

УДК 553.08

С.В. Вяткин¹, Г.Ю. Криулина², В.К. Гаранин³, Д.В. Коногорова⁴,
Е.А. Васильев⁵, Г.Г. Самосоров⁶

МОРФОЛОГИЯ И ДЕФЕКТНО-ПРИМЕСНЫЙ СОСТАВ АЛМАЗОВ ИЗ ТРУБКИ ЗАПОЛЯРНАЯ

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

ФГБУН Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана РАН, 119071 Москва, Ленинский просп., 18, корп. 2
Научно-исследовательское геологическое предприятие (НИГП) АК «АЛРОСА» (ПАО),

678170, Республика Саха (Якутия), г. Мирный, Чернышевское шоссе, 16

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», 199106, Санкт-Петербург, 21-я В.О., 2

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Fersman Mineralogical Museum, 119071, Moscow, Leninsky ave., 18, bd. 2

Geo-Scientific research Enterprise (NIGP) PJSC ALROSA

678170, Republic of Sakha (Yakutia), Mirny, Chernyshevskoe sh., 16

Saint-Petersburg Mining University, 199106, St Petersburg, 21st Line, 2

Методами морфологического анализа, ИК, ФЛ и ЭПР исследована представительная коллекция алмазов первой партии промышленной добычи из трубки Заполярная. Алмазы относятся к средне-низкоазотным, по составу и соотношению примесных центров они наиболее близки алмазам Далдыно-Алаkitского района Якутии. Типоморфные признаки алмазов из трубки Заполярная — преобладание кривогранных додекаэдров, значительная степень развития процессов растворения, травления и пластической деформации, близкое к максимальному содержание ИК-дефектов В2, минимальное содержание водорода, а также широкое распространение парамагнитных центров W7.

Ключевые слова: алмаз, трубка Заполярная, морфология, типоморфизм, методы ИК, ФЛ, ЭПР.

A representative collection of Zapolyarnaya pipe diamonds of the first batch of industrial production was studied by methods of morphological analysis, IR, FL, and EPR. Diamonds belong to the medium-low-nitrogen, they are the closest to the Daldyn-Alakit area diamonds in terms of their composition and ratios of impurity centers. Typomorphic features for diamonds of Zapolyarnaya pipe are the predominance of curved dodecahedroids, a significant degree of development of the processes of dissolution, etching and plastic deformation, close to the maximum content of IR defects B2, the minimum content of hydrogen, as well as a wide spread of paramagnetic centers W7.

Key words: diamond, Zapolyarnaya pipe, morphology, typomorphism, IR, FL, EPR.

Введение. Кимберлитовая трубка Заполярная наряду с трубками Деймос, Новинка и Комсомольская-Магнитная входит в состав Верхнемунского месторождения алмазов, расположенного в бассейне р. Улах-Муна (Западная Якутия). По оценкам специалистов АК «АЛРОСА», запасов месторождения Верхнемунское достаточно для продолжения добычи до 2042 г. Промышленная разработка месторождения была начата с трубки Заполярная в октябре 2018 г. Данные, получаемые в результате добычи и изучения алмазов трубки, важны при прогнозировании степени алмазности и качества алмазов других трубок Верхне-

мунского поля. При этом, как показали работы по уточнению алмазности в марте 2019 г. (по материалам сайта www.alrosa.ru), трубка Заполярная — одна из самых богатых крупными алмазами среди месторождений АК «АЛРОСА». Некоторые из добытых крупных алмазов ювелирного качества представлены на рис. 1.

В работах [Костровицкий и др., 2015; Харьков и др., 1998] обобщены результаты изучения вещественного состава кимберлитовых пород верхних горизонтов трубки Заполярная. Авторами выделены породы трех фаз внедрения, однако по вещественному составу четких различий между

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: vyt_box@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, науч. с.; канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: galinadiamond@gmail.com

³ Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана, гл. науч. с., докт. геол.-минер. н.; *e-mail*: vgaranin@mail.ru

⁴ НИГП АК «АЛРОСА», мл. науч. с.; *e-mail*: konogorovadv@alrosa.ru

⁵ Санкт-Петербургский горный университет, вед. инж., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: simphy12@mail.ru

⁶ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра минералогии, науч. с., канд. геол.-минер. н.; *e-mail*: georggem@mail.ru

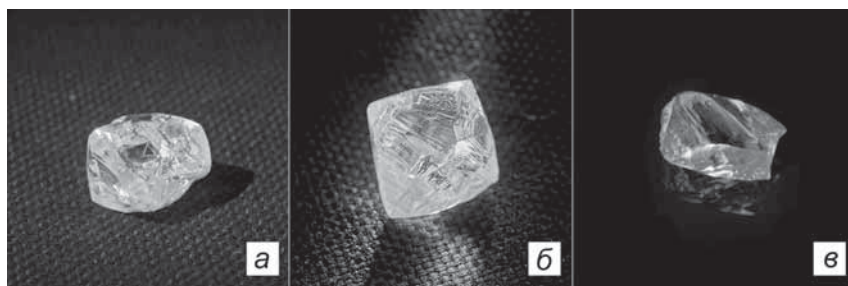


Рис. 1. Крупные алмазы ювелирного качества из трубки Заполярная (кар.): *a* — 51,49, добыт в конце 2018 г.; *b* — 98,8, добыт в феврале 2019 г.; *v* — 17,44, ярко-желтый, добыт в феврале 2020 г. (по материалам сайта www.alrosa.ru)

