

УДК 553.08

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-6-77-86

АЛМАЗЫ ТРУБКИ ПИОНЕРСКАЯ — МОРФОЛОГИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Галина Юрьевна Кriuлина¹✉, Сергей Васильевич Вяткин²,
Леонид Даниилович Бардухинов³, Елена Михайловна Седых⁴,
Михаил Борисович Копчиков⁵, Виктор Константинович Гаранин⁶

¹ Московский государственный университет имени имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; g9671844057@gmail.com ✉

² Московский государственный университет имени имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vyt_box@mail.ru

³ ВГРЭ АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Россия; BardukhinovLD@alrosa.ru

⁴ ВГРЭ АК «АЛРОСА» ПАО, Мирный, Россия; SedykhEIM@alrosa.ru

⁵ Московский государственный университет имени имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; msu@kopchikov.ru

⁶ Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, Москва, Россия; vgaranin@mail.ru

Аннотация. Алмазы трубки Пионерская, по сравнению с аналогичными минералами трубок Архангельская и им. Карпинского-1, сформировались при более высоких температурах, а также более длительное время находились в таких условиях (испытывали высокотемпературный отжиг). Трубка Пионерская имеет несколько меньшую продуктивность, однако более высокое качество алмазов, особенно в крупных размерных классах, также для нее выше доля октаэдров и высокопрозрачных кристаллов, не подверженных акцессорному травлению.

Ключевые слова: алмаз, трубка Пионерская, Архангельская алмазоносная провинция, ИК-спектроскопия, минералогия алмаза

Для цитирования: Кriuлина Г.Ю., Вяткин С.В., Бардухинов Л.Д., Седых Е.М., Копчиков М.Б., Гаранин В.К. Алмазы трубки Пионерская — морфология, спектроскопия, перспективы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 6. С. 77–86.

DIAMONDS OF THE PIONERSKAYA PIPE — MORPHOLOGY, SPECTROSCOPY, PROSPECTS

Galina Yu. Kriuлина ✉, Sergey V. Vyatkin, Leonid D. Bardukhinov,
Elena M. Sedykh, Mikhail B. Kopchikov, Viktor K. Garanin

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; g9671844057@gmail.com ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vyt_box@mail.ru

³ PJSC ALROSA, Mirnyi, Russia; BardukhinovLD@alrosa.ru

⁴ PJSC ALROSA, Mirnyi, Russia; SedykhEIM@alrosa.ru

⁵ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; msu@kopchikov.ru

⁶ Fersman Mineralogical Museum RAS, Moscow, Russia; vgaranin@mail.ru

Abstract. Diamonds of the Pioneer pipe, compared with the Arkhangelsk and Karpinsky-1 pipes, formed at higher temperatures, as well as were in such conditions for a longer time (experienced high-temperature annealing). Pionerskaya pipe has slightly lower productivity, but higher quality of diamonds, especially in large size classes, it also has a higher proportion of octahedra and highly transparent crystals that are not subject to accessory etching.

Keywords: diamond, Pionerskaya pipe, Arkhangelsk diamondiferous province, IR spectroscopy, diamond mineralogy

For citation: Kriuлина G.Yu., Vyatkin S.V., Bardukhinov L.D., Sedykh E.M., Kopchikov M.B., Garanin V.K. Diamonds of the Pionerskaya pipe — morphology, spectroscopy, prospects. *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 6: 77–86. (In Russ.).

Введение. В составе месторождения имени М.В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции выделяются две группы трубок. Северная группа включает в себя трубки им. Ломоносова, Поморскую, Пионерскую и им. Карпинского-2. В Южную группу входят трубки Архангельская и им. Карпинского-1. Наиболее значительным по размерам алмазоносным телом среди них является трубка Пионерская (площадь поверхности 36,9 га), однако она пока не вовлечена в промышленную отработку.

На сегодняшний день активно разрабатываются трубки Архангельская и им. Карпинского-1, начато освоение одной из трубок Северной группы — им. Карпинского-2.

Экономическая целесообразность промышленной разработки алмазоносного месторождения оценивается по многим критериям, важнейшим из которых является адекватная оценка запасов — как по количеству, так по качеству сырья. При этом наибольшие проблемы, как правило, возникают

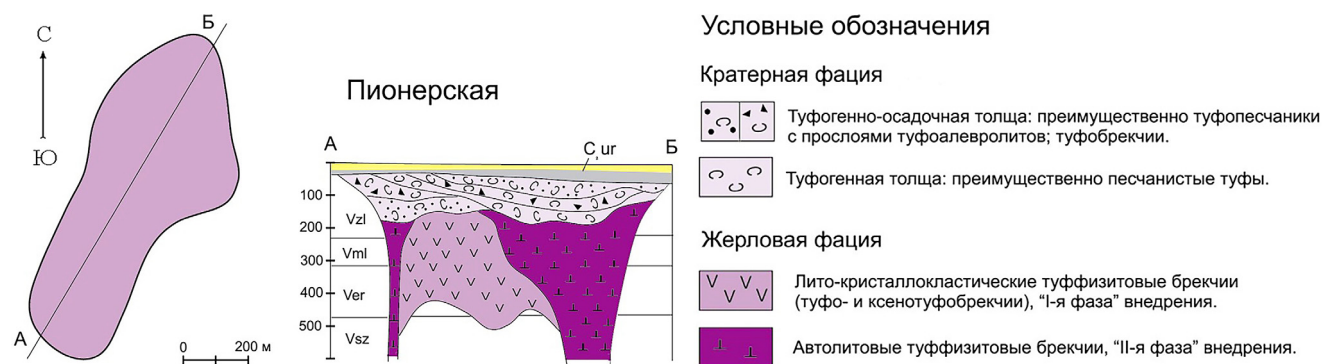


Рис. 1. Форма в плане и внутреннее строение кимберлитовой трубки Пионерская по [Garanin et al., 2021]

с определением реальной алмазоносности и прогнозом ее изменения с глубиной. В отличие от подавляющего большинства месторождений других видов полезных ископаемых, алмазоносные трубки отличаются очень низким содержанием полезного компонента — собственно алмазов, измеряемым обычно в каратах на тонну руды. Кроме того, ценность алмазного сырья сильно варьирует, она зависит от качества и непропорционально резко возрастает с увеличением размера кристаллов. Алмазы размерами <1,2 мм извлекать в процессе промышленной добычи малорентабельно, кристаллы всех размерно-весовых групп обычно извлекаются лишь в целях разведки и исследования месторождений. Основной вклад в окупаемость разработки трубки обычно вносят алмазы размерных групп –4+2 мм и выше. В то же время вероятность попадания крупных кристаллов в керн разведочных скважин низка, поэтому полученные при керновом опробовании результаты могут не отражать реальной статистики их содержания. Эти обстоятельства обуславливают высокую стоимость работ при разведке и оценке запасов месторождения, определяемую необходимостью выемки и обогатительной переработки значительных объемов породы.

