FL3» (фирма «Horiba») при комнатной температуре и температуре жидкого азота (77 К). Спектральный диапазон прибора составляет 200–1000 нм. Регистрацию спектров люминесценции, возбуждения люминесценции и кинетики затухания осуществляли при возбуждении светом ксеноновой лампы в области длины волн 250–600 нм с шириной линии возбуждения 5 нм. Практически для всех алмазов голубая люминесценция проявляется в диапазоне 415–470 нм, она связана с N3-центром (дефект структуры (N<sub>C</sub>)<sub>3</sub>V<sub>C</sub>). В ряде случаев линия 415 нм не проявлена.

Картины катодолюминесцентного свечения (CCL) алмазов получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) «Stereoscan МК-ПА» (Россия), оснащенного приставкой для получения катодолюминесцентных изображений в реальной окраске и фоторегистрирующей приставкой. Изучено внутреннее строение кристаллов алмаза, маркируемое основными ростовыми и примесными дефектами — центрами люминесценции данного вида.

Изотопный состав углерода изучали на аналитическом комплексе, включающем элементный анализатор «Flash EA 1112», соединенный с масс-спектрометром «Delta V Advantage» (исследования выполнены под руководством докт. геол.-минер. н. В.Л. Андреичева, Институт геологии Коми НЦ УрО РАН). Значения δ<sup>13</sup>C (‰) даны относительно стандарта PDB. Ошибка измерения составляет ±0,2‰ (1σ).

**Результаты исследования и их обсуждение.** По внутреннему строению и дефектно-примесному составу визуально однородные кристаллы кубического габитуса с желтой окраской из месторождения им. М.В. Ломоносова подразделяются на три морфогенетические группы (таблица): первая группа — кубические кристаллы с однородным или зональным строением, с дефектами только в виде одиночных атомов азота (С-центры) и полосами пластической деформации; вторая группа — «классические» кубические кристаллы с однородным внутренним строением или прямолинейной зональностью по кубу с азотными дефектами в А- и С-формах и дополнительными пиками в диапазонах 1374–1354 и 3310–2945 см<sup>-1</sup>; третья группа — «зональные» кубические кристаллы с центральной зоной, образованной по тангенциальному или нормальному механизму роста, характеризуются разным распределением азота (в С-, А- и В-формах). Спектры поглощения некоторых кристаллов из этих групп приведены на рис. 1.

В *первую группу* выделены кубические кристаллы с ровными поверхностями граней или с комбинацией граней тетрагексаэдроиды и куба. Окраска от желтой до оранжево-коричневой. В этих кристаллах установлено высокое содержание азота в форме С-центра (до 275 ат. ppm), А- и В-центры отсутствуют (либо есть С-центр и незначительно проявляются центры А). Группа представлена 5 образцами (кристаллы № 1785-2-5, 1785-2-6, А186, А199, А94). Люминесценция голубая слабая. Спектр содержит систему полос излучения N3 и полосы 350, 396, 570 нм. По преобладанию С-дефекта эти алмазы относятся к II разновидности по классификации Орлова, в то же время для них не типично наличие дефекта N3.

Для алмазов первой группы характерны параллельные полосы, ориентированные параллельно (111), а также красное свечение в CCL, что связано с наличием следов пластической деформации, регистрируемых в спектрах ЭПР (рис. 2) по центрам N2, M2 [Макеев и др., 2011]. Кристаллы имеют однородное волокнистое строение или представляют собой оболочку большой толщины для первичного зародыша кубической или октаэдрической формы. Изотопный состав углерода (δ<sup>13</sup>C) составляет –4,9‰.

Таким образом, можно предположить, что формирование алмазов первой группы происходило в среде, обогащенной глубинным мантийным источником углерода [Галимов, 1984; Галимов и др., 1994] с максимальным пересыщением и наивысшим температурным градиентом. Наличие парамагнитного азота (С-центр) свидетельствует об отсутствии воздействия высокотемпературных мантийных процессов. Слабопроявленные дефекты M2 позволяют предположить влияние эпигенетических деформационных процессов при пониженных значениях температуры [Минева и др., 2009].

