

УДК 549.211

Г.К. Хачатрян, М.Б. Копчиков, В.К. Гаранин, М.В. Чукичев, Н.Н. Головин

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О ТИПОМОРФИЗМЕ АЛМАЗА ИЗ РОССЫПЕЙ СЕВЕРНОГО ТИМАНА

Исследованы кристалломорфологические и спектрально-оптические (ИК-спектроскопия и катодная люминесценция) свойства алмаза из аллювия рек Северного Тимана. Выявлена корреляция с внешними характеристиками кристаллов — крупностью, степенью механического повреждения и содержанием в них оптически активных центров. Установлено, что по габитусу и распределению структурных дефектов изученные кристаллы сходны с алмазом из месторождений Архангельской алмазоносной провинции, а также с алмазом из россыпей Северного Урала. На основе полученных данных обсуждаются вопросы генезиса и возможные коренные источники кристаллов алмаза из россыпей Северного Тимана.

*Ключевые слова:* алмаз, кристалломорфология, ИК-спектроскопия, структурные дефекты, азотные центры, катодная люминесценция, россыпи, коренные источники, кимберлитовые трубки.

Morphological and spectral optical properties of diamond crystals from alluvial deposits of North Timan's rivers were studied with IR-spectroscopy and cathode luminescence methods. There is a relationship between the external features of diamonds (size and degree of mechanical damage) and the content of optically active centers in them. The habitus and the type of distribution of structural defects in examined diamond crystals are comparable with diamonds from Arkhangelsk Region and North Timan's placers. In basis on obtained data, the genesis questions and probable primary sources of diamond crystals from North Timan placers are discussed.

*Key words:* diamond, crystal morphology, IR-spectroscopy, structural defects, nitrogen centers, cathode luminescence, placers, primary sources, kimberlite pipes.

**Введение.** По мере истощения крупных коренных месторождений и при высоком спросе на алмазное сырье рентабельными становятся россыпи, даже те, которые считались забалансовыми. Многие вопросы, связанные с источниками алмазов в россыпях, недостаточно изучены или являются объектом дискуссий.

В результате поисковых работ, проводившихся с 50-х по 90-е гг. XX в., алмазы на Тимане встречены в аллювии современных рек, прибрежно-морских отложениях, а также в палеороссыпях среднепалеозойского возраста [Макеев и др., 1999]. Коренные источники алмаза упомянутых россыпных проявлений до настоящего времени не выявлены.

Алмазы в россыпях присутствуют от Северного Тимана до его сочленения с Уралом. Большинство из найденных (свыше 300 кристаллов ювелирного качества) обнаружены на Среднем Тимане на золото-алмаз-редкометальном месторождении Ичетью. К настоящему времени минералогия алмаза Среднего Тимана изучена более полно и детально [Захарченко и др., 1993, 2006; Коптиль, Зинчук, 2001] по сравнению с алмазом с Северного и Южного Тимана.

Опубликованные в разное время данные по свойствам алмаза Северного Тимана немногочисленны — в общей сложности было изучено

около 30 кристаллов разных классов крупности от  $-1+0,5$  до  $-4+2$  мм [Клюев и др., 1974, 1979; Бовкун и др., 1996]. На Северном Тимане найдены преимущественно мелкие кристаллы массой  $\leq 0,05$  кар., доля которых составляет около 65% от общего количества. По габитусу алмаз Северного Тимана близок к кристаллам Среднего Тимана и характеризуется преобладанием округлых ромбододекаэдров — додекаэдроидов (68,9% от общего количества) над кристаллами октаэдрической и переходной от октаэдра к додекаэдроиду формы, составляющими в сумме 29% изученной выборки. Согласно немногочисленным данным [Клюев и др., 1974, 1979], намечается различие свойств алмаза разных классов крупности. Так, среди кристаллов размером  $\leq 1$  мм преобладают индивиды октаэдрической формы с пониженным общим содержанием структурной примеси азота (не более 300 at. ppm), представленного в основном парами А-дефектов, замещающих атомы углерода (спектральный тип IaA). В более крупных кристаллах, преимущественно в додекаэдроидах, с общим содержанием азота от 43 до 739 at. ppm, азот присутствует не только в виде пар А-дефектов, но и в форме тетраэдрически сгруппированных атомов — В-дефектов. При этом доля азота в агрегированной форме ( $\%N_B$ ) довольно значительна и составляет от 39 до 100%.

Несмотря на проводившиеся ранее исследования, типоморфизм кристаллов алмаза Северного Тимана изучен недостаточно. К тому же вопрос об их коренных источниках и происхождении остается открытым. В дополнение к предшествующим исследованиям в рамках статьи авторы впервые рассматривают кристалломорфологические и оптико-спектроскопические характеристики 24 кристаллов алмаза из аллювия рек Северного Тимана и обсуждают проблемы их генезиса.

**Объекты и методы исследования.** Исследования проводились на коллекции кристаллов алмаза из аллювия рек Травянки (8 шт.), Белой (8 шт.), Великой (6 шт.) и Лямчина (2 шт.).

Морфология кристаллов изучалась под бинокулярным микроскопом МБС-1 с помощью приставки для фотографирования цифровой камерой «Nikon».

Спектры в инфракрасном диапазоне регистрировались на приборе марки «Nicolette 380» фирмы «Thermo Nicolette» (США) микроскопом «Centaurus» с разрешением  $4 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $600\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$ . Определение концентрации азота в различных формах ( $N_A$ ,  $N_B$ ) осуществлялось по методике, изложенной в работе [Хачатрян, 2003], содержание пластинчатых дефектов (плейтелетс) и водорода оценивалось по коэффициентам поглощения линий около  $1365^{-1}$  и  $3107 \text{ см}^{-1}$  соответственно.

Спектры катодолюминесценции регистрировались в диапазоне  $350\text{--}1100 \text{ нм}$  при комнатной температуре и температуре жидкого азота ( $77 \text{ К}$ ) и записывались на установке «Электронная пушка» со спектрофотометром ДФС-12 на кафедре полупроводников физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Характеристика образцов.** Размеры изученных кристаллов варьируют от  $-1+0,5$  до  $-4+2 \text{ мм}$ , масса — от  $0,01$  до  $0,32 \text{ кар}$ . Основная часть кристаллов относится к классам крупности  $-1+0,5$  и  $-2+1 \text{ мм}$ , причем более половины (54%) составляют кристаллы с массой от  $0,01$  до  $0,05 \text{ кар}$ .