После открытия трубки Пионерская в 1983 г. и первичных геологоразведочных работ, геологическое опробование скважинами проводилось в два этапа: в 2011–2014 и 2019–2021 гг. В результате работ в период 2011–2014 гг. (далее — 2014 г.) в сравнении с данными 1980-х и начала 1990-х годов установлена более высокая алмазоносность практически всех основных типов руд трубки Пионерская и существенно более высокая стоимость алмазного сырья. Это обусловило необходимость выполнения в 2019–2022 гг. (далее — 2021 г.) дополнительных разведочных работ по уточнению стоимостных параметров алмазов и их прогноза на глубину ее промышленной разработки. В ходе этих работ было выполнено бурение 5 скважин диаметром 279 мм, глубиной от 363 до 425 м и общей протяженностью 2045 п.м. Скважины были пробурены по породам туфогенной пачки и автолитовым брекчиям Северного рудного столба (правая часть разреза на рис. 1).

Данная работа посвящена описанию морфологических и спектроскопических свойств алмазов трубки Пионерская, а также, с целью оценки перспектив разработки трубки проведено сравнение полученных данных с характеристиками алмазов, промышленно добываемых на соседних трубках Архангельская и им. Карпинского-1.

Материалы и методы исследований. Для определения размерно-весовых характеристик кристаллов использованы данные, полученные для максимальной по количеству кристаллов выборки 2021 г. (более 5,5 тыс. шт.); а также данные о granulometрии выборки кристаллов 2014 г. добычи (более 4,8 тыс. шт.). В дальнейших исследованиях, особенно спектроскопических, были использованы меньшие по количеству выборки кристаллов, подобранные по статистически представительным минералогическим группам. При этом там, где объединение выборок могло исказить результат, распределения алмазов по свойствам производились по группам аналогичных классов крупности. Кроме того, были введены дополнительные ограничения. Распределения по размерно-весовым группам, используемые для выявления преобладающих в трубке классов, производились без учета механических осколков и обломков; распределения по габитусу рассчитаны без учета кристаллов неопределенной формы; полученные значения спектроскопических параметров несколько скорректированы в сторону увеличения доли прозрачных и просвечивающих кристаллов, пригодных для инфракрасной, фотолюминесцентной спектроскопии.

Минералогическое описание алмазов сделано под бинокляром «Motic» SMZ-143 с УФ осветителем-боксом (365 нм). ИК-спектроскопические исследования алмазов проводились на ИК-Фурье спектрометре Bruker VERTEX 70 в комплексе с ИК-микроскопом Hyperion 2000. Нормирование спектров осуществлялось по поглощению в двух-фонной области [Бокий и др, 1986, Zaitsev, 2001], определялись концентрации C-, A-, B1-, B2-дефектов алмазов. Спектры ФЛ регистрировались на спектрометре InVia (Renishaw) с возбуждением лазерами 488 и 785 нм с ×5 объективом при температуре 77 К.

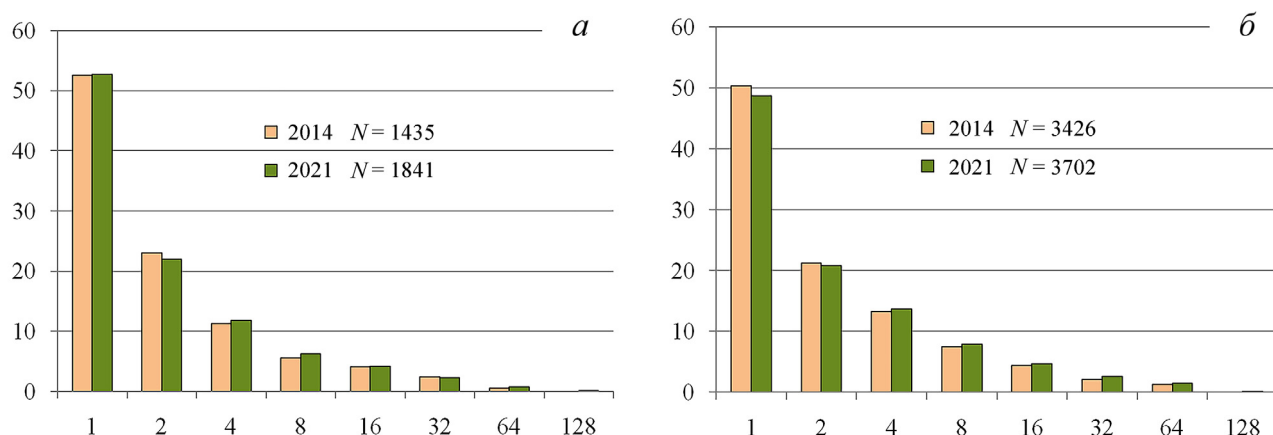


Рис. 2. Распределение по весовым разрядам (мг, в % по количеству) алмазов 2014 и 2021 гг. добычи для трубки Пионерская: из туфогенных пород кратера (а), и из автолитовых брекчий жерловой фации (б). N — количество алмазов в выборке, штук. Рассчитано без учета техногенных осколков

Систематика структурных дефектов дана согласно [Dischler, 2013; Zaitsev, 2001].

