

УДК 549.211:543.42 (470.11+571.56)

Г.Ю. Криулина¹, В.К.Гаранин², А.Я. Ротман³, О.Е. Ковальчук⁴

ОСОБЕННОСТИ АЛМАЗА ИЗ ПРОМЫШЛЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ РОССИИ

Алмазы из кимберлитовых трубок и тел различных провинций имеют черты сходства, но довольно существенно отличаются по ряду характерных особенностей. Приведены новые обобщенные данные о морфологических и структурных особенностях, а также о физических свойствах алмаза из Архангельской и Якутской алмазоносных провинций, полученные авторами на основе результатов оригинальных исследований, дополненных сведениями из других источников.

Ключевые слова: алмазы, структурные особенности, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция.

Diamonds from kimberly pipes and bodies of different provinces have as line of similarity, and essentially enough differ on a number of prominent features. In this work new generalised data about structural features and physical properties of diamond from Arkhangelsk and Yakut diamond province, received by authors on results of original researches added with findings from other sources are cited.

Key words: diamond, structural feature, IR-spectroscopy, photoluminescent.

Цели и задачи исследований. За многие годы исследования алмазов накоплен огромный фактический и аналитический материал. В большинстве работ приведены результаты изучения алмазов из определенных месторождений. На сегодняшний день актуально проанализировать и сравнить свойства алмазов из различных месторождений России. В рамках научного сотрудничества геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова и НИГП «АЛРОСА» проводилась работа по изучению и сравнению морфологических и спектрометрических свойств алмазов из месторождений Архангельской алмазоносной провинции (ААП) и Якутской алмазоносной провинции (ЯАП).

Объекты и методы исследований. Объектами наших исследований стали представительные партии алмазов из геолого-разведочных и промышленных проб этого минерала из месторождений Архангельской и Якутской алмазоносных провинций. Всего изучено более 12 тыс. кристаллов размерно-ситовых классов $-8+4$, $-4+2$, $-2+1$ мм. Коллекция из ААП представлена алмазами из Черноозерского поля (месторождение им. В.П. Гриба), Золотицкого поля (месторождение им. М.В. Ломоносова, на примере типичной трубки им. Карпинского-1 и промышленно обрабатываемой трубки Архангельская и диатрем Снегурочка, Первомайская, Кольцовская). Коллекции из ЯАП состоят из алмазов трубок Мир и Интернациональная Мир-

нинского поля Малоботуобинского района, трубок Нюрбинская и Ботуобинская Накынского поля Средне-Мархинского района, трубок Юбилейная, Комсомольская Алакит-Мархинского поля и трубки Удачная Далдынского поля, относящихся к Далдын-Алакитскому алмазоносному району.

Для выявления типоморфных особенностей алмазов необходимо комплексное изучение их минералогических и физико-спектроскопических свойств в пределах конкретной размерности и разновидности. Основные использованные нами методы — оптическая и электронная микроскопия (для изучения морфологии формы и поверхности кристаллов); электронно-парамагнитный резонанс, спектроскопия в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах (изучение дефектно-примесного состава), фотолюминесценция, цветная катодолюминесценция, лазерная томография (изучение дефектов структуры, однородности внутреннего строения).

Минералогия и морфология. Распределение кристаллов по классификации Ю.Л. Орлова показывает, что подавляющее большинство алмазов из всех изученных месторождений относится к I разновидности (60–87% в трубках ААП (табл. 1) и 88–98% в трубках ЯАП (табл. 2)). В месторождениях им. М.В. Ломоносова, им. В.П. Гриба, а также в забалансовых месторождениях трубок Снегурочка, Кольцовская, Первомайская достаточно высоко содержание индивидов

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, науч. с., e-mail: Galinadiamond@gmail.com

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

³ Якутское научно-исследовательское геолого-разведочное предприятие НИГП «АЛРОСА» (ЗАО), зав. минералогическим отделом, докт. геол.-минер. н., e-mail: rotman@cnigri.alrosa-mir.ru

⁴ Якутское научно-исследовательское геолого-разведочное предприятие НИГП «АЛРОСА» (ЗАО), заведующий алмазной лабораторией.

V разновидности, к которой отнесены различной степени насыщенности серые и черные кристаллы додекаэдрического и комбинационного габитуса. Среди алмазов из трубок ЯАП кристаллы V разновидности единичны, весьма малочисленны и индивиды II и III разновидностей (суммарно до 3%). В ААП выявлено относительно повышенное содержание кубических форм кристаллов (для всех трубок Золотицкого поля 10–15%), для трубки им. Гриба — 4%) по сравнению с алмазами из других полей. В трубках Золотицкого, Черноозерского полей кристаллы IV разновидности единичны, тогда как содержание алмазов IV разновидности в месторождениях Накынского (10%) и Алакит-Мархинского (2–8%) полей высокое.

Среди алмазов ААП соотношение кристаллов различных форм варьирует в разных трубках, но тенденция к значительному преобладанию додекаэдридов сохраняется.

Особенность большинства алмазов из месторождения им. М.В. Ломоносова — преобладание кристаллов ромбододекаэдрического габитуса, их содержание возрастает с увеличением размера (до 60% в классе –8+4 мм). По большому числу додекаэдридов, приближенных к «уральскому» типу, алмазы ААП не имеют аналогов в коренных месторождениях ЯАП, в которых преобладают октаэдрические и комбинационные формы, додекаэдриды «якутского» типа присутствуют в незначительном количестве, а додекаэдриды уральского типа составляют менее 1–5%. Максимальное суммарное содержание октаэдрических и комбинационных кристаллов с гранями октаэдра и поверхностями додекаэдрида в трубках Мирнинского поля 88–94%, в трубках Ботубинская и Нюрбинская 50–60%, а минимальное — в трубках Юбилейная и Удачная — 46% (табл. 2). Среди алмазов ЯАП чаще встречаются псевдоромбододе-

Таблица 1

Распределение алмазов из трубок месторождений ААП по морфологическим типам и разновидностям по классификации Ю.Л. Орлова

Трубка	Число алмазов различных морфологических типов и разновидностей, %							
	Кристаллы I разновидности				Кристаллы разновидностей			
	всего	октаэдры	комбинационные ОД	додекаэдриды	II, III	IV	V	VIII
Им. Ломоносова	82,4	12,3	29,4	40,7	5,9	—	8,3	3,4
Поморская	72,6	11,8	9,1	51,7	20,5	—	7,2	
Пионерская	84,4	15,5	25,4	43,5	7,6	—	6,6	1,3
Им. Карпинского-1	86,4	2,3	14,6	58,1	10,0	0,8	1,6	0,4
Им. Карпинского-2	81,3	11,8	28,3	41,2	12,3	—	5,6	0,7
Архангельская	90,3	3,6	7,1	60,3	1,4	0,2	7,8	0,3
Снегурочка	85,7	14	8	62,0	8,3	0	6,0	—
Первомайская	80,0	17,8	4,2	58,0	8,6	0	5,2	—
Кольцовская	82,7	15,1	2,5	65,1	7,7	0	5,5	—
Им. Гриба	87,0	32	17	29	4,4	1,4	2,1	5,2

Примечание. Данные о трубках им. Ломоносова, Поморская, Пионерская, им. Карпинского-2 — по геолого-разведочным пробам [Богатиков и др., 1999]; данные оригинальных исследований получены в лаборатории месторождений алмазов геологического факультета МГУ при детальном опробовании трубок им. Карпинского-1 и Снегурочка; данные о трубке Архангельская — по представительным пробам промышленной добычи. Остаток до 100% — кристаллы неопределенной формы или разновидности; прочерк — нет данных. ОД — кристаллы комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями додекаэдрида.