Окраска кристаллов разнообразна — от бесцветных алмазов чистой воды до желтых и темно-коричневых. В коллекции встречен один индивид (образец № 132) с пигментными пятнами зеленого цвета, что характерно для алмазов, подвергшихся воздействию природного радиационного облучения [Zaitsev, 2001].

Морфологические характеристики кристаллов приведены в табл. 1. Кристаллы представлены преимущественно додекаэдроидами (рис. 1, *a*) с ламинарным (рис. 1, *b*) и полицентрическим строением граней (60%). В подчиненном количестве присутствуют тетрагексаэдроиды, кристаллы кубического габитуса (рис. 1, *в*), октаэдры (рис. 1, *г*), комбинационные формы ряда октаэдр—додекаэдроид (ОД) (рис. 1, *д*) и обломки неясной формы (рис. 1, *e*).

На поверхности образцов часто отмечается концентрическая и занозистая штриховка, а также следы пластической деформации в виде серии параллельных

полос, ориентированных в одном или двух направлениях. Весьма типично также наличие каверн, образовавшихся в результате эпигенетического окислительного растворения кристаллов. Около 15% кристаллов имеет достаточно гладкую поверхность ребер и граней (рис. 1, *a*, *д*). Однако при большом увеличении эти грани характеризуются мелкими деталями рельефа в виде бугорков роста.

Более 80% изученной выборки составляют кристаллы со следами механических повреждений, проявляющихся в виде выколов отдельных частей кристаллов, ребер со следами истирания, а также всевозможных внутренних и поверхностных трещин (рис. 1, *ж*, *з*, *и*).

Около четверти всех образцов содержит включения темного цвета (предположительно графит и слюды) эпигенетического происхождения.

**Результаты исследований. ИК-спектроскопия.** Структурные дефекты в алмазе служат типоморфными характеристиками этого минерала и используются для решения поисково-прогнозных задач. К числу наиболее распространенных и информативных в генетическом плане дефектов относятся примеси азота в форме сдвоенных и тетраэдрически сгруппированных замещающих углерод атомов (А- и В-центры соответственно), плейтелетс — пластинчатые образования интерстициальной природы и водород, химически связанный с углеродом алмазной решетки [Соболев, 1978; Bursill, Glaisher, 1985; Evans et al., 1995; Соболев, Лисойван, 1972].

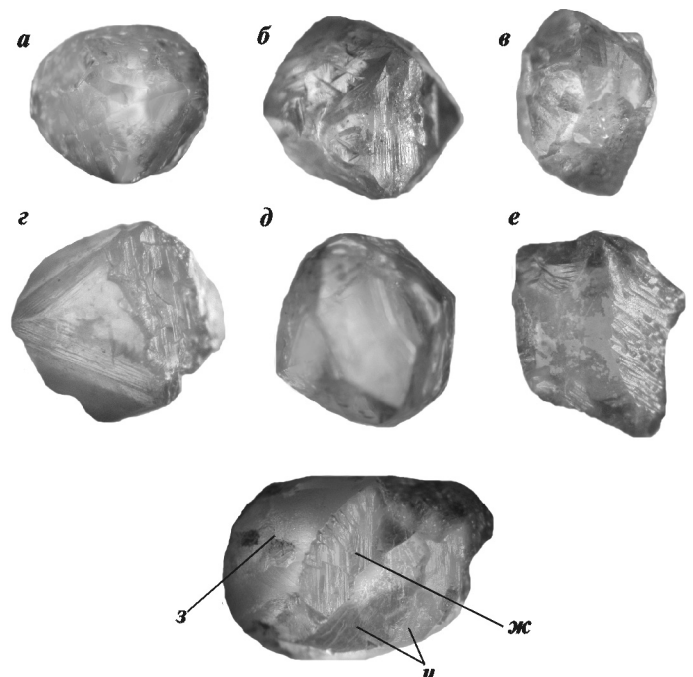


Рис. 1. Кристаллы алмаза из россыпей Северного Тимана различного габитуса: *a* — додекаэдрического; *b* — додекаэдрического с ламинарным строением граней; *в* — кубического; *г* — октаэдрического; *д* — комбинационного (ОД); *e* — неопределенного; *ж*, *з*, *и* — додекаэдрического (*ж* — со сколом, *з* — со следами истирания ребер, *и* — с трещинами)

Таблица 1

Характеристика образцов и распределение структурных дефектов в кристаллах алмаза из россыпей Северного Тимана

Россыпь	Номер образца	Масса, кар.	Цвет	Форма	Азот, ppm			%N <sub>B</sub>	Плейте-летс, см <sup>-1</sup>	N <sub>i</sub> , см <sup>-1</sup>	Спектральный тип
					A	B	Σ N				
Р. Белая	119	0,05	Бесцветный с бурым нацветом	Додекаэдроид	391	215	606	35	15,8	0,7	IaAB
	120	0,32	Бесцветный	— “ —	53	128	181	71	5,6	1	IaAB
	121	0,01	Бурый	— “ —	11	559	570	98	2,6	6,5	IaB
	122	0,3	Бесцветный с зеленоватым нацветом	— “ —	1119	1343	2462	55	30,4	1,6	IaAB
	123	0,16	Бесцветный	Комбинационный (О-Д)	504	373	877	43	14,5	0,4	IaAB
	124	0,27	Бесцветный	Додекаэдроид	1100	585	1685	35	16,8	7	IaAB
	125-01	0,06	Бурый	Октаэдр	493	38	531	7	4,7	0,9	IaAB
	125-02	0,05	Желто-серый	Додекаэдроид	700	623	1323	47	14,7	25,5	IaAB
Р. Травянка	134	0,09	Бурый	— “ —	12	20	32	0	0	0,7	IIa
	135	0,03	Бесцветный	Осколок	5	0	5	0	0	0	IIa
	136	0,04	Пятнистый	Додекаэдроид	148	20	168	12	1	1,8	IaA
	137	0,11	Бесцветный с бурым нацветом	Ламинарный ромбододекаэдр	145	344	489	70	16,1	0,3	IaAB
	138	0,02	Бесцветный	Тетрагексаэдроид	1003	25,5	1028,5	2	8	0	IaA
	139	0,02	Бурый	Комбинационный (О-Д)	430	20	450	4	7	0	IaA
	140	0,06	Бесцветный с бурым нацветом	Додекаэдроид	22	275	297	93	9,2	1,6	IaB
	141	0,01	Темно-серый	Обломок	1079	21	1100	2	13,7	5,1	IaA
Р. Великая	128	0,12	Бесцветный с бурым нацветом	Додекаэдроид	257	53	310	17	7	0	IaAB
	129	0,03	Бесцветный	— “ —	516	287	803	36	16,2	0,3	IaAB
	130	0,02	Бесцветный с бурым нацветом	Ламинарный ромбододекаэдр	670	363	1033	35	11,5	0,6	IaAB
	131	0,03	Бесцветный	Кубоид	1056	224	1280	18	0,1	2,6	IaAB
	132	0,01	Бесцветный с пигментными пятнами зеленого цвета	Осколок	748	80	828	10	11,1	2,8	IaAB
	133*	0,01	Желтый	Тетрагексаэдроид	48		140		0	0	Iab
	Р. Лямчина	126	0,08	Бесцветный с пигментными пятнами бурого цвета	Комбинационный (О-Д)	413	138	551	25	8,6	1,8
127		0,08	Бесцветный	Обломок	114	46	160	29	1,4	0,1	IaAB