Результаты исследований. Распределение по весовым разрядам алмазов трубки Пионерская, извлеченных из туфогенных пород кратера и из автолитовых брекчий жерловой фации приведено на рис. 2. Для алмазов, добытых в 2014 и 2021 г., оно является весьма сходным. И в первом и во втором случае более 70% (суммарно разряды <1,00 мг и от 1,01 до 2,00 мг) составляют кристаллы массой до 2 мг; более 90% (суммарно) составляют кристаллы массой до 8 мг; кристаллы массой от 8 до 32 мг составляют лишь около 8%; и менее 2% приходится на кристаллы массой более 32 мг.

Напротив, существуют различия в гранулометрических характеристиках алмазов по фациям внедрения кимберлита (рис. 3, а). Так, для алмазов из автолитовых брекчий жерловой фации, по сравнению с алмазами туфогенных пород кратера, увеличивается доля кристаллов класса $-2+1$ мм с 20,2%

до 23,9% (по количеству), а также доля кристаллов класса $-4+2$ мм с 2,9% до 3,6% (по количеству). Следует отметить, что по массе кристаллов это основные размерные классы для алмазов трубки (рис. 3, б).

Основные минералогические характеристики алмазов трубки Пионерская — габитус, характер образования, окраска, свечение в УФ лучах, спектроскопические параметры — рассмотрены в данной работе при их разделении по фациям.

По морфологическим признакам алмазы трубки Пионерская (рис. 4) имеют сходное распределение для кристаллов туфогенных пород кратера и автолитовых брекчий жерловой фации. Суммарно по всем размерно-весовым группам преобладают додекаэдрониды (в кратерной фации — 56%, в жерловой — 55%), большинство из которых тонкослоистые, с занозистой, сноповидно-занозистой штриховкой, а также пластически деформированные, с шагреновой и блоковой скульптурами. Реже

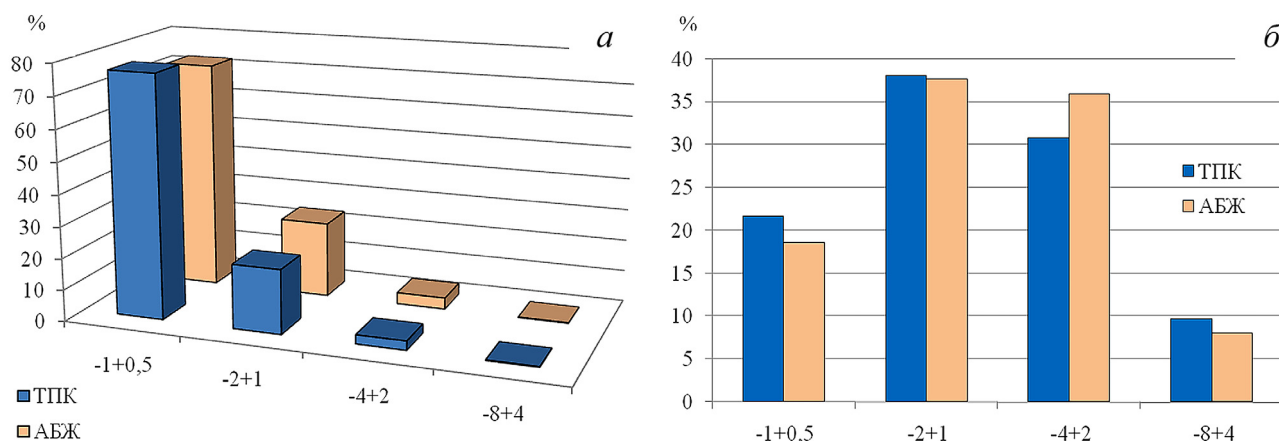


Рис. 3. Распределение по классам крупности (мм) алмазов для трубки Пионерская: а — в процентах по количеству, б — в процентах по массе. ТПК — алмазы из туфогенных пород кратера (выборка 3276 шт.); АБЖ — из автолитовых брекчий жерловой фации (выборка 7128 шт.)



Рис. 4. Алмазы трубки Пионерская: *a* — бесцветный додекаэдр с небольшим уплощением по оси L_3 и концентрической штриховкой; *б* — кривогранный сросток (типа «шпинелевый двойник») с многочисленными швами двойникования; *в* — тетрагексаэдр с реликтами поверхностей куба, пониженной прозрачностью и микровключениями типа Cloud; *г* — додекаэдр с глубоким каналом травления «поморского типа», проходящим в объеме до центральной зоны кристалла; *д* — типичные алмазы ряда октаэдр-додекаэдр желтого цвета диагонального тренда; *е* — алмаз фиолетово-розовый с полосами пластической деформации; *ж* — коричневый алмаз с шагреновой поверхностью, сформированной в результате пластической деформации

встречаются октаэдры (в кратерной фации — 24,8%, в жерловой — 26,8%) с параллельной штриховкой, сложенные тригональными слоями. Отмечается пониженное содержание алмазов переходной формы ряда октаэдр — додекаэдр (около 12%). Наиболее редки алмазы кубического габитуса, тетрагексаэдры, кристаллы ряда куб — тетрагексаэдр и псевдогемиморфные (менее 3% на каждый тип).

Для алмазов трубки Пионерская прослеживаются тенденции изменения морфологии алмазов в зависимости от класса крупности (рис. 5). С увеличением размера кристаллов (от класса крупности $-1+0,5$ мм к $-4+2$ мм) на 23% увеличивается доля додекаэдров и снижается относительное количество октаэдров: в туфогенных породах кратера в классе $-1+0,5$ мм их 28%, а в классе $-4+2$ мм — 7%;