кимберлитами отдельных фаз не обнаружено. Соотношение макрокристов и основной массы составляет в среднем 1:1. Макрокристы представлены оливином, в значительной степени серпентинизированным. В основной массе содержатся перовскит, флогопит, титаномagnetит и апатит. Мезостазис представлен кальцит-серпентиновым агрегатом, в котором также присутствует перовскит. В тяжелой фракции кимберлитов доминируют гранаты, нередко окруженные келифитовой оболочкой, отвечающие ультраосновному и основному парагенезисам. При этом более 50% гранатов, по данным [Харьков и др., 1998], отвечает лерцолитовому парагенезису, однако характерная особенность кимберлитов Верхнемунского поля — присутствие значительного числа (19,5%) низкохромистых гранатов дунит-гарцбургитового парагенезиса. Ильменит, пироксены, хромшпинелиды единичны. Несмотря на крайне малое содержание ильменита, среднее содержание TiO_2 в кимберлитах составляет 1,17% [Харьков и др., 1998], причем в значительной мере за счет присутствия перовскита в мезостазисе. По классификации, представленной в работе [Кононова и др., 2011], кимберлиты трубки Заполярная относятся к умеренно-титанистому петрогеохимическому типу.

Рассмотрим результаты комплексного минералогического исследования представительной коллекции алмазов из первой партии добычи, предоставленной компанией «АЛРОСА».

Материалы и методы исследований. Исходная проба — 2380 кристаллов алмаза двух размерно-весовых групп: $-12+11$ с общей массой кристаллов 400 кар. (масса одного кристалла в пределах 0,30–0,45 кар.) и $-9+7$ с общей массой кристаллов 150 кар. (масса одного кристалла 0,10–0,15 кар.). Исходная проба выделена из соответствующих размерных фракций общей партии методом механического квартования. Все кристаллы пробы разделены по цвету и визуально по характеру фотолюминесценции. По этим двум признакам из исходной пробы выделена статистически идентичная выборка в 1000 кристаллов, равные половины (шт.) из которой принадлежат размерно-весовым группам $-12+11$ и $-9+7$. Для всех алмазов выборки проведено покристальное минералогическое описание. Кроме того, выполнены спектроскопические исследования методами фотолюминесцентной спектроскопии (ФЛ, 112 шт.), инфракрасной

спектроскопии (ИК, 559 шт.) и электронного парамагнитного резонанса (ЭПР, 101 шт.).

Минералогическое описание алмазов сделано под биноклем «Motic» SMZ-143 с УФ осветителем-боксом (365 нм). Регистрацию ИК-спектров проводили на Фурье-спектрометре «Vertex-70» (фирма «Bruker») с микроскопом «Hyperion-1000». Для исследования люминесцентных свойств использованы спектрофлуориметры «Fluorolog-3» (съемка при комнатной температуре) и «RenishawInVia» (съемка при 77 К). Спектры ЭПР регистрировали на спектрометрах «Varian E-115» и «CMS-8400».

Результаты исследований и их обсуждение.

Минералогическое описание алмазов проводилось по следующей схеме: габитус кристалла, разновидность по классификации Ю.Л. Орлова [Орлов, 1984], морфология поверхности — формы роста и растворения, акцессорное травление, наличие двойников и сростков, степень сохранности, характер и интенсивность окраски, визуальная оценка наличия и состава включений, а также цвет, однородность и интенсивность фотолюминесценции.

Подавляющее большинство исследованных алмазов из трубки Заполярная (96,7%) принадлежит к I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова (табл. 1). Более половины кристаллов (57,2%) представлены кривоугонными додекаэдрами, большая часть из которых (30,2%) — ламинарные.

Морфология поверхности алмазов из трубки Заполярная весьма разнообразна. Грани, ребра и вершины большинства кристаллов усложнены формами роста (рис. 2, 3) и растворения (рис. 4, 5). Их отсутствие зафиксировано лишь для 4,4% кристаллов. Алмазы, оформленные исключительно сколовыми поверхностями без участков первоначальной огранки, составляют <1%.

Кристаллы алмаза из трубки Заполярная в целом отличаются высокой степенью овализации и проявления процессов сглаживающего окислительного растворения, которые характеризуются формами, изменяющими поверхность кристалла в целом (рис. 4). В то же время локальное акцессорное травление, приводящее к появлению линейных и малоразмерных нарушений поверхности граней, проявлено в средней степени (рис. 6).

Частота проявления различных типов акцессорного травления на кристаллах алмаза из трубки

Таблица 1
Частота встречаемости кристаллов алмаза по габитусным типам и разновидностям по классификации Ю.Л. Орлова

Разновидности по классификации Ю.Л. Орлова

Разно- видность	Форма кристаллов		Содер- жание, %
I	плоскогранные	октаэдр	9,7
	плоскогранно- кривогранные ряда октаэдр– додекаэдр	октаэдр–додекаэ- дроид	15,9
		октаэдр–ромбодо- декаэдр	10,7
		октаэдр–ромбодо- декаэдр–куб	1,4
		псевдокуб	0,2
	кривогранные додекаэдр	додекаэдр	19,9
		ламинарный до- декаэдр	30,2
		псевдоромбододе- каэдр	7,1
	неопределенные формы		1,6
II	куб, куб–додекаэдр		0,4
	додекаэдр–тетрагексаэдр		0,2
III	куб		0,3
IV	алмаз в оболочке		0,1
VII	поликри- сталлические агрегаты	крупнокристалли- ческие	1,6
VIII		мелкокристалли- ческие (с темной центральной зоной)	0,5
IX		зернистые	0,2

Заполярная приведена на рис. 7. Без следов акцес- сорного травления выявлено 9,5% алмазов. Слабая степень акцессорного травления — присутствуют немногочисленные ямки, единичные треугольные фигуры — проявлена у 34,6% кристаллов. В группу со средней степенью травления включены алмазы с каналами травления различного типа, кавернами и отрицательными пирамидами, таких кристаллов 34,1%. Наконец, 21,8% алмазов имеет сильную степень акцессорного травления, практически и полностью покрыто каналами и другими формами травления, которые в значительной степени скры- вают первоначальный габитус кристаллов. Часто мелкие отрицательные треугольные фигурки трас- сируют линии скольжения. Встречаются тонкие каналы травления, уходящие в трещины кристалла.