\* Содержание одиночного азота (N=92 at. ppm).

Типичные ИК-спектры алмаза представлены на рис. 2. Среди изученных образцов доминируют кристаллы смешанного спектрального IaAB-типа с различным соотношением концентраций азота в А- и В-формах. В подчиненном количестве отмечаются кристаллы спектрального типа IaA и «безазотные» индивиды типа IIa (N<sub>A</sub>, N<sub>B</sub><20 ppm,) обнаруженные лишь в россыпи р. Травянки. Единичные кристаллы принадлежат к спектральному типу IaB, т.е. содержат преимущественно В-центры, а также к типу Iab, характеризующемуся одновременным присутствием в алмазе азота в виде одиночных атомов и их пар, замещающих углерод. В большинстве кристаллов, относящихся

к спектральным типам IaB и IaAB, зафиксированы плейтелетс, относительное содержание которых, как правило, не превышает 16,8 см<sup>-1</sup>. В кристаллах со значимой (>20 at. ppm) концентрацией азота в А- и В-формах в умеренном количестве (обычно не более 6,5 см<sup>-1</sup>) отмечаются водородные центры.

Анализ данных ИК-спектроскопии (табл. 1) позволяет выявить корреляцию между размерностью, морфологическими особенностями, наличием механических повреждений и распределением структурных дефектов в кристаллах.

Во-первых, для индивидов массой ≥0,1 кар. (в отличие от более мелких кристаллов) типично

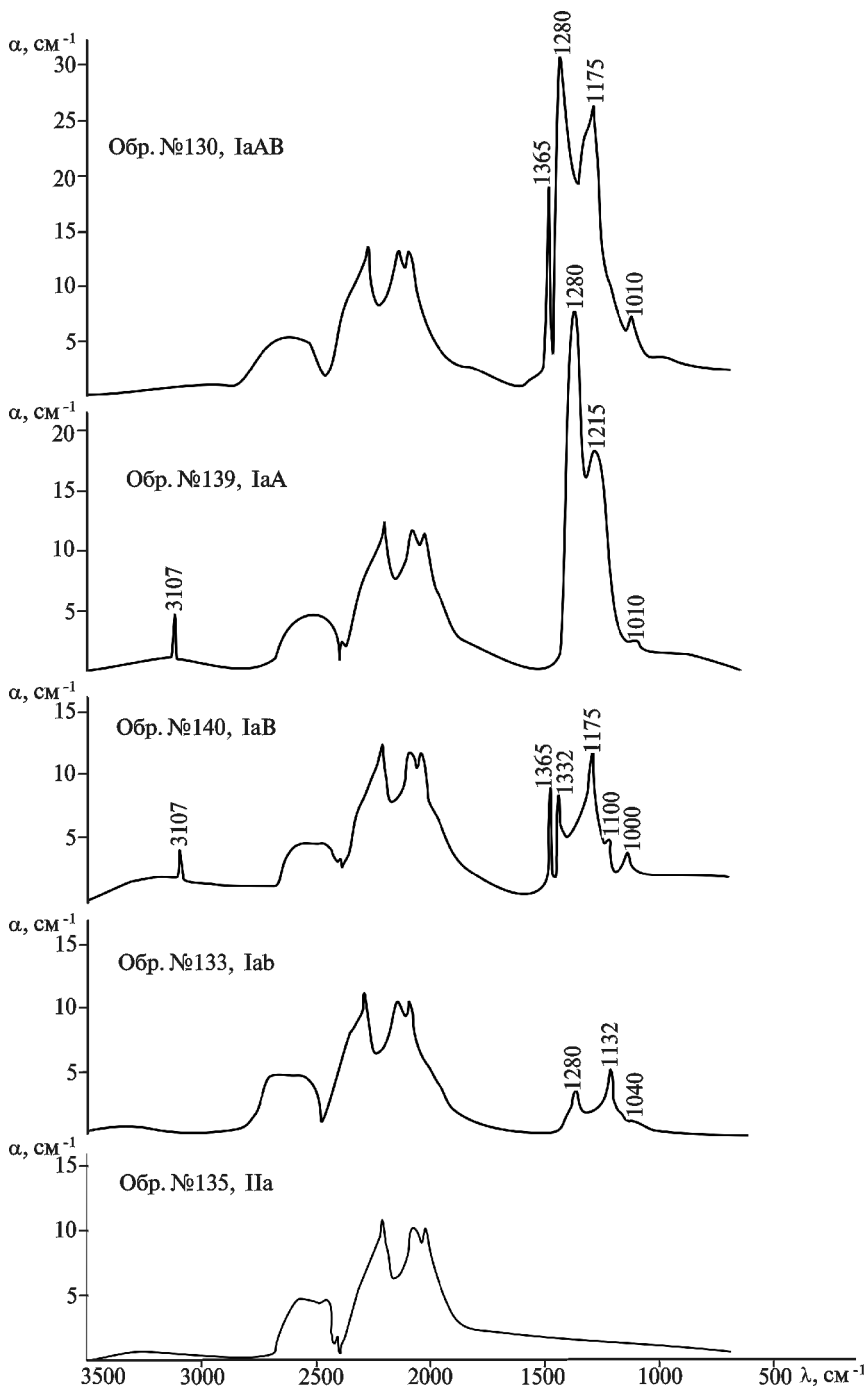


Рис. 2. Характерные ИК-спектры алмазов из россыпей Северного Тимана, соответствующие различным физическим типам

повышенное относительное содержание В-дефектов ( $\%N_B = 35-98$ ) и плейтелетс  $5,6-30,4 \text{ см}^{-1}$ . Это согласуется с данными для 14 кристаллов с Северного Тимана, полученными ранее Ю.А. Ключевым с соавторами (1974, 1979).