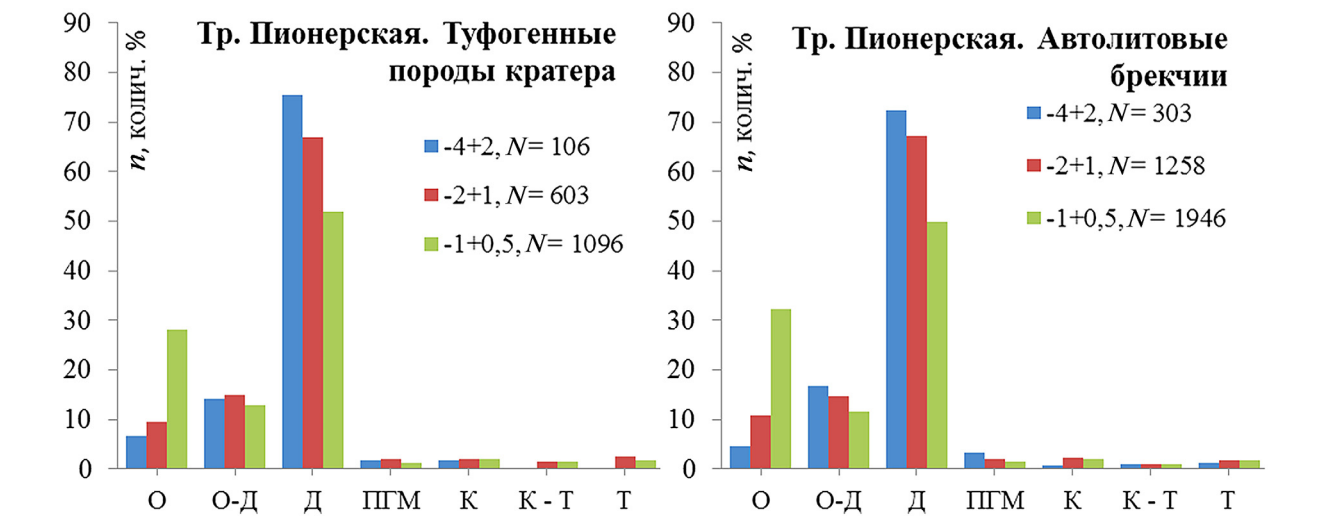


Рис. 5. Распределение алмазов из пород трубок Пионерская по габитусу. N — количество алмазов в выборках, штук, n — частота встречаемости, % по количеству. О — октаэдры; О-Д — алмазы ряда октаэдр — додекаэдр; Д — додекаэдровиды; ПГМ — псевдогемиморфные; К — кубы; К-Т — алмазы ряда куб — тетрагексаэдр; Т — тетрагексаэдры

Таблица 1

Таблица 2

Окраска алмазов трубки Пионерская					Включения в алмазах трубки Пионерская						
Окраска, %	Туфогенные породы кратера		Автолитовые брекчии жерла		Размерные группы	Количество кристаллов, шт.	Без включений, %	С графитом и графитоподобными включениями, %			
	оттенок	цвет	оттенок	цвет				всего с графитоподобными	в том числе		
Бесцветные	20,13		22,94						еди-ничные	единичные скопления	многочис-ленные
Желтые	17,56	1,19	18,20	0,87							
Желто-зеленые	2,25	0,95	1,24	0,16							
Коричневые	20,13	1,78	19,80	1,86							
Розовые	0,04		0,14	0,04							
Серые	24,83	9,92	25,27	8,18							
Желто-серые		0,63		0,89							
Черные		0,59		0,41							
в автолитовых брекчиях в классе –1+0,5 мм — 32%, а в классе –4+2 мм — 5%.											

в автолитовых брекчиях в классе –1+0,5 мм — 32%, а в классе –4+2 мм — 5%.

Распределение алмазов по характеру двойников и сростков по классам крупности для трубки Пионерская для туфогенных пород кратера и автолитовых брекчий жерловой фации представлено на рис. 6.

Доля кристаллов со следами воздействия процесса пластической деформации среди алмазов трубки Пионерская увеличивается от мелких классов к крупным: среди алмазов кратерной фации таких кристаллов от 17 до 27%, а в автолитовых брекчиях жерловой фации — от 14 до 20%. Содержание кристаллов с пятнами пигментации для туфогенных пород кратерной фации трубки Пионерская — 4%, для алмазов из автолитовых брекчий — 1%.

В трубке Пионерская широко распространены алмазы без аксессуаров травления поверхности. Около 60% алмазов рассматриваемых размерно-весовых групп (60,4% для туфогенных пород кратера

и 60,8% для автолитовых брекчий) свободны от каналов травления и каверн.

Степень сохранности алмазов трубки Пионерская достаточно низкая. Доля целых и незначительно поврежденных кристаллов в туфогенных породах кратера составляет 40%, а в автолитовых брекчиях жерловой фации снижается до 37%. Следует отметить, что в коллекции 2021 г. наблюдается повышение техногенной поврежденности на 4–8%: увеличение доли обломков и алмазов с комбинированным сколом, с трещинами, что приводит к снижению их качества.

Большинство алмазов трубки Пионерская бесцветные или с небольшим оттенком, в сумме они составляют 85% для туфогенных пород кратера