Таблица 2

Распределение алмазов из трубок месторождений ЯАП по морфологическим типам и разновидностям по классификации Ю.Л. Орлова

Трубка	Число алмазов различных морфологических типов и разновидностей, %									
	Кристаллы I разновидности						Кристаллы разновидностей			
	всего	октаэдры	додекаэдриды		комбинационные кристаллы		II, III	IV	V	VIII
			уральского типа	якутского типа	ОД	ОДК				
Ботубинская	90	29	0,3	31	21	4	0	9	0	1
Нюрбинская	88	33	3	20	28	3	0	10	0	2
Мир	98	61	0	10	27	0	0	0	0	2
Интернациональная	98	70	0	5	23	0	0	1	0	1
Комсомольская	92	25	11	33	22	1	0,2	2	0	4
Юбилейная	76	24	10	22	17	0	3,2	5	2	10
Удачная	88	21	10	32	24	1	3,5	0,5	0	8

Примечание. ОД — кристаллы комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями додекаэдрида; ОДК — кристаллы комбинационной формы с гранями октаэдра, поверхностями додекаэдрида и псевдокуба.

каэдры, кристаллы комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями псевдокуба и додекаэдроида, тогда как в трубках месторождений им. М.В. Ломоносова и им. В.П. Гриба такие кристаллы практически отсутствуют. Отметим, что среди кристаллов ЯАП с увеличением крупности сырья доля индивидов октаэдрической формы возрастает, а в ААП уменьшается до единичных находок.

Для большинства алмазов ААП характерно наличие следов растворения. Степень резорбции кристаллов алмаза в трубках месторождения им. М.В. Ломоносова заметно выше, чем кристаллов из трубки им. Гриба. В телах Зимнебережного района установлено два вида растворения кристаллов алмаза. Слабое повсеместное растворение кристаллов в трубке им. Гриба привело к появлению отрицательных треугольных фигур, тонкого послыоного растворения, к округлению их вершин и ребер. В трубке им. Карпинского-1 проявилось более агрессивное повсеместное и локальное растворение кристаллов со значительным преобразованием плоскогранных

форм в округлые, а также с развитием коррозионных поверхностей (ямки, глубокие каверны, шрамы и т.д.). Широкое развитие следов окислительного растворения кристаллов, аномально высокое содержание додекаэдроидов (округлые кристаллы) в трубке им. Карпинского-1 и слабоалмазоносных трубках Золотицкого поля указывает на длительное пребывание алмазов в агрессивном водно-солевом флюиде, в отличие от кристаллов из трубки им. Гриба, где условия образования и нахождения алмаза были менее окислительными. Этот вывод согласуется с данными работы [Гаранин, 2006].

В трубке Пионерская, по данным работы [Кудрявцева и др., 2005], установлена вертикальная зональность распределения кристаллов, на глубоких горизонтах отмечено присутствие следов более сильного растворения, чем в верхних. Это проявляется в наличии сложных скульптур рельефа и многочисленных аксессуариев растворения. По-видимому, вследствие агрессивного растворения резко снизилось число кристаллов в породах глубоких горизонтов, они полностью отсутствуют на глубине более 500 м.

Трубки Снегурочка, Кольцовская, Первомайская характеризуются преобладанием крупных кристаллов с многочисленными глубокими кавернами, точечными ямками, это указывает на то, что они пребывали в агрессивных водно-солевых условиях, способствовав-

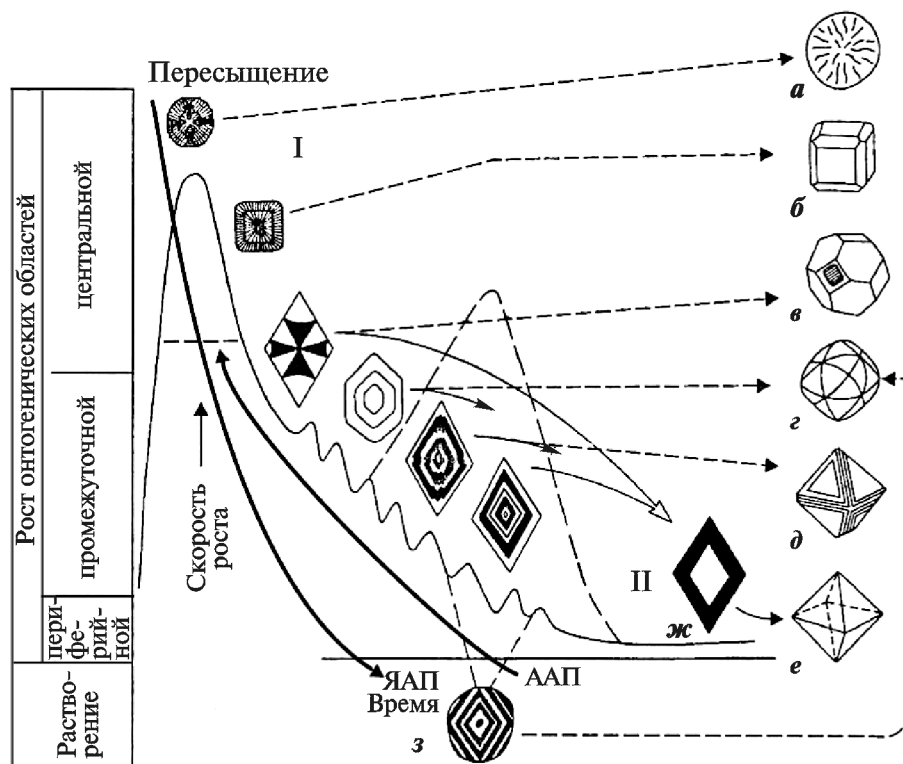


Рис. 1. На схеме кристалломорфологической эволюции природных алмазов В.В. Бескрованова [Бескрованов, 2000] стрелками показаны преимущественные направления развития форм кристаллов ААП и ЯАП: а — сфероид, б — куб с небольшими гранями ромбододекаэдра, в — кубооктаэдр; г — округлая форма, д — грубослойный октаэдр, е — островершинный октаэдр, ж — рост периферической области, з — образование округлых кристаллов в результате частичного растворения; I — преимущественно нормальный, II — преимущественно тангенциальный механизм роста

ших полному растворению части мелких кристаллов и образованию сложного рельефа на поверхности крупных.

На кристаллах из изученных тел ЯАП следы процессов растворения незначительны (тонкая штриховка, единичные аксессуарии), так как хорошо прослеживаются начальные ростовые формы и послыоный рост граней. Наиболее ярко следы процессов растворения проявлены на кристаллах из Далдыно-Алакитского района (матовая поверхность 15% алмазов в трубке Удачная, сравнительно большее число додекаэдроидов, чем среди алмазов из Мирнинского поля).

Однородность строения. Около половины алмазов из месторождений ААП имеют однородное строение. Для месторождения им. М.В. Ломоносова характерны зональные, зонально-секториальные алмазы с тенденцией к смене более ранних послыоно-октаэдрических форм на кубоидные с волокнистым строением. При этом часто проявляется многократная зональность, что составляет типоморфную особенность алмазов ААП. Для кристаллов из трубок Центральной Якутии типичнее обратный тип зональности: кубоид или кубооктаэдр → октаэдр [Бескрованов, 2000]. При этом для кристаллов из трубок Ботуобинская, Нюрбинская, Комсомольская характерно преобладание однородных алмазов (60–75%), алмазы из Далдыно-Алакитского

и Малоботуобинского районов, как правило, в большинстве зональны, но зональность 2–3-кратная (немногokратная).