Распределение алмазов по наличию двойников и сростков отражено в табл. 2. Процентное содер- жание отличающихся по характеру образования

Таблица 2
Наличие двойников и сростков кристаллов алмаза из трубки Заполярная

Характер образования	Содержание кристаллов, %
Монокристалл	67,7
Сросток	8,9
Кристалл с вростком	5,3
Шпинелевый двойник	10,3
Кристалл с двойниковым швом	5,5
Поликристаллический агрегат	2,3

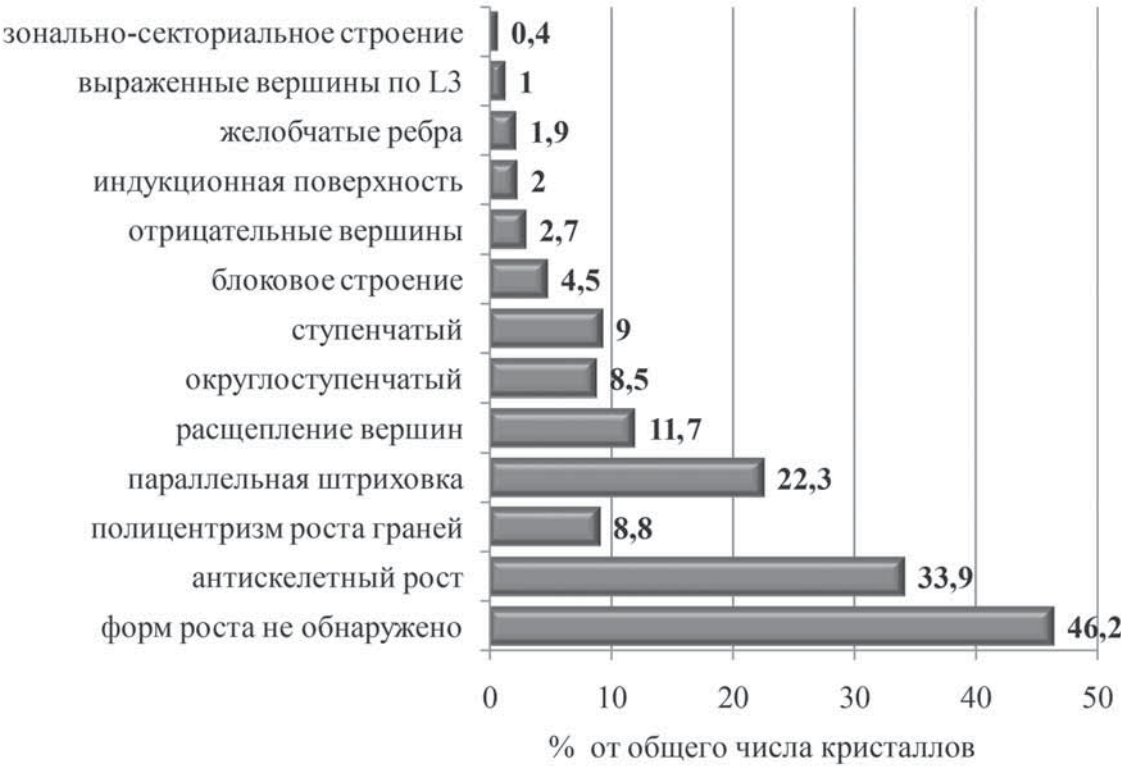


Рис. 2. Частота проявления различных форм роста на поверхности кристаллов алмаза из трубки Заполярная. Сумма различных форм превышает 100%, так как на одном кристалле часто встречается несколько их типов

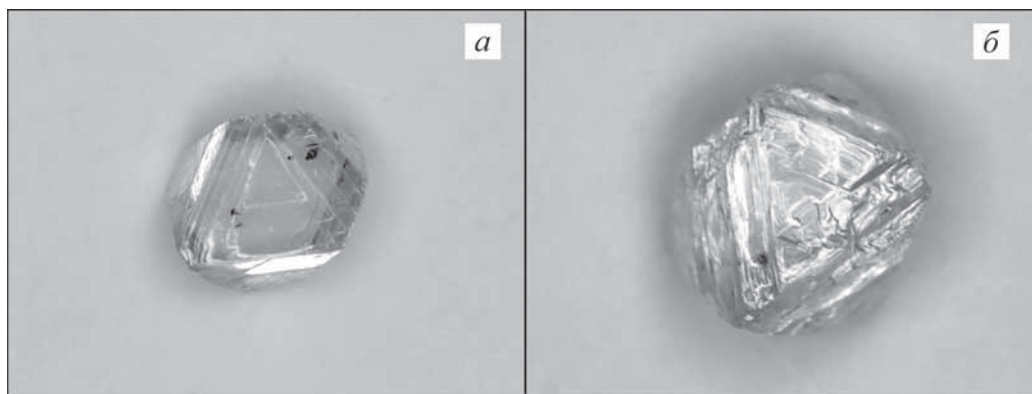


Рис. 3. Морфология поверхности алмазов: *a* — обр. Зап.4-11, плоскогранный тонкослоистый октаэдрический кристалл с антискелетным механизмом роста, с выраженным полицентрическим характером роста граней и параллельной штриховкой; *б* — обр. Зап.14-1, плоскогранный октаэдрический кристалл с антискелетным механизмом роста, выраженным полицентрическим характером роста граней, средней ступенчатостью и параллельной штриховкой. Здесь и далее фото алмазов приведены в одном масштабе, поле зрения 7×5,2 мм