Во-вторых, кристаллы кубического габитуса, в отличие от индивидов иной формы, не имеют значимых концентраций азота в В-форме и плейтелетс. Кроме того, в желтом тетрагексаэдроиде (образец № 133), соответствующем II разновидности по Ю.Л. Орлову, зафиксирована структурная примесь одиночного азота (92 at. ppm).

В-третьих, осколки и обломки кристаллов характеризуются низким абсолютным содержанием азота в В-форме: от 0 до 80 at. ppm., т.е. подтверждается общая тенденция к снижению прочности алмаза при уменьшении содержания азота в В-форме [Налетов и др., 1979]. Это необходимо учитывать при оценке дальности переноса алмазов в россыпях по степени их механических повреждений. Согласно полученным нами данным, около половины механически поврежденных кристаллов представлено спектральными типами IIa и IaA. Вместе с тем кристаллы без признаков механического повреждения (около 15% от всей выборки) характеризуются повышенным содержанием азота в А- и В-формах ( $N_A > 500$  at. ppm,  $N_B > 280$  at. ppm). Кроме того, доля азота в агрегированной форме ( $\%N_B$ ) в них также высока и составляет от 36 до 55%.

Как видно из данных табл. 1, в имеющихся выборках алмазов наблюдаются отличия. Россыпи р. Белой присущи кристаллы повышенной крупности ( $-2+1$  мм, масса не менее 0,05 кар.). Среди них преобладают средне- и высокоазотные индивиды смешанного типа IaAB с общим содержанием азота ( $N_{tot}$ ) от 531 до 1685 at. ppm и повышенной долей азота в В-форме ( $\%N_B$ ) от 35 до 98% (рис. 3; табл. 1).

В россыпи р. Травянки кристаллы алмаза очень разнообразны. Половина выборки представлена кристаллами массой  $\leq 0,04$  кар. По распределению азотных центров они подобны мелким алмазам с Северного Тимана, изученным в работе [Ключев и др., 1974]: и те и другие относятся к спектральному типу IaA. В той же россыпи более крупные индивиды с массой  $\leq 0,06$  кар. принадлежат к типам IaB, IaAB и IIa (рис. 3; табл. 1). Таким образом, в отличие от россыпи р. Белой, в россыпи р. Травянки

среди кристаллов алмаза доминируют индивиды с  $N_{tot} < 489$  at. ppm и низкой степенью агрегированности азота ( $\%N_B < 12\%$ ).

В выборке из россыпи р. Великой преобладают мелкие кристаллы массой не более 0,03 кар. По распределению структурных дефектов они отличаются от мелких алмазов россыпи р. Травянки. Алмазы из россыпи р. Великой высокоазотные ( $N_{tot} > 803$  at. ppm), смешанного типа IaAB и обладают пониженной долей В-центров ( $\%N_B < 36\%$ ).

Два кристалла из россыпи р. Лямчины принадлежат к смешанному спектральному типу IaAB, причем

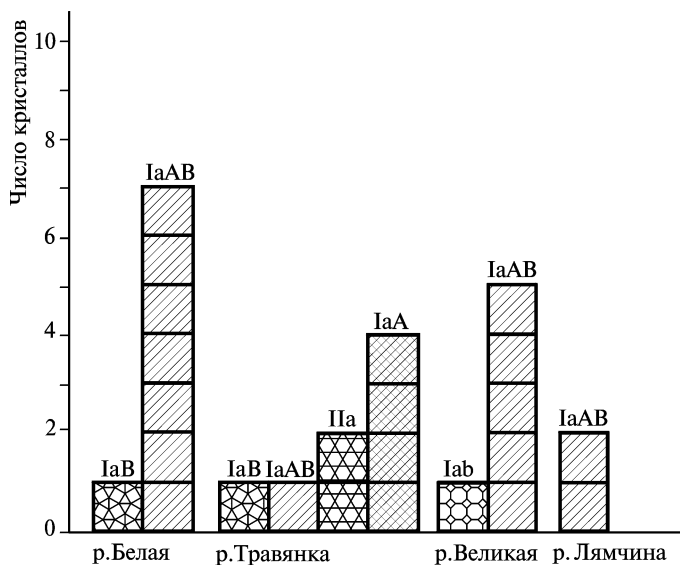


Рис. 3. Распределение кристаллов алмаза различных физических типов в россыпях Северного Тимана

азот в В-форме присутствует в подчиненном количестве (25 и 29%) по сравнению с азотом в А-форме.

**Спектральная катодолюминесценция.** Метод спектральной катодолюминесценции впервые применяется для выявления типоморфных особенностей алмазов, поэтому кратко остановимся на его возможностях. Спектральная катодолюминесценция (КЛ) является неразрушающим методом локального анализа полупроводников и диэлектриков, основанным на катодолюминесценции — разновидности люминесценции, которая возбуждается в кристалле при бомбардировке его быстрыми электронами (катодными лучами) и возникает вследствие рекомбинации электронно-дырочных пар или внутренних переходов в центрах люминесценции. Свечение центров люминесценции может быть обусловлено как свойствами самого кристалла, так и содержащимися в нем примесями. Спектры излучения различных центров люминесценции находятся в интервале от коротковолновой УФ- до ближней ИК-области. Ширина спектральных полос варьирует от сотен до долей нанометра и для многих кристаллов уменьшается при охлаждении. При взаимодействии электронного пучка с кристаллом реализуются практически все возможные электронные переходы. Это обусловлено тем, что энергия электронов пучка много больше ( $1 \div 1000$  эВ), чем ширина запрещенной зоны кристалла (до 15 эВ). В связи с этим спектры катодолюминесценции, характеризующие высокоэнергетическую спектральную область, гораздо информативнее, чем, например, спектры фотолюминесценции [Спивак и др., 1986; Петров, 1996].