Ко *второй группе* относятся прозрачные, желтые с разной интенсивностью окраски алмазы кубиче-

Группа кристалла	№ кристалла	Фото кристалла	Фото ЦКЛ	Внутреннее строение	Зона кристалла	Данные ИКС, ат. ppm					Физическая характеристика	$\delta^{13}C, \text{‰}$	Данные ФЛС	
						$N_c, \text{ppm}$	$N_x, \text{at.ppm}$	$N_y, \text{at.ppm}$	$R, \text{cm}^{-1}$	$RzR, \text{cm}^{-1}$			$H, \text{cm}^{-1}$	Основные пики
I	A94, A1791, 1785-2-6			Однородное с пологими пластинчатой деформации	Весь объем	178	0	0	0	-	0	-4,9	N3	350, 396, 570
						Нет данных					lb	-4,9	N3, S3	
						275	0	0	0	-		1		-4,9
II	1786-2-26-2; 1787-3-4; A19			Однородное	Центр	80	860	0	-	-	1,6	-4,1	N3, H3	512, 503-570
						87	726	0	-	-	2,0	-4,4		
						0	1100	497	5	1378	4/27	-9,8	IaA+B	N3, H3 S3
		0	785	265	5	1378	4/19	-8,4						
III	A2; 1786-27			Кубическое	Центр	0	754	212	4,7	1368	1,3	-5,4	N3	482, 517
						0	1000	0	-	-	1,5	-5,4		
						0	950	130	0,6	1362	3	-7,1	IaA+B	N3
		65	1200	221	-	-	2,2	-5,3						
A141	A141			Многратная зональность	Центр	0	784	265	4	1378	1	-8,4	N3	430, 517, 522
						63	1350	225	1	1362	2	-7,1		