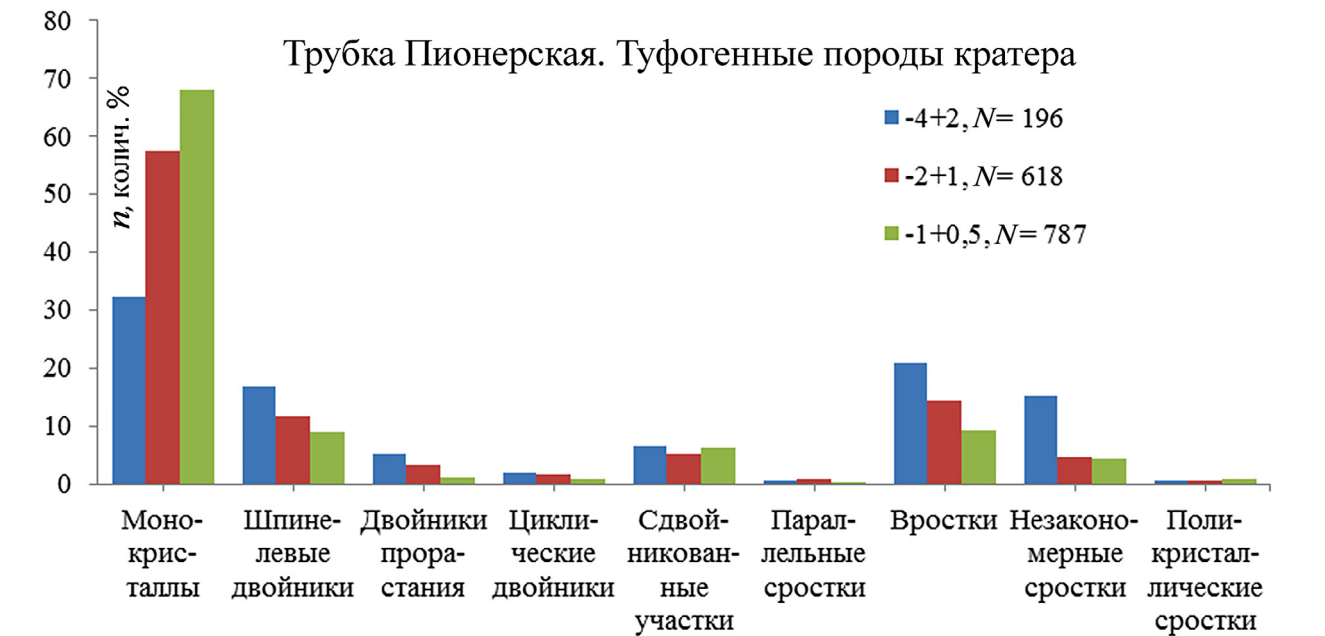


Рис. 6. Распределение алмазов трубки Пионерская по характеру двойников и сростков по классам крупности. N — количество алмазов в выборках, штук, n — частота встречаемости, % по количеству

Таблица 3

Значения содержания основных азотно-вакансионных центров, регистрируемых ИКС, для разных габитусных типов алмаза трубки Пионерская

Характеристики структурных центров	Доля кристаллов, %	I разновидность				II и III разновидность		Всего
		Октаэдр	Комбинационный О-Д	Шп. Дв.	Додекаэдр	Куб	Тетрагексаэдр	
		3,0	10,8	2,8	81,2	1,6	0,7	
%B	Min	5	2	6	0	10	9	0
	Max	70	65	55	75	17	50	76
	Средн. знач.	35	40	30	40	13	35	35
Ntot, at.ppm	Min	70	25	35	5	140	190	4
	Max	1750	1950	1950	2500	1270	1950	2500
	Средн. знач.	1020	1010	860	1000	820	1150	1000
A, at.ppm	Min	65	20	35	2	45	260	2
	Max	1547	1523	1640	2087	914	890	2090
	Средн. знач.	630	590	550	615	580	630	600
B1, at.ppm	Min	4	5	2	0	72	27	0
	Max	1000	1120	760	1630	658	1060	1630
	Средн. знач.	390	430	320	425	235	530	400
B2, cm-1	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	24	32	17	35	5	14	35
	Средн. знач.	6	9	8	10	3	9	9
CH, cm-1	Min	0	0	0	0	0	0	0
	Max	12	13	12	26	10	14	27
	Средн. знач.	2	3	2	3	3	5	3

и 88% для автолитовых брекчий жерловой фации. В автолитовых брекчиях заметно больше коричневых кристаллов (от легкого нацвета и оттенка до выраженного цвета); также в несколько раз повышается доля розовых алмазов (табл. 1).

Доля кристаллов с высокой и средней прозрачностью в трубке Пионерская — 84% для туфогенных пород и 90,5% для автолитовых брекчий. С увеличением размера кристаллов доля таких индивидов возрастает.

Содержание включений в алмазах трубки Пионерская проиллюстрировано в табл. 2. Единичные сингенетические включения, которые, ввиду расположения на небольшом расстоянии от поверхности, удалось исследовать методом комбинационного рассеяния, были представлены графитом, хромитом (0,8% от общего количества исследованных кристаллов), оливином (1,6%) и оливином в ассоциации с графитом (2,2%). Зафиксированы протогенетические включения алмаза.

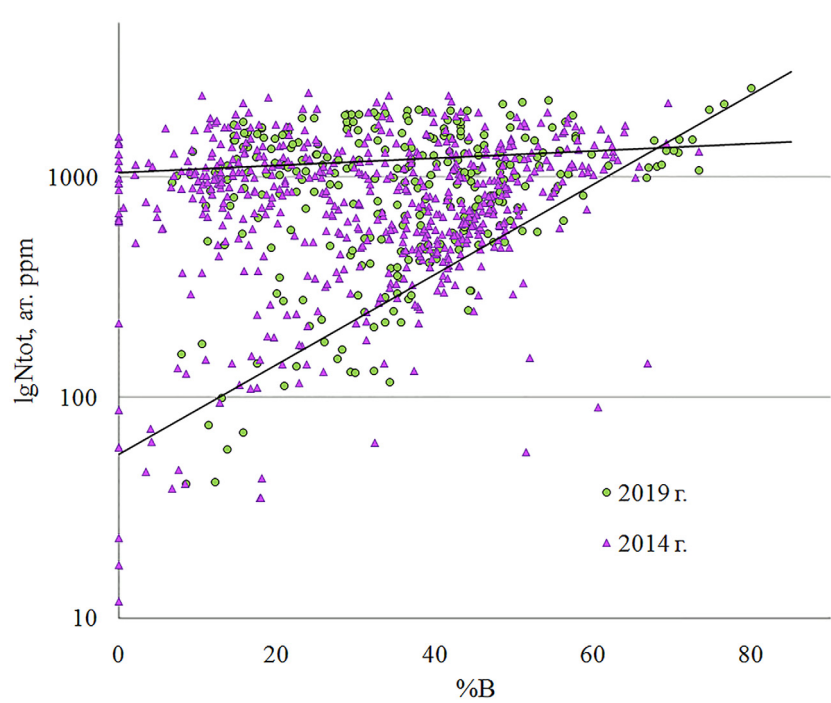
Данные о содержании структурных центров, выявленных в алмазах трубки Пионерская методом ИК спектроскопии, представлены в табл. 3. В среднем, алмазы различных габитусных форм трубки Пионерская обладают повышенным содержанием азота в виде A и B1 центров; их сумма в единичных кристаллах достигает 2500 at. ppm. Низкоазотные алмазы (Ntot < 100 at. ppm) в трубке Пионерская

составляют 7%, количество умеренно-азотных (200 < Ntot < 800 at. ppm) — 40%. Характерно повышенное количество B2 дефектов. Для 15% алмазов коллекции зарегистрирован относительный коэффициент поглощения B2 более 20 см⁻¹.