Спектры катодолюминесценции 10 кристаллов алмаза (образцы № 122, 124, 125-02, 127, 128, 131, 134, 135, 137, 140) получены при комнатной температуре и температуре жидкого азота (77 К).

В спектрах катодолюминесценции образцов № 127, 128, 137, 140 при комнатной температуре

(рис. 4, а) наблюдается бесструктурная широкая полоса 400—500 нм с максимумом около 440 нм и широкая полоса свечения 510—560 нм. Полоса в области 400—500 нм является А-полосой люминесценции [Квасков, 1997], осложненной электронно-колебательной системой N3 (линия 415 нм) (центр N3 образован тремя замещающими атомами азота, образующими треугольник в плоскости (111), и вакансией [Zaitsev, 2001]). Полоса с максимумом около 520 нм — фонное повторение электронно-колебательной системы N3 (линия 503 нм) (дефект в алмазе, состоящий из двух вакансий и двух атомов азота) [Zaitsev, 2001].

В спектрах катодолюминесценции образцов № 122, 124, 125—02, 131 при комнатной температуре (рис. 4, а) наблюдается только бесструктурная широкая полоса 400—480 нм с максимумом около 440 нм, связанная с А-полосой люминесценции.

Во всех спектрах катодолюминесценции при температуре жидкого азота наблюдается похожая картина, но, в отличие от спектров при комнатной температуре, обнаруживаются линии 415 нм (N3-центр); полосы 503 нм и следующие за ней узкие полосы 513 и 520 нм обусловлены присутствием в структуре образца электронно-колебательной системы N3; узкие линии 478 нм (S2-дефект — вакансия — два атома азота), 490,4 нм; 495,8 (N4-система) и полоса 575, проявленная в образце № 132 с зелеными пигментными пятнами, характерная для алмазов после радиационного облучения [Zaitsev, 2001] (рис. 4, б).

Для образцов № 134 и 135 характерна одинаковая форма спектров как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота. В них проявлены две ярко выраженные линии с максимумами 439 и 539 нм, характерные, по данным [Zaitsev, 2001], только для алмазов, имеющих тип IIa, т.е. с суммарным содержанием азота меньше 20 ppm (рис. 4, в).

С помощью этого метода можно выявить три типа спектров, которые коррелируют с общим содержанием структурного азота в кристаллах (по данным метода ИК-спектроскопии, табл. 1):

- тип 1 описывает проявление только системы N3, которая, возможно, полностью перекрывает систему N3;

- тип 2 характеризуется проявлением двух ярко выраженных электронно-колебательных систем, связанных с центрами N3 и N3, система N3 преобладает над системой N3;

- тип 3 имеет одинаковую форму спектра при комнатной температуре и температуре жидкого азота, а также линии 439 и 539 нм.

Типу 1 соответствует наибольшее количество азота, которое варьирует в интервале 700—1200 ppm, типу 2 — 100—700 ppm, тип 3 относится к алмазам с суммарным содержанием азота меньше 20 ppm. Результаты спектральной катодолюминесценции носят предварительный характер и требуют дополнительного подтверждения на более представительной коллек-

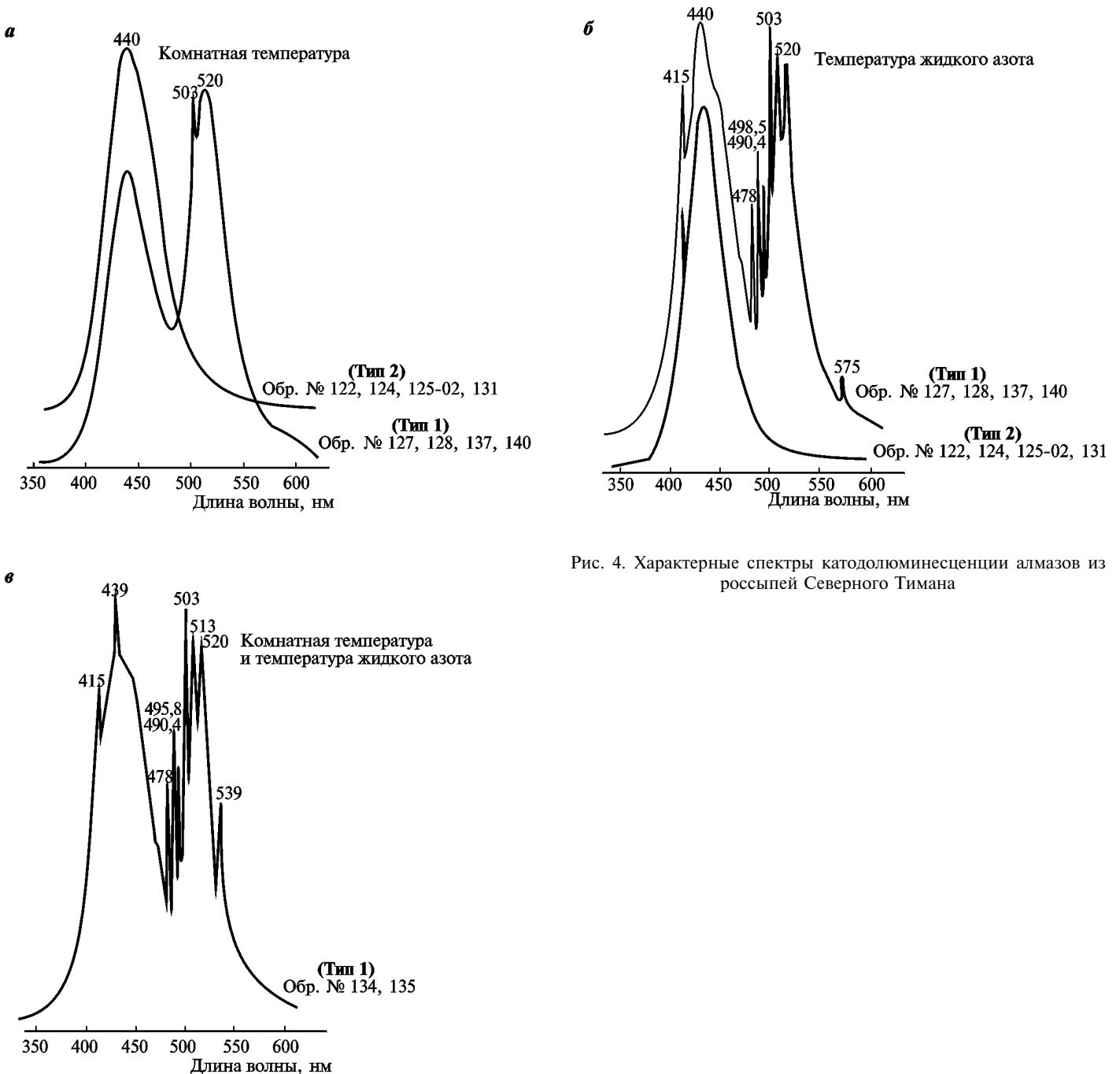


Рис. 4. Характерные спектры катодолуминесценции алмазов из россыпей Северного Тимана