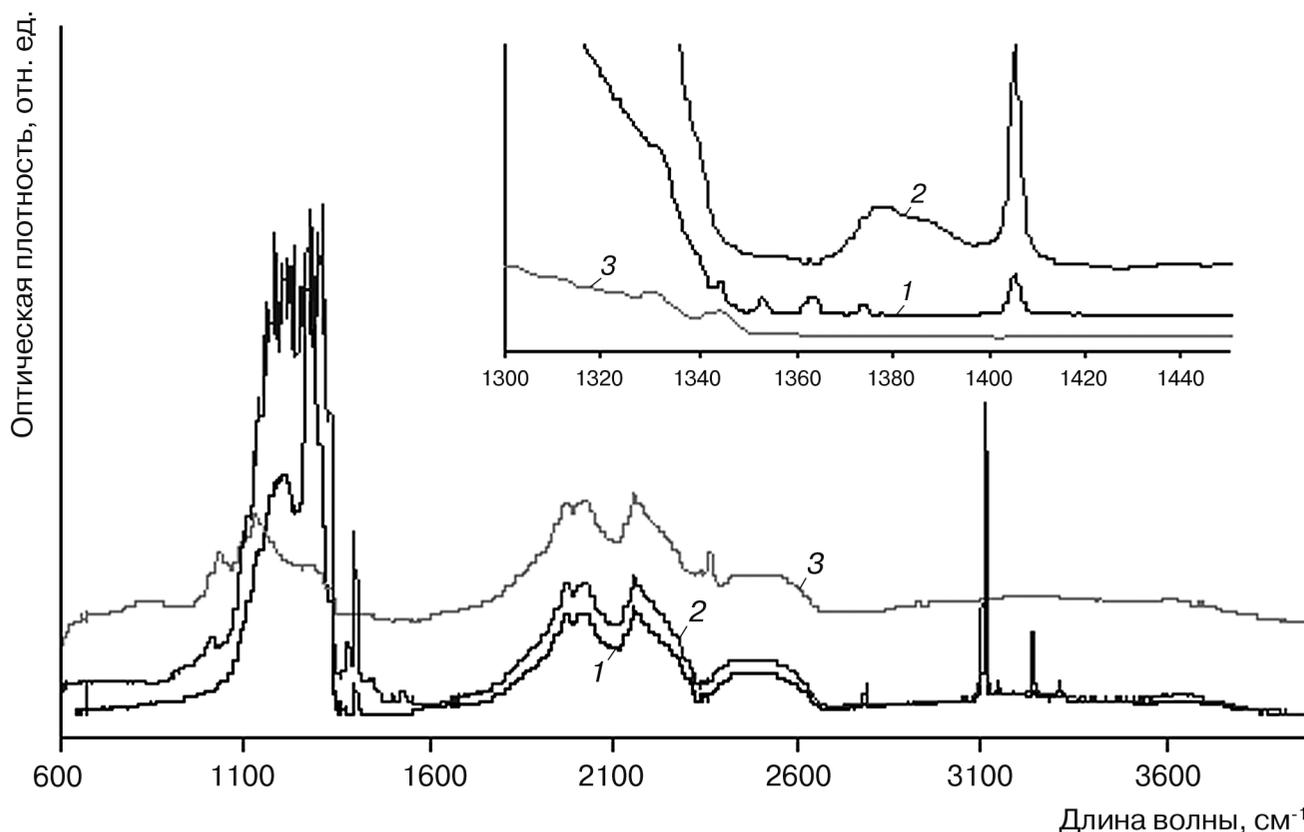


Рис. 1. Спектры оптической плотности кристаллов алмаза с С-дефектами (образец № А94, разрешение  $4 \text{ см}^{-1}$ ), с дефектами А и С (образец № 1786-26-1, разрешение  $1 \text{ см}^{-1}$ ), с А-, В- и Р-дефектами (образец № А26, разрешение  $1 \text{ см}^{-1}$ ). На вставке увеличен диапазон  $1300\text{--}1440 \text{ см}^{-1}$

ского габитуса с седловидными гранями (с крупными глубокими отрицательными тетрагональными ступенчатыми пирамидами), реже с дополнительными поверхностями тетрагексаэдроида (кристаллы № А19, 1786-26-1, 1787-3-4). Кристаллы обладают синим свечением в лучах ССL, характеризуются фибриллярным однородным внутренним строением. Фотолюминесцентное свечение ярко-голубое, обусловленное наличием N3-дефекта ( $415 \text{ нм}$ ) и слабым проявлением N3-дефекта в области  $503\text{--}570 \text{ нм}$ . Для них характерно среднее содержание азотных дефектов в А- и С-форме ( $300 < N_{\text{tot}} < 1000 \text{ ат. ppm}$ ), при этом значительно доминирует азот в форме А-, центры В и Р отсутствуют. Это типичные алмазы II разновидности по классификации Орлова.

Кроме известных систем поглощения А-, В-, Р- ( $3107 \text{ см}^{-1}$ ) в спектрах поглощения кубических кристаллов без системы Р-центров проявляются пока малоисследованные полосы на частотах  $1353, 1363, 1374 \text{ см}^{-1}$ , причем полоса  $1363 \text{ см}^{-1}$  иногда встречается индивидуально. Пример спектра с этими полосами приведен на рис. 1. Полоса  $1363 \text{ см}^{-1}$  не идентична полосе Р, так как имеет меньшую ширину; кроме того, система Р-центров при малых значениях коэффициента поглощения находится в диапазоне  $1380\text{--}1370 \text{ см}^{-1}$ . (Природу этих полос поглощения необходимо исследовать в дальнейшем.) В спектрах некоторых кубических кристаллов желтого цвета регистрируется набор узких полос на частотах

$3310, 3188, 3144 \text{ и } 2945 \text{ см}^{-1}$ . Типичный спектр поглощения с указанными дополнительными пиками, а также спектр поглощения с распространенной системой  $3107 \text{ см}^{-1}$  приведены на рис. 3. Наличие этих полос поглощения делает уникальным спектр ИК-поглощения изученных алмазов и позволяет идентифицировать кристаллы из месторождения им. М.В. Ломоносова. В литературе [Бескрованов, 2000; Орлов, 1984; Природные алмазы России, 1986] есть информация о дополнительных пиках, выделяемых исследователями в алмазах кубического габитуса из трубок Якутии, при этом выявленные нами пики остаются уникальными.

Алмазы второй группы имеют самый тяжелый изотопный состав углерода ( $\delta^{13}\text{C}$  центр/край =  $-(4,1\div 4,4)\%$ , эти значения соответствуют таковым у алмазов ультраосновного парагенезиса [Галимов, 1984]. Поэтому для алмазов второй группы можно предположить наиболее глубинный мантийный источник углерода. Высокая концентрация тяжелого изотопа углерода ( $^{13}\text{C}$ ) и азота в среде алмазообразования способствовала значительному пересыщению углеродом [Синтез минералов, 2000] и формированию волокнистых кристаллов, а кратковременный посткристаллизационный отжиг обусловил переход некоторой доли азотных дефектов из С- в А-форму.