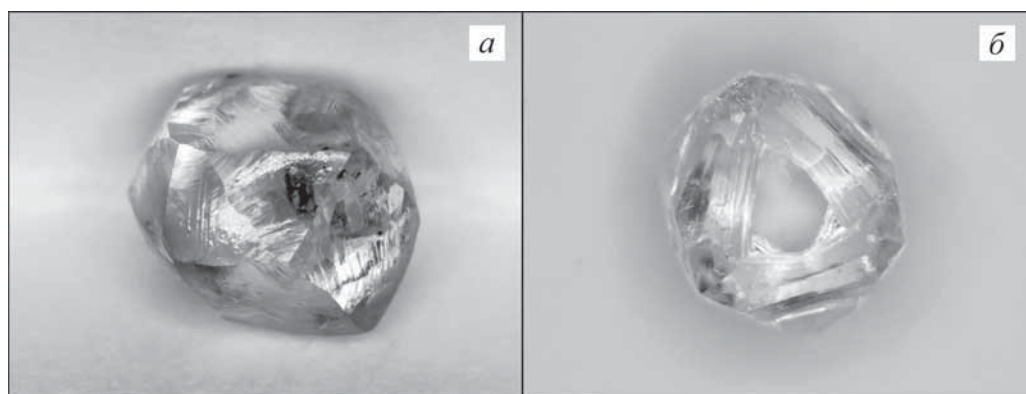


Рис. 4. Частота проявления различных форм растворения на поверхности кристаллов алмаза из трубки Заполярная. Сумма различных форм превышает 100%, так как на одном кристалле часто встречается несколько их типов

кристаллов алмаза достаточно близко для разных габитусных форм, однако отметим увеличение сростков среди ромбододекаэдров и кубических форм.

Степень сохранности алмазов из трубки Заполярная невысокая. На долю целых образцов приходится 43,7%, на долю кристаллов со сколами — от 1/3 до 2/3 объема, 13,1%. Оставшиеся 43,2% суммарно составляют обломки (31,1%) и осколки (11,9%), представляющие собой фрагменты кристаллов с объемом менее 1/3 от полного объема. По характеру сколов наиболее распространены индивиды с протемагматическим характером сколов (25,1%), кристаллы с техногенными сколами составляют 17,7%, оставшиеся 13,5% имеют комбинированный характер повреждений.

Фактически разделение алмазов по окраске в ходе исследований выполнено дважды — при выделении из исходной пробы выборки в 1000 кристаллов и при их минералогическом описании. В табл. 3 приведены данные минералогического описания, так как в этом случае окраску определяли с использованием геммологических эталонов [ГОСТ Р 51519.2-99], а также разделены ее сингенетический и эпигенетический типы. К сингене-

тическому типу отнесена окраска, обусловленная структурными примесями (оттенки желтого) и мелкодисперсными включениями графита (оттенки серого). К эпигенетическому типу отнесена окраска, приобретенная в результате процессов природного облучения (оттенки зеленого) и пластической деформации (оттенки коричневого и розового). Указанная в табл. 3 интенсивность окраски кристаллов, не считая бесцветных, имеет 4 градации — от слабого оттенка к интенсивному цвету. Для каждого кристалла возможно проявление в различной степени того или иного типа окраски; их сочетание определяет результирующий цвет кристалла. Термин «бесцветные» в разделах «Сингенетическая» и «Эпигенетическая окраска» обозначает кристаллы, не имеющие сингенетической или эпигенетической окраски соответственно. Действительно, бесцветные кристаллы не имеют ни того, ни другого типа окраски, таких алмазов в исследованной выборке всего 19,8%. Преобладают кристаллы с видимой окраской: суммарно в градации от видимого оттенка до интенсивного цвета попадает 57,5% алмазов. Сингенетическую желтую окраску различной интенсивности имеет 43,6% кристаллов; эпигенетическая коричневая