Сопоставление результатов исследования методом лазерной томографии алмазов из трубок Ботуобинская, Нюрбинская и месторождений Малоботуобинского района свидетельствует о более однородном распределении характеристик фотолюминесценции в трубках. Однородное свечение преобладает в алмазах из трубок Ботуобинская (72%), Комсомольская (72%), Нюрбинская (70,9%), Юбилейная (51%) и составляет около 1/3 в остальных изученных телах. В трубках Мир, Интернациональная и других около 62–66% всех индивидов характеризуется тем или иным типом зональности в распределении центров фотолюминесценции по объему кристаллов.

Онтогенетическая схема эволюции кристаллов алмаза (рис. 1), предложенная В.В. Бескровановым [Бескрованов, 2000], иллюстрирует тренды развития кристаллов в алмазах из Архангельской и Якутской алмазоносных провинций.

Фотолюминесценция. Около 50% алмазов из трубки им. Карпинского-1, характеризующей месторождение им. М.В. Ломоносова, не обладают люминесцентным свечением. Зеленый цвет люминесценции (центры N3, N4) характерен для 11% (от всех кристаллов коллекции) кристаллов, для 4% кристаллов отмечена желтая люминесценция, вызванная наличием центров S2, S1, S3. Кристаллы с сине-голубым свечением (центр N3) составляют 9% (табл. 3).

В трубках Архангельская, им. Карпинского-1 и им. Карпинского-2 преобладают индивиды с желтой и желто-зеленой люминесценцией (типы спектров с центрами свечения S1, S3 [Богатиков и др., 1999]). Такой набор линий нехарактерен для алмазов из ЯАП. Второе отличие спектров кристаллов из месторождения им. М.В. Ломоносова — отсутствие на спектрах основной линии 523,3 нм, соответствующей наличию примесного центра S2 (желто-зеленая область).

Для трубок им. Ломоносова и Пионерская характерно повышенное содержание додекаэдрических алмазов с сине-голубой и фиолетовой люминесценцией (табл. 3) с пятнистым и зональным свечением (центр свечения N3). Число алмазов, светящихся желтым и желто-зеленым цветом, небольшое.

Алмазы из трубки Снегурочка имеют голубую, розово-желтую, желтую люминесценцию. Преобладающее желтое свечение обычно связано с наличием в кристаллах центров пластической деформации, в целом оно характерно для алмазов из месторождения им. М.В. Ломоносова. Наличие алмазов с розовой люминесценцией, вероятно, может свидетельствовать о потенциальной (начальной) промышленной алмазоносности трубки (впоследствии сниженной из-за процессов растворения), так как такое свечение обычно характерно для высокопродуктивных тел ЯАП.

Трубка им. Гриба выделяется из других трубок ААП самой высокой относительной долей алмазов с

Таблица 3

Распределение алмазов из трубок месторождений ААП по цвету фотолюминесценции

Цвет фотолюминесценции	Число алмазов, %						
	им. Ломоносова	Пионерская	Поморская	Архангельская	им. Карпинского-1	им. Карпинского-2	им. Гриба
Голубой	38,7	40,1	27,5	8,9	7,1	22,5	62,5
Розово-сиреневый	10,2	18,4	16,4	18,7	25,4	14,8	0,0
Фиолетовый	—	—	—	—	—	—	—
Желто-зеленый	30	20	27	37	41	36	0,0
Желтый	2,2	2,3	6,8	1,4	5,1	7	12,5
Зональный желто-оранжевый	2,2	0,0	2,9	2,3	2,1	0,9	2,5
Красно-оранжевый	6,6	4,6	4,8	2,3	3,1	0,9	0,0
Зеленый	1,5	1,2	12,1	19,1	12,2	7,8	12,5
Зеленая оболочка, синее ядро	8,8	13,8	2,3	10,3	4,1	10,4	10,0

голубым и фиолетовым свечением (~62%), 7 и 12,5% кристаллов обладают желтой и зеленой люминесценцией соответственно. Приблизительно 1/5 алмазов не люминесцирует. По особенностям фотолюминесценции алмазы из трубки им. Гриба наиболее близки к алмазам из трубок Пионерская (табл. 3) и им. Ломоносова [Кудрявцева и др., 2005], а также схожи с алмазами из трубок Мирнинского поля ЯАП [Зинчук, Коптиль, 2003].

Практически все кристаллы из трубок ЯАП (96%) обладают свечением в ультрафиолетовом диапазоне, распределение по цветам люминесценции приведено в табл. 4. Алмазы из высокопродуктивных месторождений Якутии характеризуются преобладанием розово-сиреневой и фиолетовой люминесценции со смещением в фиолетовую область в алмазах из Накынского поля и в оранжевую из Мирнинского поля (трубка Интернациональная). В промышленно алмазоносных трубках преобладают алмазы с голубым свечением. Низкое содержание индивидов с желто-зеленым цветом люминесценции (до 5%) подтверждает высокую алмазоносность изученных тел.

Среди алмазов из Накынского поля высок процент кристаллов с визуальным однородным строением, причем около 70% этих алмазов обладают фиолетовым свечением. В трубке Ботуобинская наиболее многочисленна группа кристаллов с фиолетовой фотолюминесценцией (97%), которая вызвана свечением N3-дефекта и полосой с малым временем жизни с максимумами около 630–640 (предположительно дефект 575 нм) и 700–710 нм (дефект 640 нм). Отмечена тенденция к увеличению интенсивности красной составляющей в спектре фиолетового свечения с повышением общего содержания азотных дефектов, в частности содержания А-, В-дефектов

Таблица 4

Распределение алмазов из трубок месторождений ЯАП по цвету фотолюминесценции

Цвет фотолюминесценции	Число алмазов, %						
	Ботубинская	Нюрбинская	Мир	Интернациональная	Комсомольская	Юбилейная	Удачная
Голубой	14	20	18	9	57	27	45
Розово-сиреневый	1	42	40	38	14	24	15
Фиолетовый	56	3	0	0	0	0	0
Желто-зеленый	21	21	1	0	8	31	12
Желтый	2	6	4	2	6	2	2
Оранжевый	1	1	11	30	0	0	0
Зеленый	0	0	18	5	12	7	18
Нет	4	4	8	6	3	9	7
Неопределенный	1	3	0	10	0	0	0

и Р. Фотолюминесценция алмазов из Накынского поля по сравнению с люминесценцией алмазов из трубки Мир визуально воспринимается как неяркая, «блеклая» [Зинчук, Коптиль, 2003].

Фотолюминесценция алмаза из Мирнинского поля специфична; как правило, это зональные кристаллы с зеленым фантомом внутри (нормальный механизм роста) и периферийной зоной с розовым свечением (тангенциальный механизм роста). Среди кристаллов из этой группы трубок редки индивиды с голубой или желто-зеленой люминесценцией.

Для алмазов из трубки Мир наблюдается тесная корреляционная связь примесного азота в форме А-центра с их фотолюминесценцией. В частности, пониженное содержание азота в А-форме ($N_A=200\div300$ at. ppm) характерно для кристаллов с сине-голубой, желтой и зеленой фотолюминесценцией, для некоторых из них установлено присутствие центра N3 в комбинации с центром N3, а образцы с розово-сиреневым свечением обладают высоким содержанием азотных дефектов.

Большинство изученных спектров фотолюминесценции алмазов из трубки Удачная представлено сине-голубым свечением — самым распространенным для алмазов из месторождений ЯАП. Реже встречаются кристаллы с розово-сиреневой, зеленой, желтой и оранжевой или очень слабой люминесценцией.