ции кристаллов. Тем не менее данные спектральной катодной люминесценции и ИК-спектроскопии хорошо согласуются, что позволяет использовать метод КЛ для качественной оценки общего содержания структурного азота в алмазах.

**Обсуждение результатов.** В связи с тем что ни одна из рассмотренных выборок кристаллов не является статистически представительной для характеристики алмаза каждой россыпи, целесообразно рассмотреть данные по четырем изученным объектам в совокупности.

Данные по содержанию структурных дефектов в кристаллах из россыпей Северного Тимана позволяют выделить среди них две основные популяции.

Наличие двух популяций выражается двумодальным распределением кристаллов по содержанию азота в А-, В-формах, плейтелетс и водорода (рис. 5). В изученной выборке преобладают кристаллы с содержанием азота в А-форме ( $N_A=350\div 600$  at. ppm), азота в В-форме ( $N_B=0\div 130$  at. ppm), плейтелетс ( $5\div 9$  см<sup>-1</sup>) и водорода ( $0,1\div 0,3$  см<sup>-1</sup>,  $\ln \alpha_{3107}=0,7\div 2$ ). Второстепенная мода характеризуется следующими величинами:  $N_A=850\div 1100$  at. ppm,  $N_B=260\div 390$  at. ppm, плейтелетс  $13\div 17$  см<sup>-1</sup> и водорода  $0,7\div 2$  см<sup>-1</sup> ( $\ln \alpha_{3107}=0,1\div 0,3$ ).

Сходное распределение структурных дефектов наблюдается и в алмазах из россыпей Северного Урала [Хачатрян и др., 2004] (рис. 5). Так, в сопо-

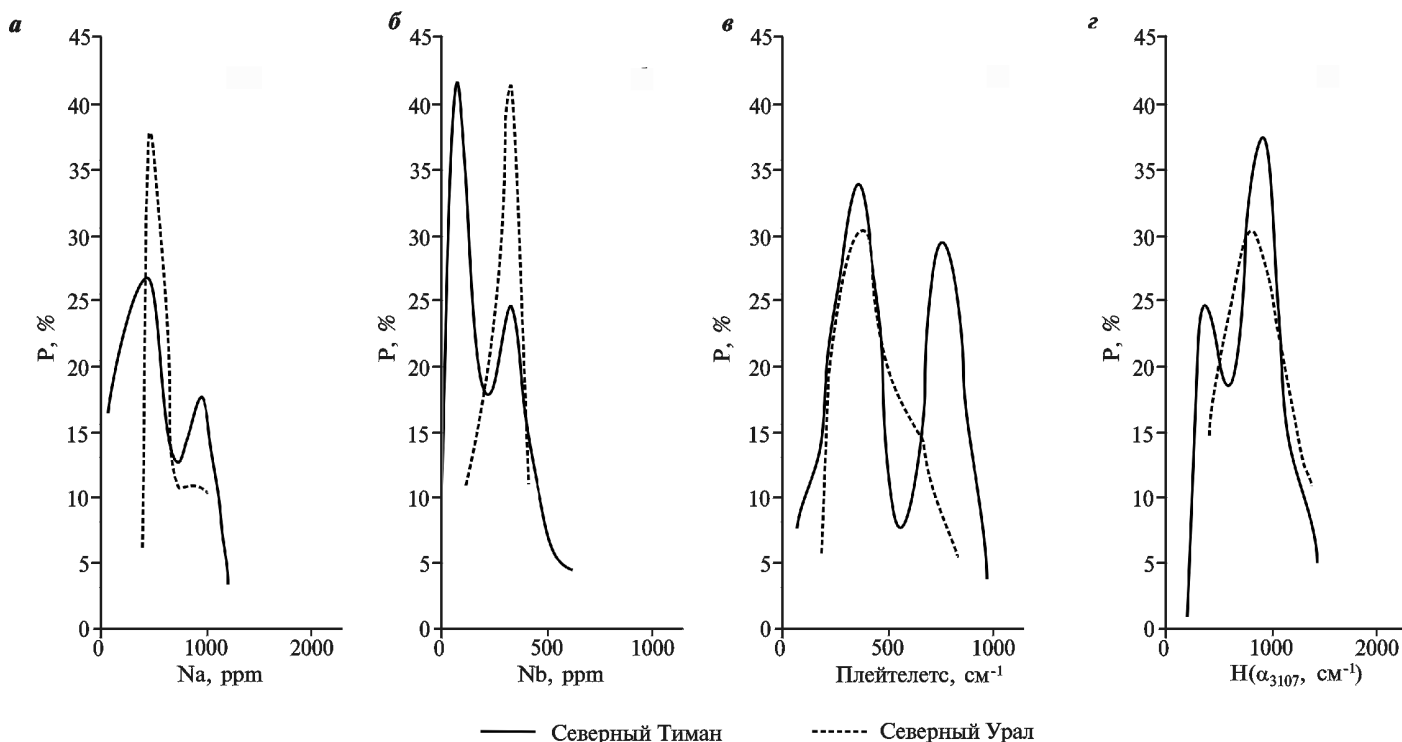


Рис. 5. Кривые распределения алмазов Северного Тимана и Северного Урала по содержанию азота в А-форме (а), В-форме (б), плейтелетс (в) и водорода (з)

ставляемых россыпях отмечается совпадение главных популяций алмаза сопоставляемых россыпей по азоту в А-форме, плейтелетс и водороду. При этом второстепенная популяция алмаза Северного Тимана близка к главной популяции алмаза Северного Урала по азоту в В-форме (рис. 5, б). По морфологическим особенностям кристаллы из россыпей сравниваемых районов также близки между собой (табл. 2).