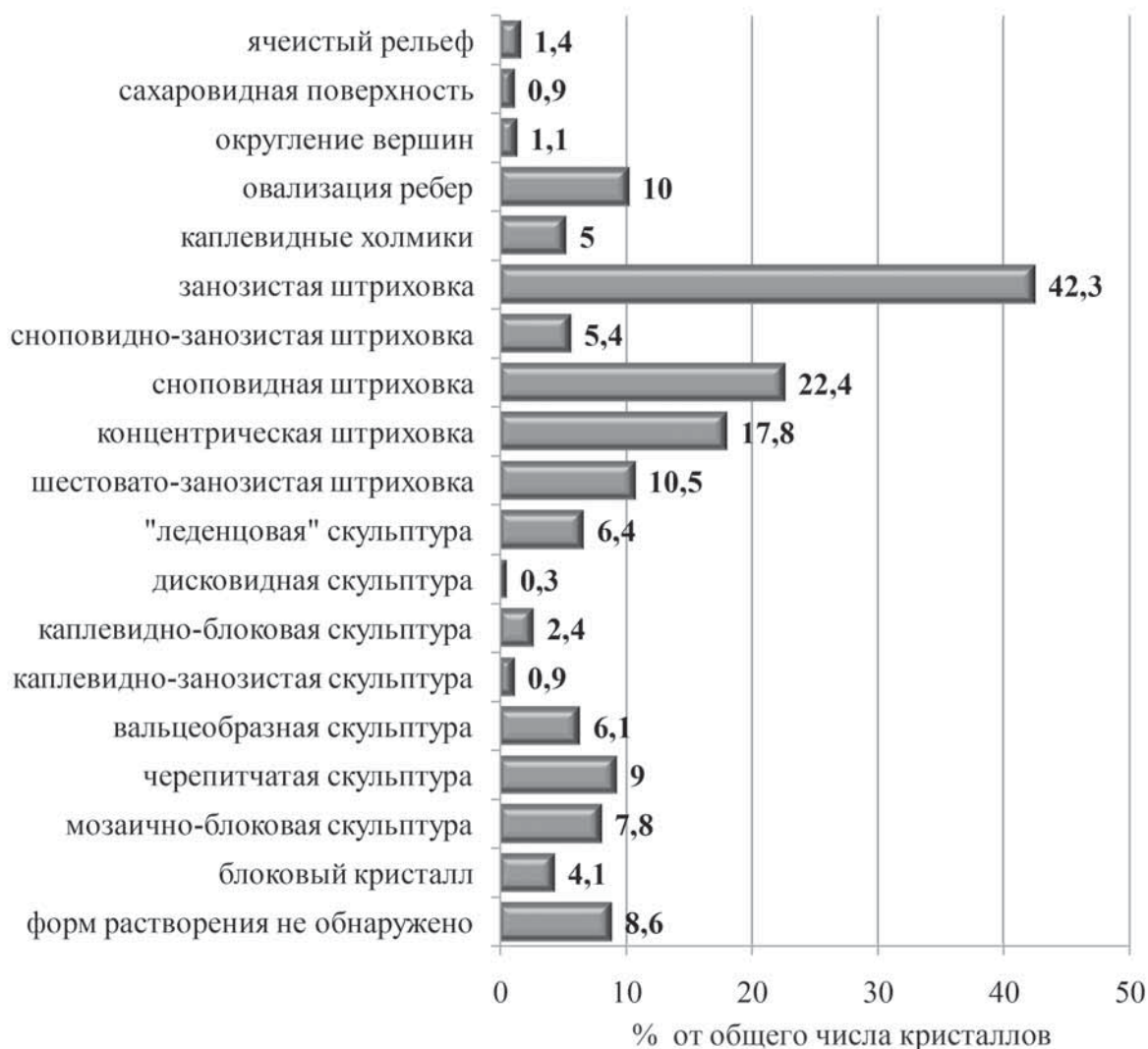


Рис. 5. Морфология поверхности алмазов: *а* — обр. Зап.62-1, дымчато-коричневый додекаэдр с сноповидно-занозистой, концентрической штриховкой у выходов осей L3 и полосами пластической деформации; *б* — обр. Зап. 1-1, кристалл комбинационной формы с положительными и отрицательными в рельефе фигурами, сноповидной штриховкой и леденцовой скульптурой

окраска различных оттенков проявлена у 54,1% образцов, в то же время количество интенсивно окрашенных кристаллов составляет 5,2%.

Наличие и состав включений в алмазах отражены на рис. 8. Отметим, что диагностика включений проводилась визуально при минералогическом описании, поэтому, строго говоря, она предварительная. В то же время анализ небольшого числа кристаллов с приповерхностным расположением включений методом КР-спектроскопии не выявил существенных ошибок в визуальной диагностике. Обозначение графит/сульфид на рис. 8 введено для включений, которые нельзя однозначно разделить между этими категориями. К группе оливин-сульфид, напротив, отнесены включения, образованные из оливина и сульфидного минерала по дисковидной трещине вокруг него (рис. 9). Такая ассоциация типична для включений в алмазе [Орлов 1984]. По трещинам кристаллов алмаза проявлено ожелезнение, наличие которого характерно для верхних зон кимберлитовых труб.

Алмазы изученных размерно-весовых групп заметно отличаются по частоте встречаемости кристаллов с разным характером визуальной люминесценции (рис. 10). Распределение по интенсивности люминесценции среди алмазов наиболее многочисленных цветовых групп (белесая, голубая, желтая, зональная) однотипно. Около 60% кристаллов визуально слаболюминесцирующие, чуть более 1/3 люминесцирует в средней степени, а оставшиеся несколько процентов проявляют интенсивную люминесценцию. В группах кристаллов алмаза с желто-зеленой, зеленой и оранжевой люминесценцией из-за их малочисленности статистика не показательна.

В группе –12+11 41% кристаллов алмаза не проявляет визуально диагностируемой люминесценции в УФ-лучах, и примерно столько же кристаллов (43%) имеет голубое свечение, присутствуют единичные кристаллы с желтой, желто-зеленой, зеленой, оранжевой люминесценцией.

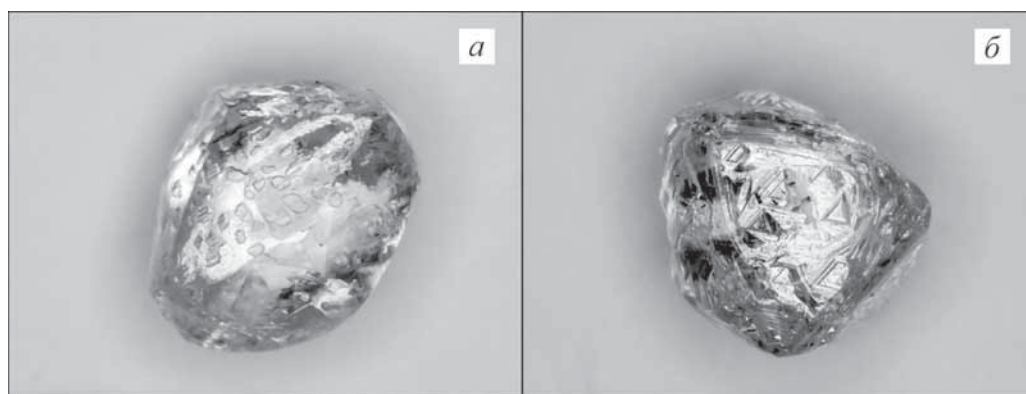


Рис. 6. Локальное акцессорное травление поверхности алмазов: *а* — обр. Зап.13-16, додекаэдроид уральского типа с сильной степенью коррозии, с овализованными скульптурами травления, *б* — обр. Зап.57-1, сформированный в процессе антискелетного роста кристалл комбинационной формы с гранями октаэдра и поверхностями псевдоромбододекаэдра, с отрицательными треугольными пирамидами