**Третья группа** кристаллов алмаза характеризуется, по-видимому, наиболее длительной мантийной эволюцией. Такие кубические кристаллы имеют

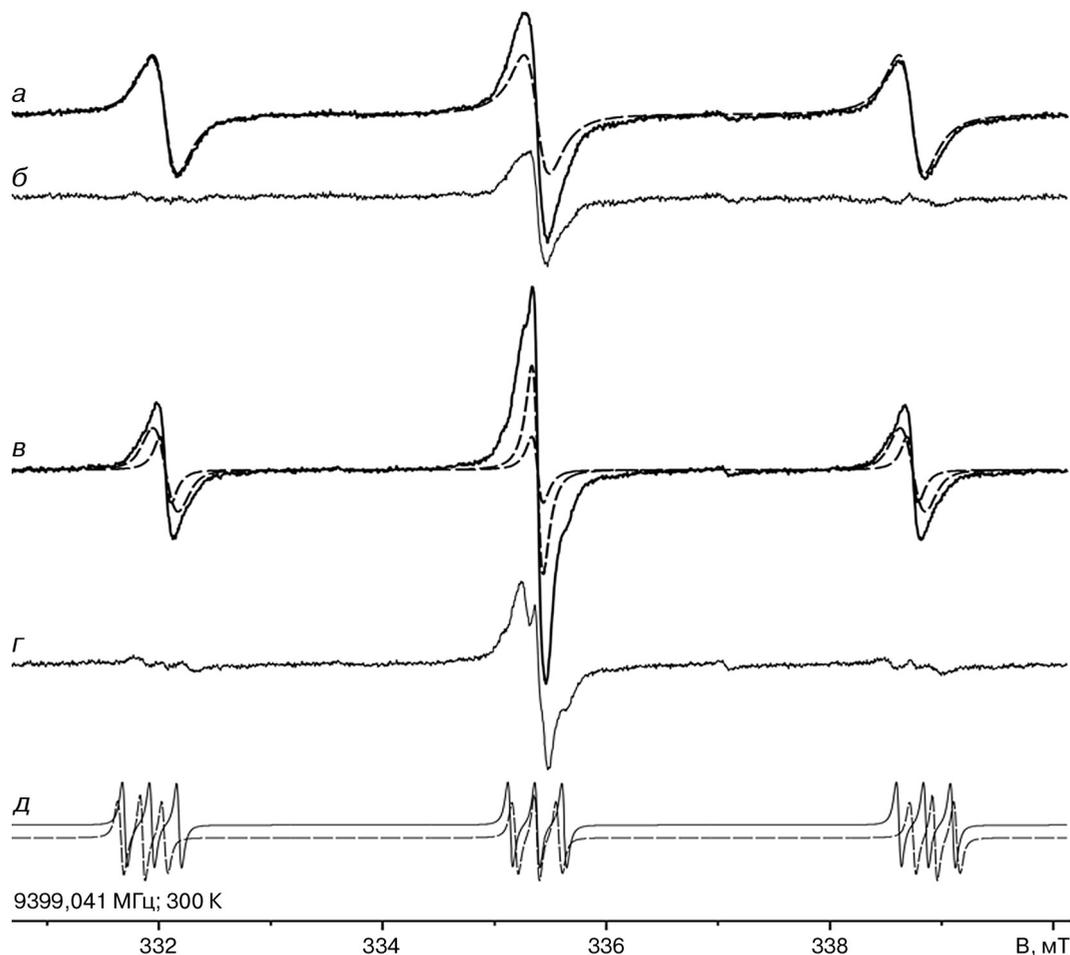


Рис. 2. Модельные компоненты (пунктирные линии на *a* и *в* спектров ЭПР) при  $V\parallel[001]$  пластически деформированных образцах алмаза № A199 и A94 (*a*, *б*), A186 (*в*, *д*); *д* — остаточные спектры после удаления сигнала P1-центров. Сплошные линии — экспериментальные спектры, пунктир — рассчитанные спектры P1-центров, по [Макеев и др., 2011].