В трубке Юбилейная зафиксирован высокий процент визуально однородных по строению и свечению индивидов (около 50%), а также кристаллов, в которых зарегистрирован розовый компонент (центры 640, 575 нм) в спектрах фотолюминесценции (24% алмазов с розово-сиреневым свечением). Реже встречаются кристаллы с желтым, оранжевым, нередко с зональным распределением свечения, а также нелюминесцирующие кристаллы. Около 1/3 алмазов обнаруживают фантом в центральной зоне. Кристал-

лы с синим свечением имеют высокую концентрацию общего содержания азота, а с розовым — большие значения коэффициента полос В- и Р-центров в спектрах поглощения.

Более 1/2 кристаллов из трубки Комсомольская характеризуются голубой фотолюминесценцией (60%), отмечено довольно высокое содержание кристаллов с зеленым (12%) и розово-сиреневым (14%) свечением. Реже встречаются кристаллы с желтой фотолюминесценцией (6%), в основном это индивиды II и III разновидности.

Спектроскопия электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Исследование алмазов из двух провинций показало, что данные о парамагнитных центрах, получаемые с использованием ЭПР-спектроскопии, — важный характеристический признак алмазов.

В кимберлитах месторождения им. М.В. Ломоносова выявлены кристаллы алмаза всех пяти групп по наличию основных парамагнитных центров, связанных с азотными дефектами и пластическими дислокациями [Минеева и др., 1996]. Эти группы первоначально выделены и установлены для кристаллов алмаза из якутских кимберлитов: 1) с доминирующим центром P1; 2) с доминирующим центром P2; 3) с доминирующим центром N2; 4) с центрами P2 и N2 одновременно; 5) без парамагнитных центров [Минеева и др., 1996].

Наблюдаемый набор дефектов в исследованных кристаллах из месторождения им. М.В. Ломоносова и соотношения между их концентрацией оказались достаточно типичны для подобных групп алмаза из других месторождений. Центр P1 — наиболее изученный и самый простой центр в алмазе. Он представляет собой изолированный атом N, замещающий атом углерода. В кристаллах I группы концентрация основного центра P1 сопоставима с таковой в якутских алмазах [Минеева и др., 1996].

Среди кристаллов из месторождения им. М.В. Ломоносова наиболее широко распространены индивиды с доминирующим центром P1 или без парамагнитных центров, реже встречаются кристаллы с преобладающими центрами P2 и N2.

Трубки им. Ломоносова и Пионерская схожи по распространению в них кристаллов с определенным набором парамагнитных центров. В трубке Пионерская присутствуют кристаллы, относящиеся к подгруппе с преобладанием центра P1, с минимальной степенью агрегации азотных дефектов. Алмазам из трубки им. Ломоносова присуща большая степень агрегации парамагнитных центров, чем алмазам из трубки Пионерская.

Трубка Поморская характеризуется полным отсутствием в кристаллах центров N2 и слабой степенью агрегации дефектов. К ее особенностям относится необычно высокое число кристаллов алмаза с низким значением соотношения концентрации центров P2 и P1, характеризующим степень агрегации примесных

атомов азота. Это может быть связано с тем, что на месторождении процессы посткристаллизационных трансформаций структурных дефектов были развиты слабее.

Алмазы из трубки им. Карпинского-1 характеризуются средним содержанием центров N2, связанных с дислокациями в кристаллах, такими же, как и в алмазах из других месторождений мира. Отличительная особенность алмазов из трубки им. Карпинского-1, как и всего месторождения им. М.В. Ломоносова, — высокая концентрация центров изолированных атомов азота P1 [Минеева и др., 1996; Палажченко, 2008].

Для алмазов из трубки им. Гриба характерно низкое (около 10%) содержание алмазов с преобладающим центром P1 (который характерен для кристаллов с желтой окраской). Большинству алмазов присуще наличие центров P2 агрегированных атомов азота, что хорошо согласуется с высокой степенью совершенства структуры этих кристаллов [Минеева и др., 1996]. Отметим, что концентрация центров P2 здесь на порядок ниже, чем в подобных алмазах из ЯАП, и не превышает $5 \cdot 10^{17}$ центров/г.

В группах алмазов с доминирующими центрами P2 и N2 (III и IV группы) концентрация основного центра соответствует таковой в кристаллах из ЯАП.

Повышенное содержание парамагнитного центра N2, связанного с пластическими деформациями, в кристаллах алмаза из трубки им. Гриба, отличает их от алмаза из месторождения им. М.В. Ломоносова [Палажченко, 2008]. Это, вероятно, обусловлено ничтожно малым содержанием ксенолитов катаклазированных ультрабазитов в трубках месторождения им. М.В. Ломоносова и широким распространением таких пород в трубке им. Гриба.

В кристаллах из месторождений им. В.П. Гриба и им. М.В. Ломоносова Ni-содержащие центры отсутствуют, что позволяет сделать вывод: это типовой признак для указанных месторождений ААП [Богатиков и др., 1999].

Среди округлых кристаллов преобладают типы спектров с центрами свечения S1 и S3. В спектре этих кристаллов часто наблюдается линия 523,8 нм, вероятно, принадлежащая самостоятельному центру. Такой набор центров свечения совершенно несвойствен кристаллам алмаза из трубок ЯАП.

При исследовании алмазов ААП методом ЭПР не обнаружены центры никеля, которые характерны для кристаллов из Центрально-Сибирской субпровинции.

В качестве типоморфных особенностей алмазов ЯАП можно использовать наличие следующих ЭПР-центров:

- только в алмазах из кимберлитовой трубки Юбилейная выявлены Ni-содержащие парамагнитные центры NE1, NE2, M1;

- в розово-фиолетовых алмазах из трубки Интернациональная присутствует центр M2, образующийся

в процессе пластической деформации при повышенной температуре [Минеева и др., 2009];

- в нескольких кристаллах алмаза из трубки Удачная отмечены сигналы от карбонатных минералов — кальцита и доломита. Значительное число кристаллов (50%) имеют центры, обусловленные пластической деформацией (N2, W7);

- наибольшее содержание алмазов с центрами P1 (100%) зафиксировано в трубке Интернациональная. В трубках Мирнинского поля наиболее высока доля кристаллов с центрами N2, W7, которые связаны с процессами пластической деформации в алмазах;

- трубка Комсомольская характеризуется низкой концентрацией наблюдаемых центров, незначительной шириной линий для большей части образцов. Среди этих алмазов отмечено наименьшее число индивидов с центром P1. То что в некоторых кристаллах фиксируется центр P2 и отсутствует центр P1, свидетельствует о достаточно высоком качестве кристаллов.

ИК-спектроскопия. При изучении дефектно-примесных центров азота (N_A , N_B), водорода (H) и плейтелетс (P) в алмазах выявлены некоторые черты сходства как между алмазами из месторождений одной провинции, так и между алмазами из ААП и ЯАП.

Алмазы из месторождений ААП характеризуются двуимодальным распределением примеси азота при доминировании А-центров; двух- и трехимодальным распределением примесей H и P; пониженным содержанием суммарного азота в мелких (<1 мм) кристаллах по сравнению с макрокристаллами. Кристаллы алмаза из трубок месторождений им. М.В. Ломоносова и им. В.П. Гриба характеризуются повышенным содержанием структурной примеси водорода и пониженным агрегированного азота.