Рис. 7. Частота встречаемости различных типов акцессорного травления поверхности кристаллов алмаза из трубки Заполярная. Сумма разных типов превышает 100%, так как на одном кристалле может быть проявлено несколько из них. Под пирамидами и треугольными фигурами подразумеваются отрицательные формы

Среди алмазов класса $-9+7$ доля кристаллов, не проявляющих люминесценции, составляет 32%, а голубое свечение наблюдается у 22% кристаллов, при этом резко возрастает число образцов с белесой люминесценцией. Почти в 2 раза по сравнению с классом $-12+11$ (с 8,7 до 15%) увеличивается число кристаллов с зональной люми-

несценцией разнообразного характера. Зональная люминесценция представлена голубым и белесым свечением разной интенсивности в центральной и периферийной частях кристаллов. Реже встречаются индивиды с центральной зоной, люминесцирующей желтым цветом, и инертной или голубой

Таблица 3

Окраска кристаллов алмаза из трубки Заполярная

Окраска / интенсивность	Слабый оттенок	Видимый оттенок	Цвет	Интенсивный цвет	Всего, шт.
Сингенетическая окраска					
Отсутствует					431
Желтая	132	135	125	40	432
Желто-серая			4		4
Серая	14	13	98	5	130
Черная			3		3
Эпигенетическая окраска					
Отсутствует					457
Зеленая			2		2
Коричневая	106	141	213	44	504
Оранжево-коричневая				1	1
Розовая	1	1	1	1	4
Розово-коричневая	5	9	15	3	32

Окраска / интенсивность	Слабый оттенок	Видимый оттенок	Цвет	Интенсивный цвет	Всего, шт.
Результирующая окраска					
Бесцветные					198
Желтая	111	48	23	4	186
Желто-зеленая			1		1
Желто-коричневая	22	84	96	34	236
Желтоватая, розово-коричневая		3	6	1	10
Коричневая	72	52	77	5	206
Оранжево-коричневая				1	1
Розово-коричневая	5	6	9	1	21
Розовая	1	1	1	1	4
Серо-желтая	3	1			4
Серо-зеленая			1		1
Серо-коричневая	11	5	40	5	61
Серая	2	9	57		68
Черная			3		3

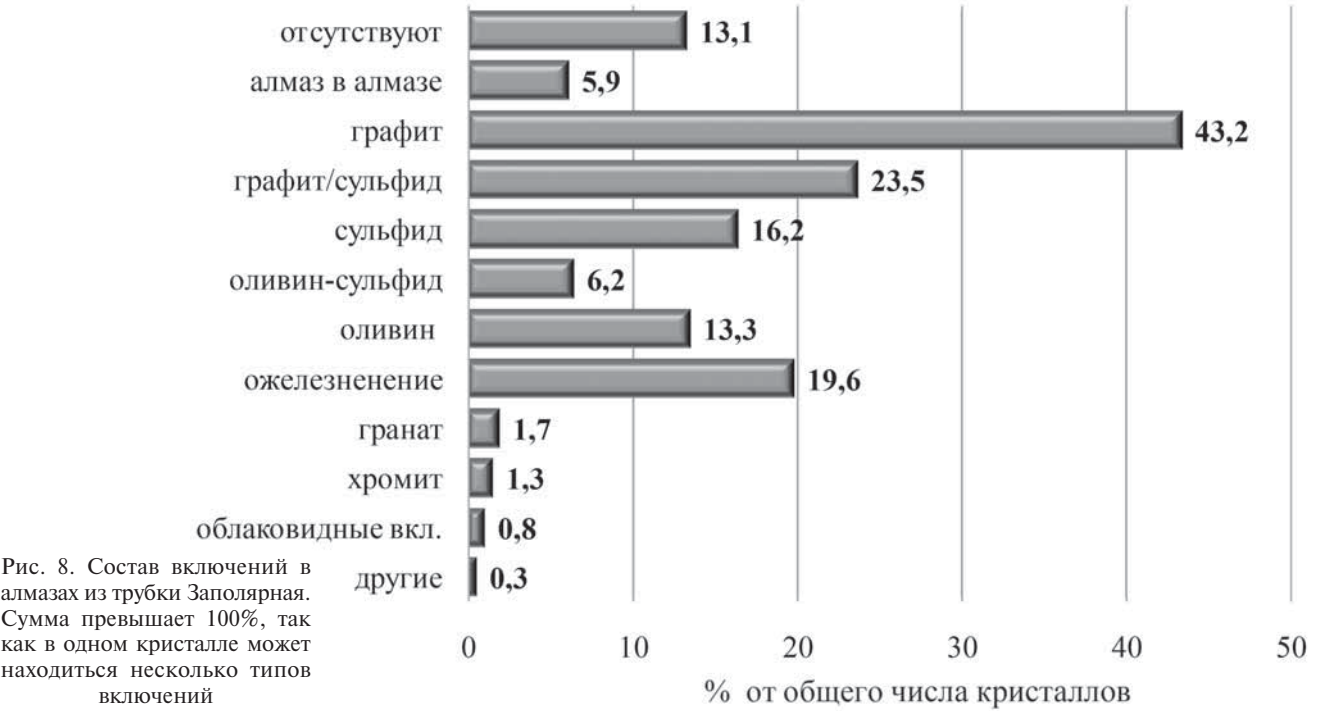


Рис. 8. Состав включений в алмазах из трубки Заполярная. Сумма превышает 100%, так как в одном кристалле может находиться несколько типов включений