Для сравнения приведены рассчитанные для ориентации  $V\parallel[001]$  спектры ЭПР M2-центров (сплошная линия) и M3-центров (пунктир) пластически деформированных алмазов, по [Mineeva et al., 2007]

желтую, желто-коричневую окраску, прозрачны или полупрозрачны, ядро определяется только с помощью ССЛ по разной интенсивности синего (от голубого до темно-синего) свечения. Характерно сложное зональное строение кристаллов. В центральной зоне присутствует ядро октаэдрической или кубической формы, в котором есть азотные дефекты в форме А-, В-центров. Внешние зоны этих кристаллов (оболочка) сформированы при нормальном или смешанном механизме роста. По данным ИКС, все кристаллы третьей группы высокоазотные:  $900 < N_{tot} < 1750$  at. ppm (кристаллы № A26, A29, 1791-5-2, 1786-26-2, 1786-27, 1794-1, 1794-2, A141).

Отмечена следующая закономерность: кристаллы с кубическим зародышем в оболочке содержат только А-дефект, кристаллы с многократной прямолинейной зональностью по кубу в оболочке и ядре имеют дефекты в А- и В-формах; а образцы с октаэдрическим ядром в волокнистой оболочке имеют дефекты в форме А-, В-, С-центров. В ИК-спектрах 1/3 кристаллов третьей группы фиксируется полоса  $1362\text{--}1378\text{ см}^{-1}$ . В некоторых кристаллах зоны с нормальным, тангенциальным и смешанным механизмом

роста повторяются 2–3 раза. На картинах ССЛ видно, что эти кристаллы сложены зонами различной геометрии и имеют затравку (очень мелкое октаэдрическое ядро) с зонально-секториальным строением. В наиболее сложном случае видно многостадийное преобразование формы: мелкое октаэдрическое ядро имеет послойную октаэдрическую зональность; центральная кубическая зона образована при смешанном механизме роста (при одновременном развитии кубических и октаэдрических секторов и постепенном выклинивании последних); затем следует однородное наращивание кристалла по нормальному механизму с постепенным снижением концентрации азота; на следующем (четвертом) этапе происходило резкое выклинивание кубических секторов роста и кристалл приобретал октаэдрическую форму, после чего, видимо, происходил перерыв в алмазообразовании, и на заключительном этапе формирования алмаза образовывалась плотная оболочка с нормальным механизмом роста, которая и придала конечный кубический габитус кристаллу алмазу. Люминесценция очень яркая, с разнообразной окраской. Сложное строение кристаллов отражено и в спектрах фотолю-