Кристаллы из трубки им. Ломоносова отличаются от алмазов из остальных тел этого района пониженным содержанием азота в А- и В-формах и водорода и обнаруживают значительное сходство с кристаллами из трубки Зарница Далдыно-Алакитского района [Захарченко и др., 2002]. Так, главный максимум содержания азота в А-форме соответствует 145, в В-форме — 110 ат. ppm, H — $2,8 \text{ см}^{-1}$ [Богатиков и др., 1999]. По повышенной концентрации плейтелетс ($8,5 \text{ см}^{-1}$) алмазы из трубки им. Ломоносова схожи с кристаллами из трубок Снегурочка и им. Гриба.

Наиболее детально изучены на месторождении им. М.В. Ломоносова на сегодняшний день трубки им. Карпинского-1 и Архангельская, которые по составу и технологическим свойствам руд идентичны трубкам Пионерская, им. Ломоносова и им. Карпинского-2 [Богатиков и др., 1999; Палажченко, 2008]. В южных трубках Золотицкого поля содержание суммарного азота в алмазах ($N_A + N_B$) варьирует от 17 до 2900 ат. ppm и составляет в среднем для трубок им. Карпинского-1, Архангельская и Снегурочка 1240, 735, 604 ат. ppm соответственно.

Таблица 5

Концентрация структурных дефектов в алмазах из месторождений ААП

Название трубки	Число образцов	Концентрация азота, at. ppm			N _B , %	Плейтелетс, см ⁻¹	Водород, см ⁻¹
		N _A	N _B	N _{tot}			
им. Карпинского-1	44	1010 0–2200	250 0–990	1350 17–2720	18 0–60	2,5 0–19	1,6 0–7
Архангельская	220	524 2–1534	210 2–1775	735 19–2700	29 2–97	3,8 0–23	4,9 0–35
Снегурочка	37	370 25–1236	234 4–584	604 54–1612	40 3–74	9 0–28	4 0–21
Первомайская	28	233 18–457	196 6–529	429 24–985	41 5–68	7 0–29	3 0–21
Кольцовская	30	294 78–581	244 13–435	538 91–1015	43 12–56	10 1–24	2 0–12
им. Гриба	116	482 0–2309	286 0–1857	743 0–2840	35 0–65	8,5 0–32	0,8 0–5

Примечание. Над чертой — среднее значение, под чертой — минимальное и максимальные значения параметра.

Алмазы из трубок Поморская, им. Карпинского-1 и Архангельская выделяются самой высокой концентрацией азота в А-форме с главными максимумами содержания 1200, 1100, 950 at. ppm соответственно (табл. 5; рис. 2), более низкое значение концентрации характерно для алмазов из трубки Снегурочка (700 at. ppm). Для алмазов из перечисленных 4 трубок по содержанию азота в В-форме главный максимум отмечен около 150–170 at. ppm.

Содержание водорода (Н) в алмазах из трубки им. Карпинского-1 составляет до 7,6 см⁻¹ (в среднем 1,6 см⁻¹), концентрация плейтелетс (Р) в алмазах — до 20 см⁻¹ (в среднем 3,0 см⁻¹). Доля агрегированного азота (N_B, %) не превышает 30% [Хачатрян и др., 2008]. Более южные трубки Архангельская и Снегурочка отличаются повышенной долей агрегированного азота и высокими значениями концентрации водорода и плейтелетс (табл. 5; рис. 2).

В трубке им. Гриба содержание суммарного азота в алмазах (N_A+N_B) варьирует от 0 до 2840 at. ppm (в среднем 743 см⁻¹), водорода (Н) — до 5,5 см⁻¹ (в среднем 0,8 см⁻¹), плейтелетс (Р) — до 32,5 см⁻¹ (в среднем 8,5 см⁻¹) (табл. 5; рис. 2). Для алмазов из трубки им. Гриба характерно повышенное содержание плейтелетс и пониженное водорода, степень агрегированности азота (N_B, %) — до 60%. В трубке им. Гриба большее число кристаллов обладает низким содержанием азота, а в трубке им. Карпинского-1 — наоборот [Палажченко, 2008; Хачатрян и др., 2008] (рис. 2).

Для алмазов из трубки Мир характерна повышенная концентрация А-центра, в подавляющем большинстве превышающая 500 at. ppm. Доля суммарного азота составляет 1000–1700 at. ppm. Абсолютная концентрация В-дефекта в алмазах из трубки Мир находится примерно на уровне таковой для индивидов из трубки Удачная (табл. 6). Полученные данные свидетельствуют об относительно высокой степени агрегированности азота (N_B, %) в алмазах из кимберлитовых тел Далдыно-Алакинского района

(трубка Удачная) по сравнению с Малоботуобинским районом (трубка Мир). Так как повышенная концентрация В-дефекта обуславливает хрупкость алмазов [Бокий и др., 1986], то можно предположить, что прочность кристаллов из трубки Удачная будет заметно выше, чем из трубки Мир. По средним значениям содержания водорода, плейтелетс и процентного содержания азота в В-форме алмазы из трубки Мир наиболее близки к алмазам из трубки Интернациональная и сопоставимы с кристаллами из трубки Ботуобинская.

Для кристаллов алмаза из трубки Удачная установлено относительно низкое среднее содержание А-дефектов (50–500 at. ppm) при суммарной концентрации азотных дефектов 500–1000 at. ppm с бимодальным распределением и высоким содержанием Р (0–44, в среднем 10 см⁻¹).

Распределение алмазов из Алаakit-Мархинского поля по содержанию азота в В-форме, коэффициенту поглощения Р- и количеству Н-дефектов для мантийных источников этого поля схоже (табл. 6). Эта закономерность очевидна, так как кимберлитовые тела принадлежат к одному минерагеническому таксону, что способствовало кристаллизации большей

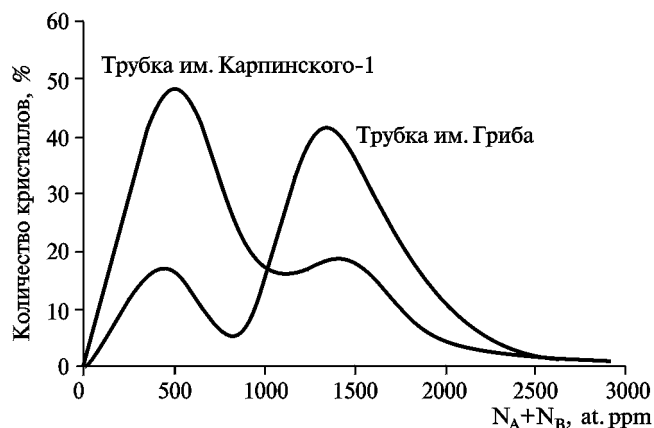


Рис. 2. Распределение алмазов с различной концентрацией дефектно-примесных центров азота в трубках ААП

Концентрация структурных дефектов в алмазах из месторождений ЯАП

Название трубки	Концентрация азота, ат. ppm			$N_B, \%$	Плейтелетс, см^{-1}	Водород, см^{-1}
	N_A	N_B	N_{tot}			
Комсомольская	$\frac{265}{8-851}$	$\frac{322}{0,4-1586}$	$\frac{588}{130-1916}$	$\frac{34}{21-87}$	$\frac{5}{0,1-12}$	$\frac{0,6}{0-8}$
Юбилейная	$\frac{272}{0-976}$	$\frac{286}{17-1121}$	$\frac{413}{17-1594}$	$\frac{41}{7-96}$	$\frac{8}{0-33}$	$\frac{1,0}{0-15}$
Удачная	$\frac{94}{0-464}$	$\frac{337}{7-1100}$	$\frac{431}{16-2305}$	$\frac{59}{9-96}$	$\frac{10}{0-44}$	$\frac{2}{0-33}$
Мир	$\frac{424}{8-1288}$	$\frac{177}{16-696}$	$\frac{562}{22-1700}$	$\frac{31}{8-95}$	$\frac{3}{0-17}$	$\frac{0,9}{0-9}$
Интернациональная	$\frac{493}{12-1066}$	$\frac{167}{16-474}$	$\frac{660}{30-1414}$	$\frac{26}{6-96}$	$\frac{3}{0-14}$	$\frac{0,6}{0-8}$
Ботубинская	$\frac{315}{9-1149}$	$\frac{116}{18-449}$	$\frac{405}{67-1598}$	$\frac{24}{4-61}$	$\frac{3}{0,1-19}$	$\frac{1,1}{0-15}$

Примечание. Над чертой — среднее значение, под чертой — минимальное и максимальные значения параметра.