На рис. 7 приведена диаграмма соотношения суммарного азота Ntot (в виде A + B1) к доле азота в B1-форме для алмазов трубки Пионерская. Она отражает резкое преобладание кристаллов с высоким содержанием суммарного азота (Ntot > 800 at. ppm). Все алмазы трубки располагаются на двух трендах: горизонтальном, отражающем высокое содержание суммарного азота при степени агрегации азота (% B) от 0 до 50%, и диагональном, отвечающем равномерному увеличению содержания азота в A- и B1-формах.

Диагональный тренд (рис. 7) — это в основном алмазы додекаэдрического ряда и комбинационные формы октаэдр-додекаэдр, т. е. алмазы, которые с большой долей вероятности относятся к ювелирным (при отсутствии видимых включений). Горизонтальный тренд представлен кристаллами додекаэдрического и тетрагексаэдрического габитуса с высоким содержанием азотных и водородсодержащих центров, часто с зональным строением, сравнительно невысокого качества. И даже высокая степень сохранности таких кристаллов не обеспечивает принадлежность к ювелирной серии.

Рис. 7. График распределения алмазов из трубки Пионерская по концентрации основных дефектов: соотношение концентрации суммарного азота ($\lg N_{\text{tot}}$) и доли азота в В-форме (%) в пробах 2014 и 2021 гг.



Треть алмазов из трубки Пионерская характеризуются высоким относительным содержанием водородсодержащих центров ($N3VH$, полоса поглощения на 3107 см^{-1}) [Goss et al, 2014]. В кристаллах октаэдрического и додекаэдрического габитуса в единичных случаях значения показателя поглощения достигают 12 и 13 см^{-1} .

По характеру визуально наблюдаемой фотолюминесценции алмазы трубки Пионерская близки к якутским (например, из трубки Удачная) [Костровицкий и др., 2015]. Для всех кристаллов I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова [Орлов, 1984] резко (67,3%) преобладают кристаллы с голубым и сине-голубым свечением. Желто-зеленый цвет люминесценции преобладает для кубических и тетрагексаэдрических кристаллов; основную же массу алмазов с желто-зеленым свечением составляют кристаллы I разновидности ввиду их значительно более высокой распространенности. Суммарно желто-зеленую люминесценцию имеют 19,7%, желтую — 1,2% алмазов, это в 6 раз меньше, чем в других трубках, а алмазов с сине-голубым свечением больше в 2–3 раза, чем в других трубках месторождения им. М.В. Ломоносова [Гаранин и др, 2018]. Необычно высока доля алмазов с розовым и фиолетовым свечением — 2,6%. Зональная люминесценция обнаружена у 7,9% кристаллов; инертными под УФ-облучением остаются лишь 1,3% алмазов трубки Пионерская.

Методом фотолюминесцентной спектроскопии исследованы 300 алмазов из трубки Пионерская. Данные об обнаружении в спектрах исследованных образцов наиболее распространенных линий, отвечающих центрам люминесценции, а также их системам, приведены в табл. 4 и 5 соответственно. Выделение систем линий и идентификация центров проведены на основе данных [Zaitsev, 2001; Dischler, 2013].

Таблица 4

Фотолюминесцентная спектроскопия алмазов трубки Пионерская

нм	415	428	439,5	443	451	454,5	478,5	480,5
%	86,7	76,7	72,0	32,0	44,0	0,7	13,3	4,0
нм	489,5	496	504	510	512,5	517,5	520	524
%	7,3	19,3	28,0	2,0	17,3	1,3	14,7	11,3
нм	528	535	575	583	588	604	612,5	625
%	7,3	2,0	28,7	0,7	0,7	63,3	3,3	20,7
нм	640	645	656	670	680	692	700	704
%	28,7	9,3	9,3	2,7	96,0	2,7	56,7	0,7

Примечание. В таблице указано процентное содержание (по количеству) алмазов, в спектре которых проявлены данные линии. Интенсивность линий не учитывалась. Сумма превышает 100%, так как в спектре многих кристаллов присутствуют системы линий нескольких центров люминесценции.

Таблица 5

Встречаемость основных центров и систем люминесценции в кристаллах алмаза трубки Пионерская

Центр ФЛ (бесфоновная линия, нм)	% от количества кристаллов	Системы центров ФЛ	% от количества кристаллов
N3 (415)	90,8	N3 доминирующий	53,2
S1 (503+511)	2,1	N3 + (H3 + H4)	21,3
S2 (477+489)	14,2	N3 + (H3 + H4) + S2	0,7
H3 (503)	14,2	N3 + S2	13,5
H4 (496)	20,6		

Примечание. Указан процент кристаллов, в спектрах которых обнаружены системы линий соответствующих центров. Сумма превышает 100%, так как в спектре многих кристаллов присутствуют системы линий нескольких центров люминесценции.

Обсуждение результатов. В сравнении с алмазами из трубок Южной группы месторождения [Криулина и др., 2019; Garanin et al., 2021], алмазы из трубки Пионерская отличаются повышенной долей октаэдров и пониженной — додекаэдров и тетрагексаэдров. Среди алмазов из автолитовых брекчий для трубки Пионерская по сравнению трубками Архангельская и им. Карпинского-1 доля октаэдров больше на 20%, доля додекаэдров меньше на 15%, а тетрагексаэдров меньше на 6–8%.

Доля монокристаллов в наиболее важном классе крупности $-4+2$ мм у алмазов трубки Пионерская выше на 5–8%, чем в других трубках. Доля кристаллов с полосами пластической деформации для алмазов трубки Пионерская также несколько выше, чем в среднем по месторождению имени М.В. Ломоносова (10–15%), и эта доля увеличивается от мелких классов к крупным. В трубках Архангельская и им. Карпинского-1 количество алмазов с полосами деформации не превышает 10% и их доля наоборот, снижается от мелких классов к крупным.