По распределению структурных дефектов кристаллы из россыпей Северного Тимана сопоставимы с алмазами из месторождений Архангельской алмазонасной провинции (ААП) [Khachatryan, Kaminsky, 2003; Хачатрян и др., 2006]. Основные популяции северотиманских кристаллов, выделенные по азоту в А- и В-формах, а также по водороду соответствуют основным популяциям алмаза из трубок им. В. Гриба и Архангельской (рис. 6, а, б, з). В то же время соотношение габитусных форм кристаллов в изученной коллекции в целом соответствует распространенности основных морфологических типов алмаза из этих трубок (табл. 2). На основании этого можно предположить, что коренные источники алмаза россыпей Северного Тимана являются кимберлитовыми. Значительное сходство между алмазом из трубок ААП и россыпей Северного Тимана проявляется также в наличии зависимости между крупностью кристаллов и содержанием в них структурных дефектов. Мелкие алмазы (<1 мм) из россыпей рек Травянки, Белой подобны мелким алмазам из трубок Золотицкого поля ААП, они характеризуются пониженным содержанием структурной примеси азота [Khachatryan, Kaminsky, 2003], тогда как более крупные индиви-

ды — повышенным. Таким образом, условия образования алмазов Северного Тимана, Северного Урала и ААП, по-видимому, достаточно близки.

Как отмечено выше, кристаллы из разных россыпей Северного Тимана отличаются по содержанию структурных дефектов. Например, мелкие кристаллы россыпи р. Травянки отличаются от мелких кристаллов россыпи р. Великой большой вариацией содержания азота и более низкой долей азота в В-форме. Это позволяет предполагать множественность их коренных источников (более одного).

Высокое содержание механически поврежденных кристаллов (>80%) в изученной коллекции из россыпей Северного Тимана, по-видимому, свидетельствует

Таблица 2

Распределение кристаллов алмаза по габитусу

Объект	Распределение кристаллов по габитусу, %				
	додекаэдрический	октаэдрический	комбинационный	кубический	неопределенный
Северный Тиман	54,5	4	16,5	12,5	12,5
Северный Урал <sup>1</sup>	80,5	6,3	9,3	0,1	3,9
Трубка Архангельская <sup>2</sup>	55,1	13,2	2,9	28,3	0,5
Трубка им. В. Гриба <sup>2</sup>	29,0	32,0	17,0	6,8	7,0

Примечание: <sup>1</sup> — данные приведены по [Захарченко, 2001]; <sup>2</sup> — данные приведены по [Богатиков и др., 1999].

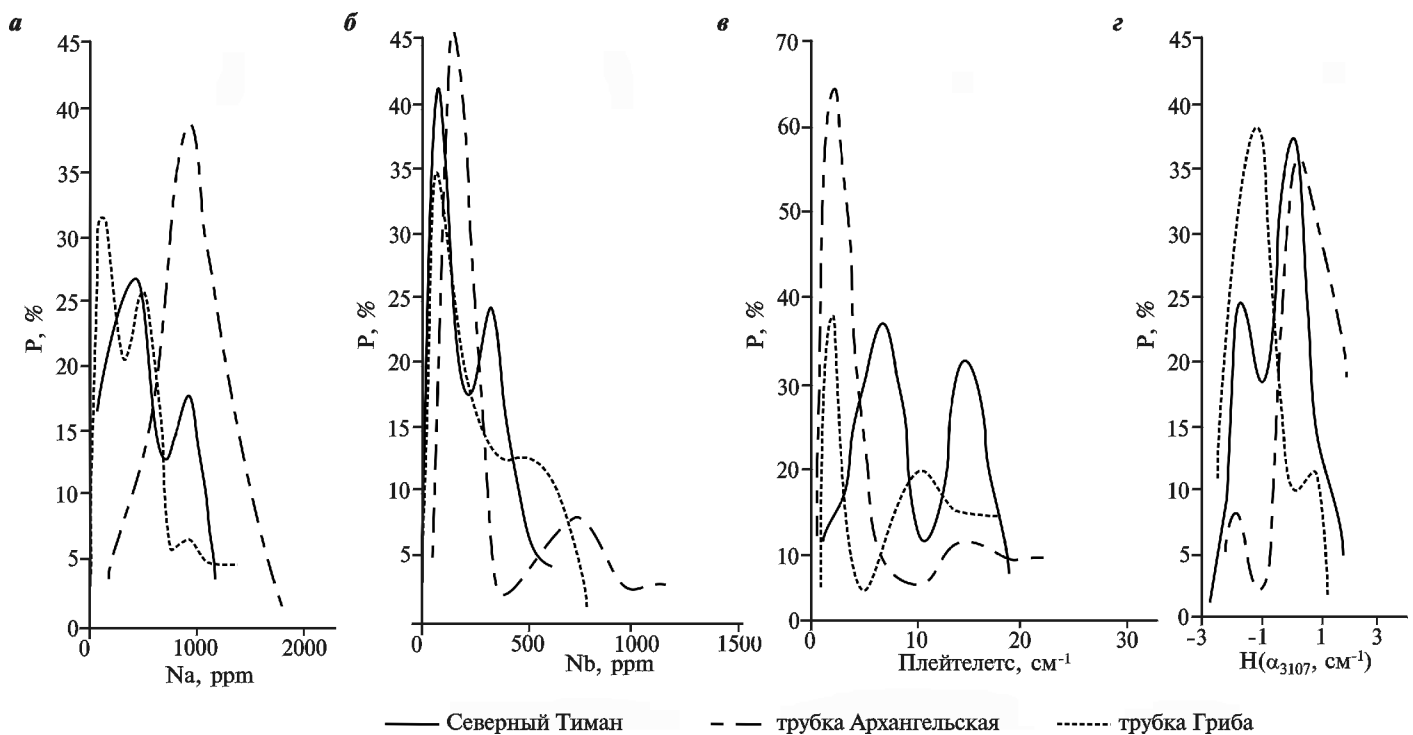


Рис. 6. Кривые распределения алмазов Северного Тимана и трубок Арахангельская и Гриба по содержанию азота в А-форме (а), В-форме (б), плейтелетс (в) и водорода (z)

о длительной транспортировке алмазов и дальности их сноса от коренного источника.