части алмазов в схожих P - T -условиях. В трубках Комсомольская и Юбилейная доминируют алмазы с низким суммарным содержанием азотных дефектов (~ 550 ат. ppm).

Основная масса кристаллов из трубки Комсомольская обладает низкой степенью агрегированности азота (34%) с одномодальным распределением

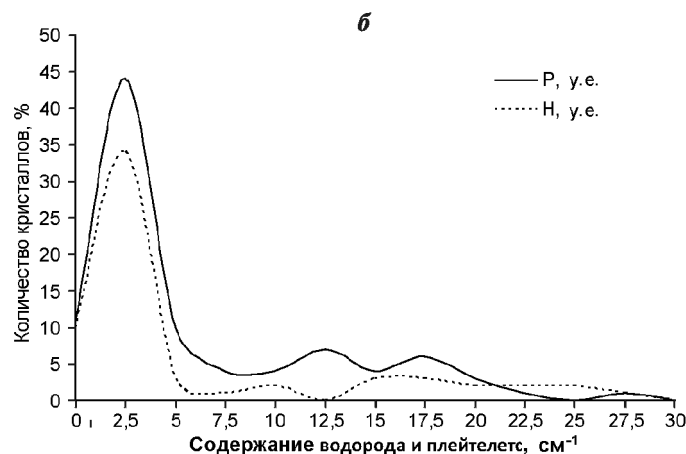
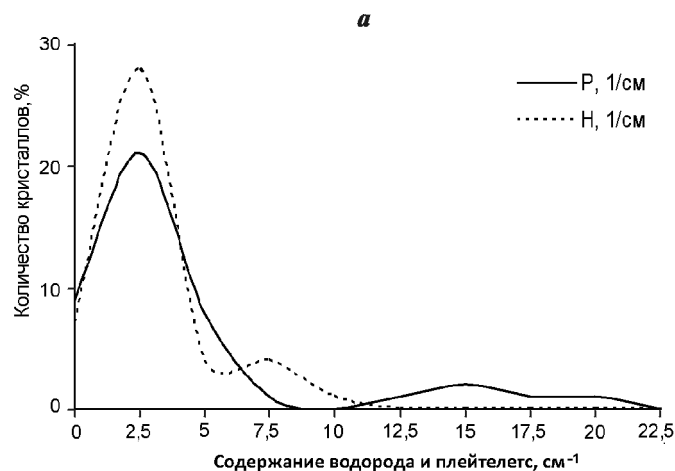


Рис. 3. Распределение алмазов с различной концентрацией дефектов водорода (Н) и плейтелетс (Р) в трубках ААП: а — трубка им. Карпинского-1; б — трубка им. Гриба

А-дефектов в ИК-спектре с интенсивными полосами плейтелетс; полоса водорода не регистрируется (или очень слабая).

Алмазы из трубки Юбилейная характеризуются наибольшим средним поглощением Р и Н. Для 20–40% кристаллов из трубки Юбилейная отмечено содержание азота в форме А-центра более 350 ат. ppm, около 10–25% алмазов имеют концентрацию более 350 ат. ppm азота в форме В-центра (табл. 6). Встречаются кристаллы, в спектрах которых доминируют В- и Р-полосы при отсутствии или малых значениях коэффициента поглощения системы А. Разнообразие содержания и соотношения основных форм азота может свидетельствовать о разных естественных термодинамических условиях, в которых происходила кристаллизация алмаза.

Отметим некоторые особенности распределения дефектно-примесных центров азота, водорода и плейтелетс в алмазах из исследуемых месторождений ААП и ЯАП (табл. 5, 6; рис. 2–5):

– в алмазах из тел ААП доля структурного азота невелика, преимущественно 10–30%, реже до 50%.

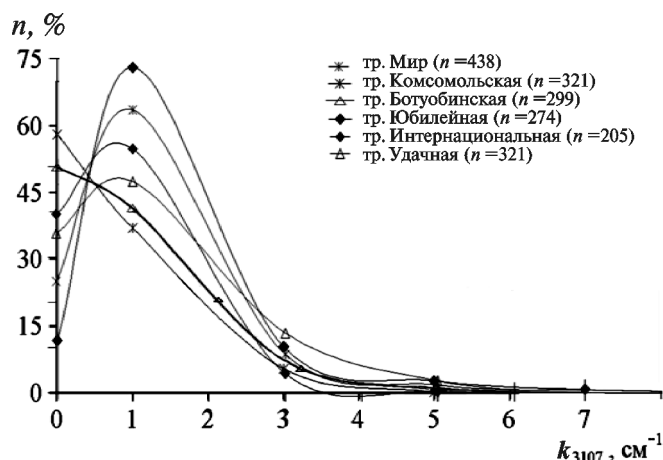


Рис. 4. Содержание алмазов с различной концентрацией дефектов водорода (Н) в трубках ЯАП

Алмазы из тел ЯАП характеризуются высокой долей структурного азота (50–95%) при подчиненном количестве кристаллов с содержанием азота 10–50%;

– алмазы ЯАП отличаются высоким содержанием азотных дефектов в В-форме при пониженном (относительно А-дефекта) и среднем содержании дефектов в А-форме, тогда как в ААП присутствуют кристаллы преимущественно с низким содержанием В-дефектов, варьирующим от 0 до 2200 at. ppm, относительно дефектов в А-форме. Эти данные представлены в табл. 6 и рис. 4, 5;

– в месторождениях Накынского поля (трубки Нюрбинская и Ботубинская) присутствуют низкоазотные кристаллы с вхождением азота в А-форме (до 400 at. ppm) при отсутствии или слабых В-, Р- и Н-дефектах;

– похожие особенности распределения оптически активных центров водорода и степени агрегированности азота установлены для алмазов октаэдрического габитуса из трубки им. Гриба и алмазов из трубки Мир и некоторых трубок Далдыно-Алакитского района;

– выделена большая группа кристаллов алмаза из трубки им. Гриба додекаэдрического и переходного габитуса, которые характеризуются низким содержанием структурной примеси Н при широкой вариации степени агрегации азота. Тем не менее кристаллы из ЯАП по степени агрегации азота значительно превосходят алмазы из месторождений ААП;

– в трубках Мирнинского поля концентрация водородных дефектов в алмазах минимальна ($<1 \text{ см}^{-1}$), в целом они схожи с кристаллами из месторождения им. Гриба, но при рассмотрении отдельных кристалломорфологических групп алмазы различимы;

– кристаллы из трубок Юбилейная и Комсомольская характеризуются широким диапазоном концентрации дефектов Р (0–43, среднее 13 и 19 см^{-1} соответственно) и водорода ($\text{H} < 8 \text{ см}^{-1}$).

Для некоторых месторождений удалось выявить закономерности в распределении концентрации азотных дефектов и их связь с кристалломорфологией и фотолюминесценцией алмазов.