В трубке Пионерская широко распространены алмазы, не затронутые процессами травления поверхности, они составляют около 60% кристаллов рассматриваемых размерно-весовых групп, что сопоставимо со значениями для трубок Архангельская и им. Карпинского-1, где 60,7% и 60,3% соответственно. Следует отметить, что доля наиболее кавернозных кристаллов с глубокими каналами «поморского типа» (рис. 4) для алмазов трубки Пионерская несколько повышена, по сравнению с алмазами из трубок Южной группы. Таким образом, алмазы трубки Пионерская более резко разделены на группы кристаллов, испытавших глубокое травление, и полностью его лишенных.

По степени сохранности алмазы трубок Пионерская, Архангельская и им. Карпинского-1 близки. Доля алмазов с природными сколами для жерловой фации трубки Пионерская составляет 37%, и это в среднем на 5% меньше, чем в трубках Южной группы.

Бесцветные и слабоокрашенные алмазы составляют абсолютное большинство для трубки Пионерская; их суммарная доля (86,7%) сопоставима с содержанием в трубке Архангельская (86%), однако ниже, чем в трубке им. Карпинского-1 (90%), в основном за счет увеличения доли алмазов с дымчато-коричневой и желто-коричневой окраской.

В то же время среди алмазов трубки Пионерская с увеличением размерности кристаллов увеличивается доля высокопрозрачных и прозрачных алмазов с желтой окраской, а также пластически деформированных алмазов с коричневой окраской. Содержание кристаллов с серой из-за многочисленных включений графита окраской снижается. В трубках Южной группы, наоборот, с увеличением размера алмазов возрастает содержание полупрозрачных алмазов и индивидов с пониженной прозрачностью из-за облаковидных микровключений,

а также возрастает доля сильно графитизированных серых алмазов.

Подобное разнонаправленное распределение по классам крупности обнаружено также для содержания включений в алмазах. Суммарная доля алмазов без включений для автолитовых пород жерловой фации составляет 43% для трубок Пионерская и им. Карпинского-1, и 46% для трубки Архангельская. Но доля алмазов с включениями зависит и от размера кристаллов. С увеличением размерности повышается количество индивидов и с графитовыми, и с сингенетическими включениями. Эта закономерность характерна для всех трубок. Однако, в автолитовых брекчиях жерловой фации трубки Пионерская наблюдается обратная зависимость. Алмазов без включений в классе крупности $-4+2$ мм больше на 9–11%, а в классе крупности $-1+0,5$ мм алмазов без включений меньше на 6–9%, чем в трубках Южной группы. Доля алмазов с графитовыми и графитоподобными включениями в крупных классах меньше на 12–17%, чем в трубках Архангельская и им. Карпинского-1. В классе $-1+0,5$ мм доля алмазов с многочисленными включениями графита напротив, больше на 4%, чем в других трубках.

Преимущественно синие тона фотолюминесценции, присущие алмазам трубки Пионерская, определяются в основном содержанием центра N3. Среди алмазов месторождения имени М.В. Ломоносова именно в алмазах трубки Пионерская он имеет наибольшую распространенность и по проценту обнаружения в кристаллах, и по доминирующему положению. Для алмазов трубки Пионерская характерна значительно большая, чем для кристаллов из трубок Южной группы, распространенность дефектов, отвечающих за линии люминесценции длинноволновой части видимого спектра — 575 нм (NV-центр), 604 нм и особенно 640, 680 и 700 нм. Именно они в случае достаточной интенсивности суммарно с линиями центра N3 определяют возникновение визуальной люминесценции в фиолетовых и розовых тонах. Среди трубок месторождения имени М.В. Ломоносова в значимых количествах алмазы с розовым и фиолетовым свечением встречаются только в трубке Пионерская. Для алмазов из тел Южной группы более типичны желто-зеленая и желтая люминесценция, обусловленная наличием N3 центров; лишь треть выборки приходится на алмазы с голубым свечением (с N3 центрами) и треть — на кристаллы, не люминесцирующие при возбуждении волнами УФ-диапазона.

Пятую часть от всех изученных алмазов трубки Пионерская составляют кристаллы с люминесценцией в желто-зеленых тонах, обусловленной системами центров S1, S2, N3 и N4. Такое желто-зеленое свечение является также косвенным признаком наличия алмазов с облаковидными включениями (Cloud), что подтверждается и при изучении, и при оценке качества алмазов [Гаранин и др., 2018]. У алмазов трубки Пионерская облаковидные включения

встречаются совместно с системами S-центров люминесценции. Большинство алмазов с желто-зеленым свечением, по данным ИКС-спектроскопии, принадлежит к горизонтальному тренду зависимости суммарного содержания азота от степени его агрегированности (высокая доля А-центров на рис. 7). Эти кристаллы, как правило, не являются идеально прозрачными из-за облаковидных и микровключений. В целом для месторождения имени М.В. Ломоносова среди кристаллов I разновидности по Ю.Л. Орлову характерно преобладание высокоазотных алмазов с низкой степенью его агрегации, что, согласно данным [Богатилов и др., 2000; Хачатрян, 2010] позволяет предположить их экзогенный генезис. Однако для алмазов трубки Пионерская в соотношении суммарного азота и азота в В-форме (рис. 7) более выражен диагональный тренд, что, предположительно, свидетельствует об ультраосновном генезисе. По сравнению с алмазами трубок Южной группы, повышена степень агрегированности азота (% B1), увеличены средние и максимальные содержания центров B2 и понижено содержание водорода (ср. коэф. поглощения $0\text{--}5\text{ см}^{-1}$).

Все эти данные свидетельствуют о том, что процессы формирования алмазов трубки Пионерская происходили при более высокой температуре по сравнению с алмазами трубок Южной группы [Васильев и др., 2022]. Кроме того, наибольшая среди алмазов месторождения имени М.В. Ломоносова распространенность центра N3 в алмазах трубки Пионерская дает возможность предположить еще и увеличение времени нахождения алмазов в таких условиях (высокотемпературный отжиг). Существенно более низкое содержание в трубке Пионерская кристаллов кубического и тетрагексаэдрического габитусов также подтверждает более высокотемпературный генезис алмазов трубки Пионерская.

Крупные алмазы и перспективы. В трубке Пионерская с возрастанием размера увеличивается доля высокопрозрачных алмазов без крупных графитовых включений, именно такие алмазы прогнозируются в крупных весовых группах +8 мм.