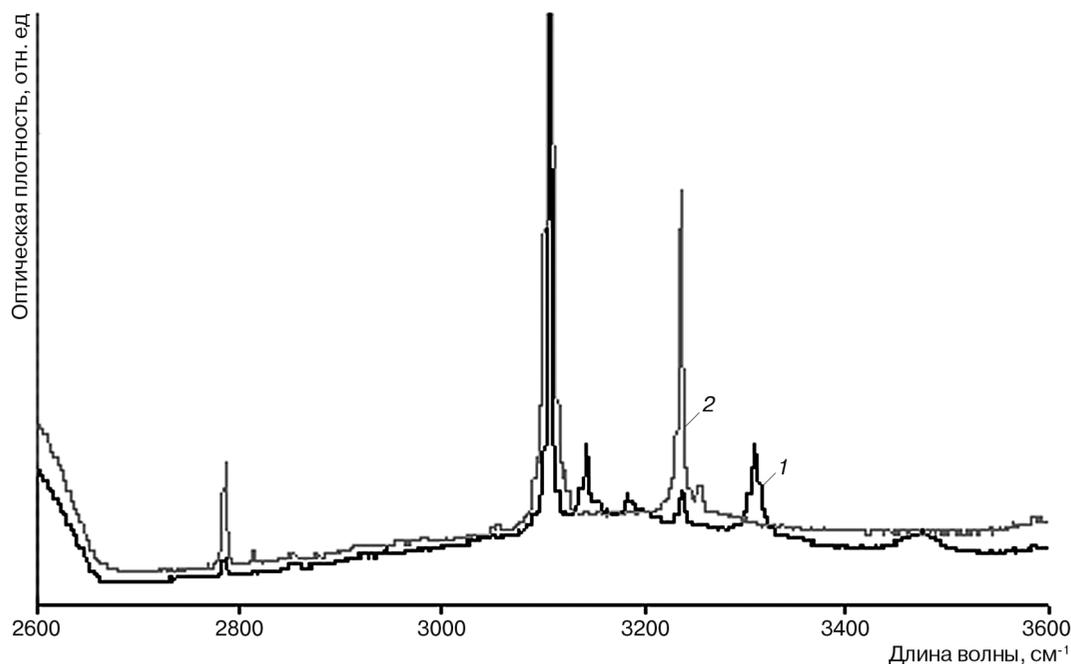


Рис. 3. Спектры оптической плотности кристалла алмаза № 1786-26-1 с набором узких полос в диапазоне колебаний группы CN (1) и обычный спектр поглощения в этом диапазоне (кристалл № A26, разрешение  $1 \text{ см}^{-1}$ ) (2)

минесценции, содержащих помимо основных полос (N3, S3, H3) полосы с максимумами 313, 347, 396, 411, 482, 500, 649, 671 нм. Используя классификацию Орлова, по спектрам ФЛ и ИК эти кристаллы можно отнести к разновидности III, а по наличию ядра — к разновидности IV.

Наиболее легкий состав углерода ( $\delta^{13}\text{C} = -9,8\text{‰}$ ) наблюдается в кубических кристаллах с нормальным механизмом роста и прямолинейной зональностью по кубу в лучах ССЛ. Для зональных кристаллов отмечена тенденция к незначительному утяжелению изотопного состава углерода по направлению к краям —  $\delta^{13}\text{C}(\text{центр/край}) = -(7,1 \div 5,4)$  и  $-(9,8 \div 8,4)\text{‰}$ . Незначительное увеличение содержания изотопа  $^{12}\text{C}$  в кристаллах третьей группы с А- и В-формами азотных дефектов свидетельствует о том, что они образовались из источника углерода, состав которого был близок к «промежуточному типу» [Галимов и др., 1984], и на относительно более ранней стадии алмазообразования с последующим непродолжительным отжигом, что способствовало агрегации азотных дефектов в А- и В-формы и проявлению дефектов S3 в спектрах фотолюминесценции. По наличию А- и В-центров и высокой концентрации азота в форме А эти кристаллы по условиям роста можно поместить между октаэдрическими, додекаэдрическими алмазами I разновидности и кубическими, описанными выше в первой и второй группах.

**Заключение.** Рассмотренные группы алмаза имеют черты сходства и различия с кристаллами кубического габитуса из коренных и россыпных месторождений Якутии. В Якутской алмазоносной провинции алмазы кубического габитуса эндемичны для коренных тел [Афанасьев и др., 2011], отсутствуют в трубках

Малоботуобинского, Среднемархинского алмазоносных районов, в небольшом количестве (менее 3%) установлены в телах Далдыно-Алакитского района (трубки Удачная, Юбилейная, Комсомольская) и типоморфны для россыпей на северо-востоке Сибирской платформы. Наиболее изучены ювелирные алмазы, распространенные в россыпях Анабарского района и обладающие насыщенной оранжево-желтой, оранжево-коричневой окраской, обусловленной присутствием в них азота только в форме С-центра [Орлов, 1984; Якубова, 1981; Зинчук, Коптиль, 2003; Serov, Shelementiev, 2008].

По данным Н.Н. Зинчука и В.И. Коптиля [2003], они характеризуются легким изотопным составом углерода (от  $-9,9$  до  $-16,8\text{‰}$ ), что значительно отличается от кристаллов кубического габитуса из месторождения им. М.В. Ломоносова, где они обогащены тяжелым углеродом ( $-4,9 < \delta^{13}\text{C} < -5,4\text{‰}$ ). Согласно данным [Галимов, 1984; Галимов и др., 1994], это формы глубинного углерода, вынесенного в процессе дегазации мантии в земную кору. Указанные различия свидетельствуют о региональном типоморфизме алмазов кубического габитуса и наличии в двух регионах разных источников углерода, из которого происходило формирование кристаллов на последних этапах алмазообразования. Изотопный состав углерода ( $-4,1 < \delta^{13}\text{C} < -9,8\text{‰}$ ) наиболее типичен для алмаза ультраосновного парагенезиса I разновидности по классификации Орлова [Орлов, 1984; Зинчук, Коптиль, 2003]. В кимберлитовых трубках Якутии среди крупных кристаллов единичны находки серых и бесцветных кубических кристаллов III разновидности, сходных по изотопному составу ( $-7 < \delta^{13}\text{C} < -10\text{‰}$ ), но с другими морфологией по-

верхности и оптико-спектрометрическими характеристиками.