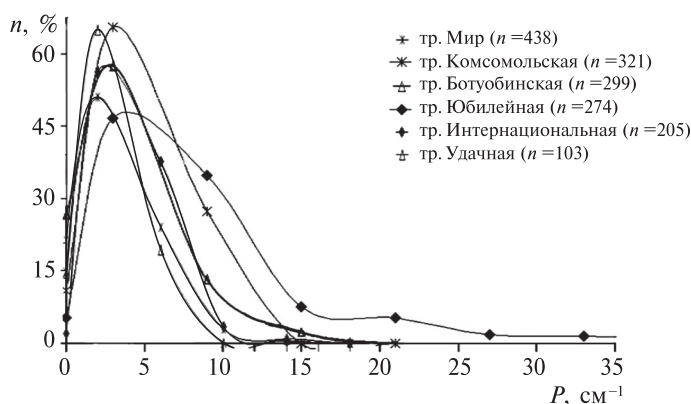


Рис. 5. Содержание алмазов с различной концентрацией плейтелетса (P) в трубках ЯАП

Октаэдры с тригональной формой граней. На месторождении им. В.П. Гриба во всех изученных кристаллах этой группы азот в А-форме доминирует над азотом в В-форме (2:1). Для большинства бесцветных октаэдров с тригональной формой граней содержание азота в А-форме не превышает 200 at. ppm, тогда как в соответствующих кристаллах с желтым нацветом оно варьирует от 300 до 500 at. ppm. Отмечена повышенная доля агрегированного азота и плейтелетса ($2-50\%$ и $0-14 \text{ см}^{-1}$) при очень низких значениях содержания водорода [Копчиков, 2009].

В спектрах ИК-поглощения октаэдров из трубки Мир система А-центра резко доминирует над полосами В- и Р-дефектов (3:1:0,6), коэффициент поглощения варьирует от 230 до 825 at. ppm. Значения коэффициента поглощения водорода не превышают 1 см^{-1} . Для алмазов из трубки Интернациональная наблюдается соотношение полос основных дефектов, составляющее 5:1:0,5.

В трубках Накынского поля октаэдрические кристаллы, как правило, имеют фиолетовый цвет фотолюминесценции, в спектрах ИК-поглощения регистрируются полосы А- и В-дефектов с коэффициентом поглощения от 380 до 790 at. ppm.

Октаэдры из трубки Мир обладают преимущественно розовой фотолюминесценцией, тогда как в трубке им. Гриба большинство кристаллов имеет голубое свечение, а в трубке им. Карпинского-1 — желто-зеленое.

Алмазы комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями додекаэдроиды. Алмазы из трубки им. Гриба отличаются более высокой концентрацией всех структурных дефектов (N_{tot} — до 2000 at. ppm, N_A — 500 at. ppm, N_B — 300 at. ppm) и повышенной степенью агрегированности азота (В) — до 37%. В окрашенных (желтые, зеленые, голубые, серые) кристаллах дитригональной формы содержание структурного азота выше, чем в таковых, но бесцветных.

В трубке Мир кристаллы комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями додекаэдроиды характеризуются наличием фантомов с желто-зеленым свечением фотолюминесценции, они содержат системы поглощения А-, Н-, редко В-центров. Коэффициент поглощения А-полосы не превышает 230 at. ppm, полосы 3107 — от 0,5 до 6 см^{-1} .

Додекаэдроиды. Додекаэдроиды из трубки им. Гриба характеризуются повышенной концентрацией водородных центров ($0-15 \text{ см}^{-1}$) и средней структурных дефектов в А- и В-форме (N_{tot} — до 2000, N_A — 500, N_B — 300 at. ppm, N_B — 37%).

Додекаэдроиды из трубки Мир обладают преимущественно синим свечением, различной концентрацией А-дефектов при подчиненном количестве В-дефектов с высокой степенью агрегации азота и большими значениями коэффициента поглощения плейтелетса.

Алмазы кубического габитуса отличаются от кристаллов других морфологических разновидностей

Популяции алмазов из месторождений ААП

Популяция		N_A , at. ppm	N_B , at. ppm	N_{tot} , at. ppm	N_B , %	H , см ⁻¹	P , см ⁻¹
«Безазотные»		0–180	0–180	0–350	35	0–1	0–10
Низкоазотные		220–350	220–350	600	47–50	0–3	0–10
Средне-азотные	1-й подтип	370–860	120–430	800	10–30	3–6	0–10
	2-й подтип	370–860	370–860	800–1600	40–45	3–6	7–24
Высокоазотные		700–1500	< N_A	850–1700	0–28	3–7	0–1,5; 7–20

максимальными и средними значениями концентрации А-центров. Нормальный механизм роста кубических кристаллов обуславливает отсутствие в них агрегированного азота и плейтелетс, тем не менее в алмазах кубического и тетрагексаэдрического габитуса из трубок Архангельская и им. Карпинского-1 зафиксирована минимальная концентрация В-дефекта, что связано с чередованием секторов роста октаэдра и куба.

Анализ данных, полученных при изучении дефектно-примесного состава методом ИК-спектроскопии, свидетельствует, что в ААП в основном присутствуют алмазы, относящиеся по физической классификации преимущественно к типу IaAb с весьма незначительным содержанием азота в В-форме. По этому параметру алмазы из ЯАП делятся на две группы. В первой доминируют кристаллы с малой долей азота в В-форме, во второй одинаково распро-

странены алмазы с пониженной (<40%) и повышенной (>60%) степенью агрегации азота в В-форме. Нами выявлены главные критерии отличия алмазов ААП и ЯАП, имеющих основную долю азота в А-форме. Ранее для алмазов из месторождений ААП выделены 4 популяции [Палажченко, 2008; Копчиков, 2009] от малоазотных до высокоазотных (табл. 7) кристаллов.

Алмазы, соответствующие этим типоморфным параметрам, встречаются и в ЯАП, при этом вариация соотношения дефектов в алмазах из месторождений ЯАП значительно шире.

В каждом из исследованных месторождений выделен свой тренд распределения дефектно-примесных центров в алмазах, это наглядно демонстрируют трехмерные диаграммы зависимости содержания центров азота, водорода и плейтелетс (рис. 6, 7).

Заключение. Алмазы из трубки им. Гриба по комплексу типоморфных особенностей имеют много общих черт с кристаллами из трубки Удачная, вместе с тем наблюдаются значимые отличия. В кристаллах алмаза из трубки Удачная, во-первых, более распространены сульфидные включения; во-вторых, выявлено низкое содержание дефектов азота, водорода и плейтелетс; в-третьих, установлена значительная концентрация центров W21 (по данным ЭПР), ответственных за пластические деформации кристаллов; в-четвертых, отмечен более легкий изотопный состав