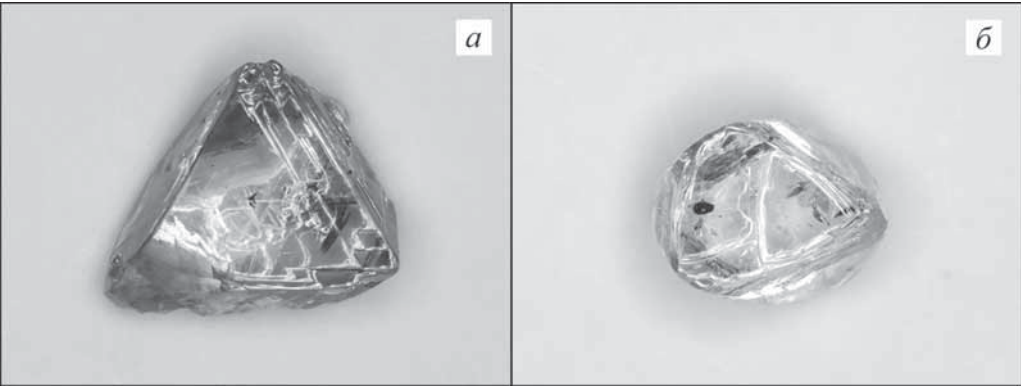


Рис. 9. Включения в алмазах: а — обр. Зап.2-2, шпинелевый двойник с тонкослоистым строением, полицентрическим характером роста граней и коррозионной матировкой на одной из граней, в центре мелкое включение графит/сульфид; б — обр. Зап.4-5, бесцветный октаэдрический кристалл с незначительным окислением и овализацией вершин и ребер, с шестовато-заноистой и сноповидной штриховками. Ассоциация оливин-сульфид (у ребра слева), гранат (справа)

шин и ребер, с шестовато-заноистой и сноповидной штриховками. Ассоциация оливин-сульфид (у ребра слева), гранат (справа)

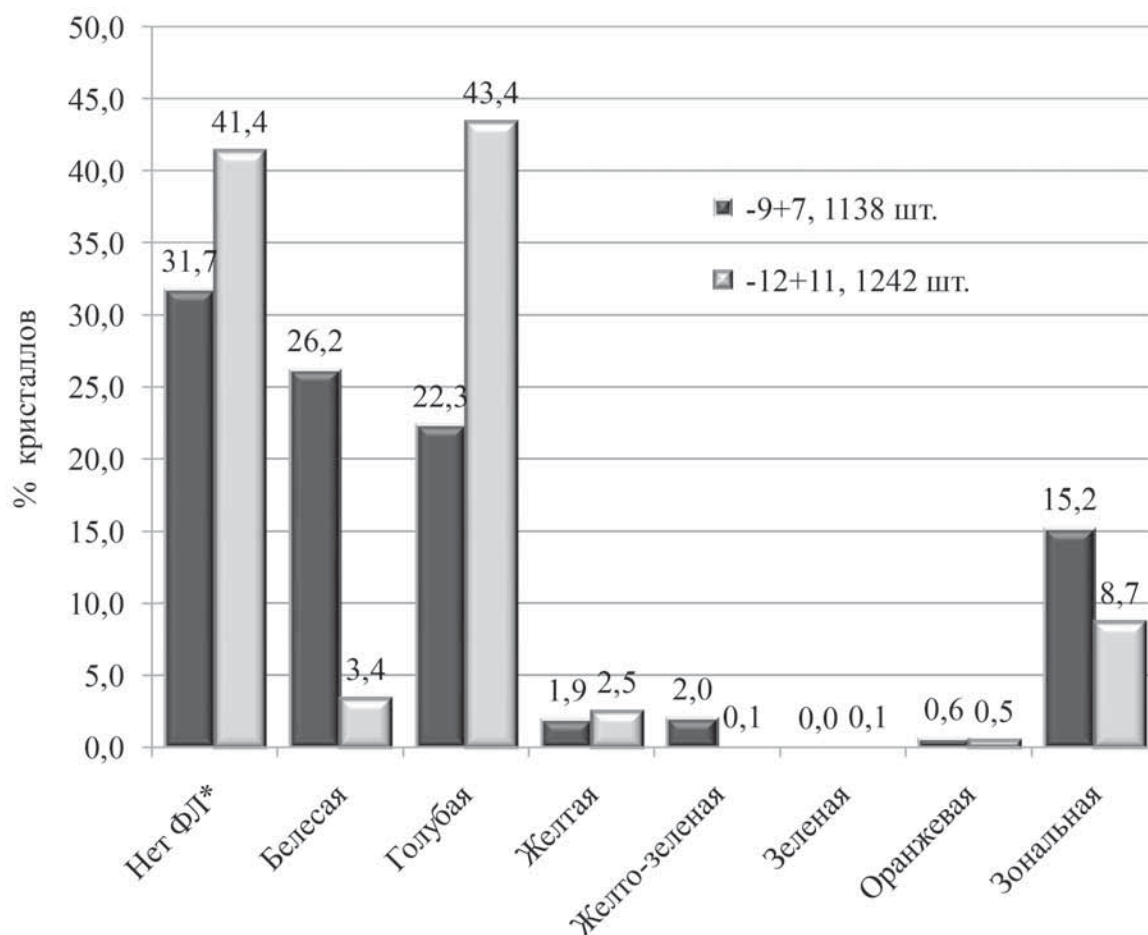


Рис. 10. Диаграмма распределения кристаллов по цвету визуальной фотолюминесценции, Нет ФЛ — люминесценция не диагностируется визуально

периферией. Единичны кристаллы с зеленой и оранжевой зональной люминесценцией.