В изученной коллекции выявлено весьма значительное число высокоазотных алмазов с повышенной долей азота в В-форме. Эти кристаллы характеризуются высокими прочностными свойствами и наиболее устойчивы при транспортировке от коренного источника [Налетов и др., 1979]. Так как подавляющее большинство изученных кристаллов, включая самые прочные из них, имеет механические повреждения, можно сделать предположение об их длительном переносе на большие расстояния.

**Заключение.** Сходство основных популяций кристаллов алмаза Северного Тимана, трубок ААП (Архангельская и им. В. Гриба), а также Северного Урала по распределению структурных дефектов азота дает основание предполагать, что условия образования всех этих алмазов в глубинных источниках были

схожи. Таким образом, коренные источники алмаза Северного Тимана, по-видимому, имеют кимберлитовое происхождение.

Отличия алмаза из разных россыпей Северного Тимана по содержанию структурных дефектов указывают на множественность их первоисточников. Высокое содержание поврежденных кристаллов в изученной выборке, включая кристаллы с высокими прочностными свойствами, свидетельствует об удаленности их коренных источников и длительной транспортировке.

В качестве коренных источников алмазов Северного Тимана и Северного Урала, по мнению авторов, можно рассматривать кимберлитовые трубки Архангельской алмазоносной провинции. При этом нельзя исключить наличие локальных источников кимберлит-лампроитового типа на территориях Северного Тимана и Северного Урала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бовкун А.В., Гаранин В.К., Малиборский П.Г. и др. Особенности кристаллов алмаза Беломорья, Тимана, Северной Якутии и их генезис // Минерал. журн. 1996. № 4. С. 44–55.

Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. Архангельская алмазоносная провинция. М.: Изд-во МГУ, 1999.

Захарченко О.Д., Битков П.П., Бакулина Л.П. Алмаз из россыпей Среднего Тимана // Минерал. журн. 1993. № 4. С. 28–37.

Захарченко О.Д., Хачатрян Г.К., Грецишников Д.И. Алмазы Тимано-Уральского региона / Ред. В.И. Ваганов. М.: ЦНИГРИ, 2006.

Квасков В.Б. Природные алмазы России. М., 1997.

Клюев Ю.А., Дуденков Ю.А., Непша В.И., Николаева Т.Т. Некоторые особенности алмазов Северного Тимана // Докл. АН СССР. 1974. Вып. 218, № 6. С. 1424–1426.

Клюев Ю.А., Каминский Ф.В., Смирнов В.И. и др. Алмазы Северного Тимана // Минералы и парагенезисы минералов горных пород и руд. Л.: Наука, 1979. С. 96–100.

Коптиль В.И., Зинчук Н.Н. Основные типоморфные особенности алмазов Среднего Тимана и некоторые вопросы терминологии их кривогранных округлых форм // Кристаллогенезис и минералогия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. С. 197–198.



Макеев А.Б., Дудар В.А., Лютоев В.П. и др. Алмазы Среднего Тимана. Сыктывкар: Геопринт, 1999.

Налетов А.М., Клюев Ю.А., Григорьев О.Н. и др. Влияние оптически активных центров на прочностные свойства алмазов // Докл. АН СССР. 1979. Т. 246, № 1. С. 83—86.

Петров В.И. Катодоллюминесцентная микроскопия // УФН. 1996. Т. 166, вып. 8. С. 859—871.

Соболев Е.В. Азотные центры и рост кристаллов природного алмаза // Проблемы петрологии земной коры и верхней мантии. Новосибирск: Наука, 1978. С. 245—255.

Соболев Е.В., Лисойван В.И. Примесные центры в алмазах // Тез. VIII отчет. науч. конференции. Новосибирск, 1971. С. 60—61.

Соболев Е.В., Лисойван В.И. О природе свойств алмаза промежуточного типа // Докл. АН СССР. 1972. Т. 204, № 1. С. 88—90.

Спивак Г.В., Петров В.И., Антошина М.К. Локальная катодоллюминесценция и ее возможности для исследования зонной структуры твердых тел // УФН. 1986. Т. 148, вып. 4. С. 689—717.

Хачатрян Г.К. Усовершенствованная методика оценки концентраций азота в алмазе и ее практическое применение

// Геологические аспекты минерально-сырьевой базы АК «АЛРОСА». Мирный, 2003. С. 319—321.

Хачатрян Г.К., Веричев Е.М., Гаранин В.К. и др. Распределение структурных дефектов в алмазах из трубки им. В.П. Гриба (Архангельская алмазоносная провинция) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2006. № 6. С. 29—37.

Хачатрян Г.К., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. и др. Исследование оптически активных центров в алмазах из россыпей Урала в связи с проблемой выявления их коренных источников // Геология и геофизика. 2004. Вып. 45, № 2. С. 244—252.

Bursill L.A., Glaisher R.W. Aggregation and dissolution of small and extended defect structures in type I a diamond // Amer. Miner. 1985. Vol. 70. P. 608—618.

Evans T., Kiflawi I., Luyten W., Tendeloo G. van. Conversion of platelets into dislocation loops and voidite formation in type IaB diamonds // Proc. Roy. Soc. London, A., 1995. Vol. 449. P. 295—313.

Khachatryan G.K., Kaminsky F.V. «Equilibrium» and «non-equilibrium» diamonds crystals from deposits in the east European platform, as revealed by infrared absorption data // Canad. Mineral. 2003. Vol. 41b. P. 171—184.

Zaitsev A. Optical properties of diamond: A data handbuch. Berlin: Springer, 2001. Vol. XVII.

Г.К. Хачатрян — ЦНИГРИ, ст. науч. сотр.,

*e-mail*: s34@mail.ru;

М.Б. Копчиков — геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра минералогии, аспирант,

*e-mail*: msu@kopchikov.ru;

В.К. Гаранин — геологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра минералогии, зав. лабораторией месторождений алмаза,

*e-mail*: vgaranin@mail.ru;

М.В. Чукичев — физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, кафедра полупроводников, доцент;

Н.Н. Головин — ОАО «Архангельскгеолдобыча»,

заместитель генерального директора

Поступила в редакцию

07.10.2008