Формирование внешне однотипных кубических кристаллов в трубке Архангельская свидетельствует о сильном пересыщении углеродом на последних этапах кристаллизации алмазного вещества. Широкое разнообразие форм внутреннего строения кристаллов алмаза позволяет предположить сложную и многоэтапную историю их кристаллизации в условиях многократно изменяющегося химизма среды. Резкая смена механизмов роста, изменение концентрации дефектов и их трансформация (образование В- и Р-центров) свидетельствуют о дискретности алмазо-

образования, возможности длительных перерывов и непродолжительном отжиге этих кристаллов [Taylor, Milledge, 1995]. Незначительные вариации изотопного состава углерода для трех выделенных нами групп кубических кристаллов из месторождения им. М.В. Ломоносова, по-видимому, связаны с фракционированием углерода в алмазообразующей среде.

Результаты исследования подтверждают, что сложнзональные и пластически деформированные кубические кристаллы из месторождения им. М.В. Ломоносова уникальны среди алмазов из кимберлитовых тел, такие индивиды не описаны среди алмазов из разрабатываемых трубок и россыпей России.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П.* и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2011. № 3. С. 335–353.
- Бескрованов В.В.* Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, 2000. 264 с.
- Галимов Э.М.* Вариации изотопного состава алмазов и связь их с условиями алмазообразования // Геохимия. 1984. № 8. С. 1091–1117.
- Галимов Э.М., Захарченко О.Д., Мальцев К.А., Махин А.И.* Изотопный состав углерода алмазов из кимберлитовых трубок Архангельской области // Геохимия. 1994. № 1. С. 74–76.
- Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В.* и др. Два типа алмазоносных кимберлитов в Архангельской провинции // Изв. вузов. Геология и разведка. 2001. № 4. С. 36–49.
- Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: Недра, 2003. 603 с.
- Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Вержак В.В.* и др. Атлас «Морфогенез алмаза и его минералов-спутников из кимберлитов и родственных им пород Архангельской алмазоносной провинции». М.: Полярный круг, 2005. 624 с.
- Макеев А.Б., Криулина Г.Ю., Лютюев О.О., Иванников П.В.* Особенности кубоидов алмаза из трубки Архангельской // Вестн. Ин-та геологии Коми НЦ УрО РАН. 2011. № 3. С. 2–6.
- Минеева Р.М., Титков С.В., Сперанский А.В.* Структурные дефекты в природных пластически деформированных алмазах по данным ЭПР-спектроскопии // Геология руд месторождений. 2009. Т. 51, № 3. С. 261–271.
- Орлов Ю.Л.* Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 263 с.
- Природные алмазы России / Под ред. В.Б. Кваскова. М.: Полярон, 1997. 303 с.
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.* The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag. B. 1994. Vol. 69. P. 1149–1153.
- Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S.* Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Phil. Mag. B. 1995. Vol. 72. P. 351–361.
- Mineeva R.M., Speransky A.V., Titkov S.V., Zudin N.G.* The deformation creation of paramagnetic defects at plastic deformation of natural diamonds // Phys. Chem. Minerals. 2007. Vol. 34. P. 53–58.
- Serov R., Shelementiev Yu.* Colored diamond from Anabar alluvial deposits, Western Yakutia. Classification on the base of spectroscopic features and colorimetric data // Intern. Kimberlite Conf. Extended Abstr. 2008. URL: [http://www.cosis.net/members/meetings/sessions/poster\\_programme](http://www.cosis.net/members/meetings/sessions/poster_programme), 9IKC-A-00251
- Taylor W.R., Milledge H.J.* Nitrogen aggregation character, thermal history and stable isotope composition of some xenolith-derived diamonds from Roberts Victor and Finch // Sixth Intern. Kimberlite Conf. Extended Abstr. Novosibirsk, August 1995. P. 620–622.

Поступила в редакцию  
02.12.2011