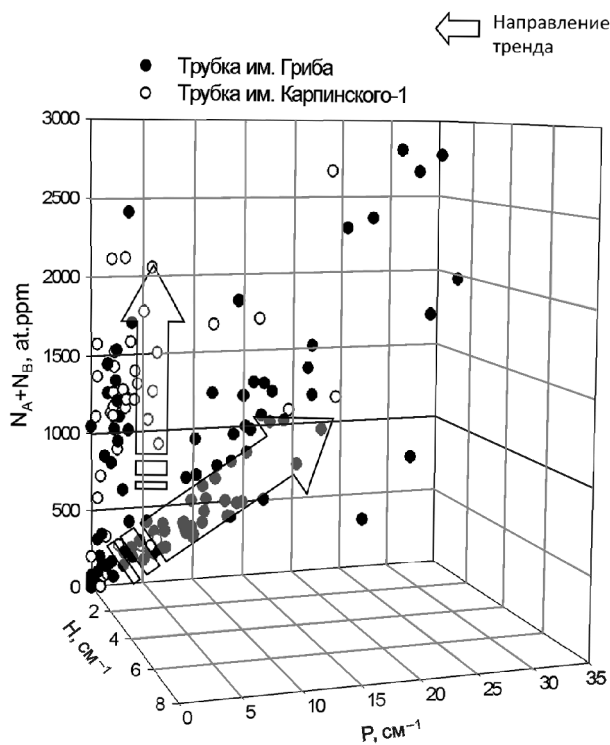


Рис. 6. Трехмерная диаграмма зависимости концентрации дефектно-примесных центров азота от содержания водорода и плейтелетс в алмазах из трубок ААП им. Карпинского-1 и им. Гриба [Палажченко, 2008]

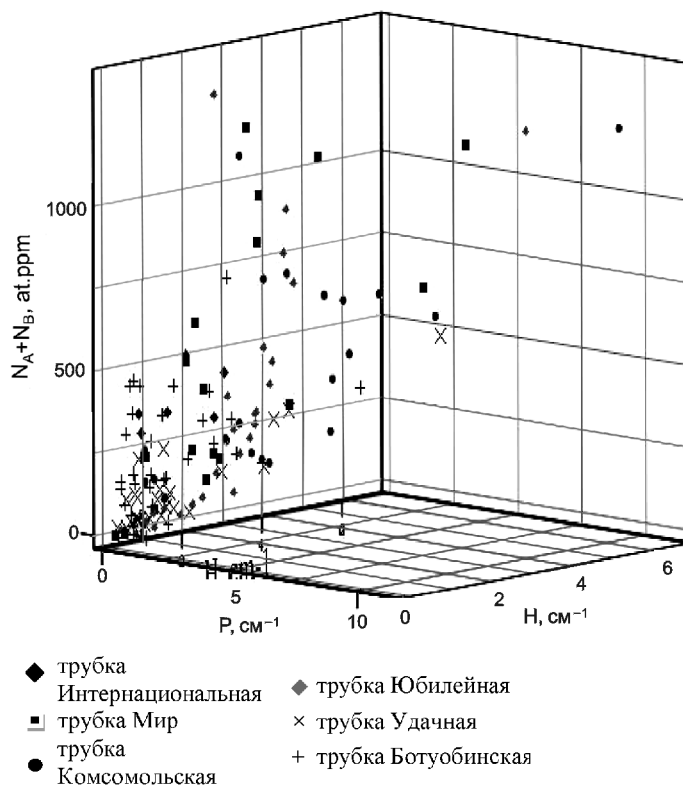


Рис. 7. Трехмерная диаграмма зависимости концентрации дефектно-примесных центров азота от содержания водорода и плейтелетс в алмазах из трубок ЯАП

углерода и, наконец, присутствуют включения эклогитового парагенезиса.

К типоморфным особенностям алмазов из трубок Мир и им. Гриба относятся: 1) преобладание включений ультраосновного парагенезиса и подчиненное количество (<0,2%) эклогитового, 2) высокое содержание азота в А-форме (500–1200 ат. ppm), 3) наличие в обеих трубках только алмазов типа IaAB с пониженной долей азота в В-форме. Содержание примесей водорода и плейтелетс различны: в трубке им. Гриба преобладают кристаллы со значимым количеством Р (0–32,5) и меньшим Н (0–5,5), в то время как в трубке Мир низкие показатели отмечены для Р (<17 см⁻¹) и более высокие для Н (до 9 см⁻¹). Отличия заключаются в абсолютном преобладании в трубке Мир октаэдрических форм кристаллов и в большей распространенности дымчато-коричневых индивидов, окраска которых обусловлена проявлением процессов пластической деформации.

Кристаллы алмаза из трубок Комсомольская и им. Гриба сходны по качественным и морфологическим параметрам, но в первой преобладают кристаллы с низким содержанием структурно-примесных дефектов азота и плейтелетс, с более высокой степенью агрегированности азота и присутствием включений сульфидов.

Сходство алмазов из трубок им. Карпинского-1 и Нюрбинская определяется наличием включений эклогитового парагенезиса. Однако отличаются морфология кристаллов, цветовые характеристики, цвет фотолюминесценции и содержание в них примесных дефектов. Можно предположить, что условия образования алмаза в трубке Нюрбинская

(возможно, более высокая температура мантийного субстрата) определили преобладание октаэдрических и комбинационных форм I разновидности, а смена условий — присутствие значительного числа индивидов IV разновидности. Возможно, в трубке им. Карпинского-1 в результате длительного воздействия окислительных флюидов происходило более интенсивное растворение кристаллов и ухудшение их сохранности. Состав мантийного субстрата в этих трубках был гетерогенным, со значительным участием эклогитовой составляющей.

По результатам исследований можно заключить, что содержание азота, соотношение его концентрации в А- и В-формах, степень его агрегации являются важными типоморфными параметрами, позволяющими в совокупности охарактеризовать каждое месторождение алмаза. Полученные нами новые усредненные типоморфные признаки алмаза по изученным месторождениям двух провинций не противоречат ранее опубликованным данным об отдельных месторождениях, но имеют некоторые новые особенности, обусловленные, вероятно, характером сырья и способом его отбора.

Установлено содержание и соотношение основных форм азота в представительных коллекциях кристаллов алмаза для каждого изученного месторождения Якутской и Архангельской алмазоносных провинций. Разработки отечественных и зарубежных исследователей позволили оценить термодинамические условия кристаллизации алмазов и разное время нахождения их в разогретых слоях мантии, откуда их выносил кимберлитовый транспортер. Последнее согласуется с теорией взаимной трансформации азотных дефектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бескрованов В.В. Онтогенез алмаза. Новосибирск: Наука, 2000. 264 с.

Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. Архангельская алмазоносная провинция М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999. 522 с.

Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А. и др. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986. 221 с.

Гаранин В.К. Минералогия кимберлитов и родственных им пород алмазоносных провинций России в связи с их генезисом и поисками: Автореф. докт. дисс. М.: МГУ, 2006. 50 с.

Захарченко О.Д., Махин А.И., Хачатрян Г.К. Атлас «Типоморфные свойства алмазов Восточно-Европейской платформы (месторождение им. М.В. Ломоносова)». М.: ЦНИГРИ, 2002. 104 с.

Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2003. 603 с.

Копчиков М.Б. Типоморфные особенности алмаза Архангельской алмазоносной провинции: Автореф. канд. дисс. М.: МГУ, 2009. 27 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.

Минеева Р.М., Бершов Л.В., Сперанский А.В. и др. Первые сведения об особенностях парамагнитных центров в кристаллах алмаза из кимберлитов Архангельской провинции // Докл. РАН. 1996. Т. 348, № 5. С. 668–670.

Минеева Р.М., Титков С.В., Сперанский А.В. Структурные дефекты в природных пластически деформированных алмазах по данным ЭПР-спектроскопии // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51, № 3. С. 261–271.

Палажченко О.В. Алмаз из месторождений Архангельской алмазоносной провинции: Автореф. канд. дисс. М.: МГУ, 2008. 24 с.

Хачатрян Г.К., Палажченко О.В., Гаранин В.К. и др. Генезис «неравновесных» кристаллов алмаза из кимберлитовой трубки им. Карпинского-1 по данным катодной люминесценции и ИК-спектроскопии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2008. № 2. С. 38–45.

Поступила в редакцию
26.10.2010