Среди алмазов трубки значительную долю составляют кристаллы октаэдрической и комбинационной формы, а также додекаэдриды со средним содержанием азота, сформированные при высокой температуре и подверженные процессу посткристаллизационного отжига. Это алмазы с послойным и однородным внутренним строением, следовательно, потенциально более высокого ювелирного качества. Именно эта группа кристаллов значительно повышает стоимостную оценку алмазов трубки Пионерская и делает перспективной ее промышленную обработку.

Отсутствие среди изученных алмазов образцов больше 5 кар объясняется тем, что крупные и высокоценные камни редки и фиксируются только в крупных партиях алмазов (тысячи карат). Распределение алмазов по стоимости асимметричное — она

непропорционально резко возрастает с увеличением размера ювелирных кристаллов. Это часто приводит к занижению средней стоимости в пересчете на тонну породы (до 30%) при предварительной оценке по керновым пробам относительно данных, получаемых при последующей добыче.

Проведенные исследования подтверждают равномерное распределение алмазов в трубке Пионерская как по общему содержанию, так и по распределению по гранулометрическим классам (рис. 3), а также повышенное содержание ювелирных алмазов и обломков по сравнению с трубками Южной группы. Потенциальная привлекательность трубки для промышленной отработки увеличивается с учетом еще одного фактора: в изученных пробах наиболее крупные алмазы относятся к классу $-4+2\text{ мм}$, а единичные — к $-8+4\text{ мм}$; однако, по соотношению количества и стоимости кристаллов в разных классах крупности можно прогнозировать наличие алмазов класса +8 мм ювелирного и около-ювелирного качества.

Для трубки Пионерская характерно более высокое качество алмазов за счет увеличения средней массы алмазов в классе и большего содержания кристаллов, их обломков и двойников ювелирного качества (без дефектов), при снижении массовых объемов алмазов с крупными включениями и трещинами, в сравнении с алмазами трубки Архангельская.

Качество алмазов в пределах однородного рудного столба, как правило, достаточно стабильно, при этом доля ювелирных камней в коренных месторождениях алмазов колеблется в широких пределах: от 2–5 до 70%, составляя в большинстве месторождений 15–30% массы всех алмазов, в меньшинстве — 30–50% и более. Выход ювелирных камней в трубке Пионерская составляет около 30%.

Выводы.

- Алмазы трубки Пионерская представлены преимущественно додекаэдридами, часто с проявлениями процессов пластической деформации. Кристаллы в большинстве бесцветны или слабо окрашены, высоко- и среднепрозрачны, средне- и высокоазотные, чаще с синей и голубой люминесценцией. Среди алмазов месторождения имени М.В. Ломоносова только в трубке Пионерская в значимых количествах встречены алмазы с розовой и фиолетовой люминесценцией.

- Алмазы трубки Пионерская сформировались при повышенной, по сравнению с трубками Южной группы, температуре, и находились в этих условиях большее время.

- По сравнению с алмазами трубок Архангельская и им. Карпинского-1, для алмазов трубки Пионерская выше доля октаэдрических кристаллов, в классах высокой крупности выше содержание монокристаллов. Для алмазов из автолитовых брекчий повышена доля кристаллов, не подверженных травлению. Несколько ниже доля бесцветных и слабоокрашенных алмазов, однако значительно выше

доля кристаллов с высокой прозрачностью, причем она возрастает с увеличением размера кристаллов, что нетипично. Также нетипично распределение кристаллов по степени проявления процессов травления и по наличию включений графита.

• Следует особо отметить, что, несмотря на меньшую, по сравнению с трубками Южной группы, продуктивность, алмазы трубки Пионерская имеют более высокое качество среди алмазов из всех изученных тел месторождения имени М.В. Ломоносова. Повышенное качество сырья обусловлено особенностями роста алмазов, в том числе его полойным механизмом и более длительным пребыва-

нием в высокотемпературных мантийных условиях, способствовавшем агрегации оптически-активных центров. Морфологические особенности алмазов, положительно влияющие на улучшение качества, наиболее характерны для алмазов из автолитовых брекчий трубки Пионерская.

Благодарности. Коллектив авторов благодарит АК ПАО «АЛРОСА» за предоставленную возможность исследований и публикации данного материала.

Финансирование. Работа выполнена в рамках плановых работ ВГРЭ АК «АЛРОСА», МГУ имени М.В. Ломоносова НИР цитис 121061600049-4.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богатиков О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: МГУ, 2000. 521 с.
2. Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А. и др. Природные и синтетические алмазы. М.: Наука, 1986. 224 с.
3. Васильев Е.А., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. Термическая история алмаза кимберлитовых трубок Архангельская и им.Карпинского-I // Записки Горного института. 2022. № 255. С. 327–336. DOI <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.57>.
4. Гаранин В.К., Криулина Г.Ю., Гаранин К.В., Самосоров Г.Г. Архангельские алмазы. Новые данные. М.: ИП Скороходов В.А., 2018. 232 с.
5. Костровицкий С.И., Спеццус З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: АЛРОСА, 2015. 480 с.
6. Криулина Г.Ю., Васильев Е.А., Гаранин В.К. Структурно-минералогические особенности алмаза месторождения им. М.В. Ломоносова (Архангельская провинция):

новые данные и их интерпретация // Доклады Академии наук. 2019. Т. 486, № 6. С. 695–698. DOI: 10.31857/S0869-56524866695-698

7. Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 263 с.

8. Хачатрян Г.К. Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и минералы. 2010. № 2. С. 46–60.

9. Goss J.P., Briddon P.R., Hill V., et al. Identification of the structure of the 3107 cm⁻¹ H-related defect in diamond // J. Phys.: Condens. Matter. 2014. Vol. 26. P. 1–6. DOI: 10.1088/0953-8984/26/14/145801

10. Dischler B. Handbook of spectral lines in diamond. Berlin: Springer Verlag, 2013. 467 p.

11. Garanin V., Garanin K., Kriulina G., Samosorov G. Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. Springer International Publishing AG, Switzerland, 2021. 248 p.

12. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: a data handbook. Springer, 2001. 519 p.

Статья поступила в редакцию 04.06.2023,
одобрена после рецензирования 02.10.2023,
принята к публикации 22.01.2024