Выявляемые методами ФЛ, ИК и ЭПР спектроскопические свойства алмаза обусловлены наличием в его кристаллической структуре различных примесных центров, образованных азотом и в значительно меньшей степени другими элементами, такими, как никель и кислород [Zaitsev, 2001; Минеева и др., 1996; Титков, 2018]. Данные о частоте встречаемости полос люминесценции в исследованной выборке при комнатной температуре приведены в табл. 4, а при 77 К — в табл. 5. Для слаболюминесцирующих кристаллов интенсивность люминесценции снижается для всех систем.

Согласно данным ИК-спектроскопии суммарное содержание азота (N_{tot}) в исследованных кристаллах алмаза варьирует от 0 до 2385 ppm (медиана 548 ppm). Концентрация А-центров (0–1245 ppm) имеет медиану в 222 ppm, В1-центров (0–1630 ppm) — медиану в 240 ppm. Содержание дефектов В2 (плейтелетс) высокое: максимальный показатель поглощения $32,8 \text{ см}^{-1}$, медиана $5,84 \text{ см}^{-1}$. При этом характеристический пик дефекта В2 сильно сдвинут в длинноволновую область — среднее значение $1363,8 \text{ см}^{-1}$. Медиана по показателю поглощения характеристического

пика СН-центра (3106 см^{-1}) составляет $0,47 \text{ см}^{-1}$, при этом у 68,2% кристаллов его величина $<1 \text{ см}^{-1}$.

Результаты исследования алмазов методом ЭПР отражены в табл. 6. Концентрацию парамагнитных центров рассчитывали с использованием эталонных образцов. Спектры снимали в ориентации кристаллов $H \parallel L4$, юстировка проводилась по центрам P1 (иногда по W7). При концентрации центров P1 ниже предела обнаружения спектрометра ($\approx 0,05 \text{ ppm}$ для алмазов массой 0,1–0,45 кар.) регистрировали только центры P2 и N2; 10 кристаллов, для которых не удалось однозначно провести декомпозицию спектров центров P2 и N2, приведены в табл. 6 отдельно.

Полученные данные о содержании кристаллов различных габитусных типов соответствуют результатам исследований [Зинчук и др., 1999, 2001, 2003], проведенных на базе коллекций алмазов, извлеченных при разведке и опробовании трубки Заполярная. Отметим лишь снижение числа поликристаллических сростков VIII разновидности по классификации Ю.Л. Орлова — 0,5% против 5,7% по данным [Зинчук и др., 2001]. Преобладающие в коллекции ламинарные додекаэдрониды несут на себе следы окислительного сглаживающего растворения, имеют выраженную отдельность, вальцеобразные и блочные скульптуры на гранях.

Таблица 4

Частота встречаемости систем люминесценции в кристаллах алмаза из трубки Заполярная при 300 К

Частота встречаемости систем люминесценции, %					
N3, регистрируется/ доминирует	489 нм	N3 (503) нм	S3 регистрируется/ доминирует	585 нм	655 нм
99/98	22	63	10/2	9	9

Таблица 5

Частота встречаемости систем люминесценции в кристаллах алмаза из трубки Заполярная при 77 К

Частота встречаемости систем люминесценции, %													
N3	575 нм	603 нм	610 /720	612 нм	670 нм	GR1	695 нм	700 /785	900 нм	883 /885	920 нм	926 нм	933 нм
78	4	16	46	46	10	8	8	42	16	7	25	21	21

Таблица 6

Примесные парамагнитные центры в кристаллах алмаза из трубки Заполярная

Показатель	Парамагнитный центр						
	P1	P2	P2+N2	N2	W7	W21	OK1
Кристаллы, содержащие центр, %	54,5	57,4	9,9	32,7	38,6	21,8	5,9
Максимальная концентрация, ppm	0,6	10,3	2,2	1,1	0,8	0,004	0,02
Средняя концентрация для всей выборки, ppm	0,15	0,68	0,09	0,10	0,14	0,0003	0,001

Проявление процессов растворения наиболее сильно выражено у гладкогранных додекаэдридов уральского типа, рельеф и скульптуры на которых максимально выположены. Псевдоромбододекаэдры (ромбододекаэдры роста) имеют лишь слабые следы окислительного растворения. Кривогранные поверхности (псевдограницы), отвечающие положению граней ромбододекаэдра (110), сформированы многочисленными ступенчатыми ребрами граней октаэдра.

Овализованные скульптуры коррозионного травления, которые проявлены на поверхности 35,2% кристаллов, наряду с менее широко распространенными кольцевыми скульптурами и коррозионной матировкой могут накладываться на треугольные фигуры и отрицательные пирамиды, что свидетельствует о проявлении разделенных во времени различных процессов локального травления. По широкому распространению алмазов с признаками коррозии (коррозионная матировка и овализованные коррозионные узоры) кимберлиты трубки Заполярной отличаются от кимберлитов Далдын-Алакитского, Мирнинского и Среднемархинского районов, где коррозия встречается на единичных кристаллах (<3%). Для 6,4% кристаллов отмечена скульптура, визуально схожая с леденцовой, описанной как результат износа алмазов россыпей в прибрежно-морских условиях в работах [Кухаренко, 1955; Афанасьев и др., 2000]. Для алмазов из трубки Заполярная леденцовая скульптура — результат коррозионного травления совместно со сглаживающим растворением (рис. 5, б).

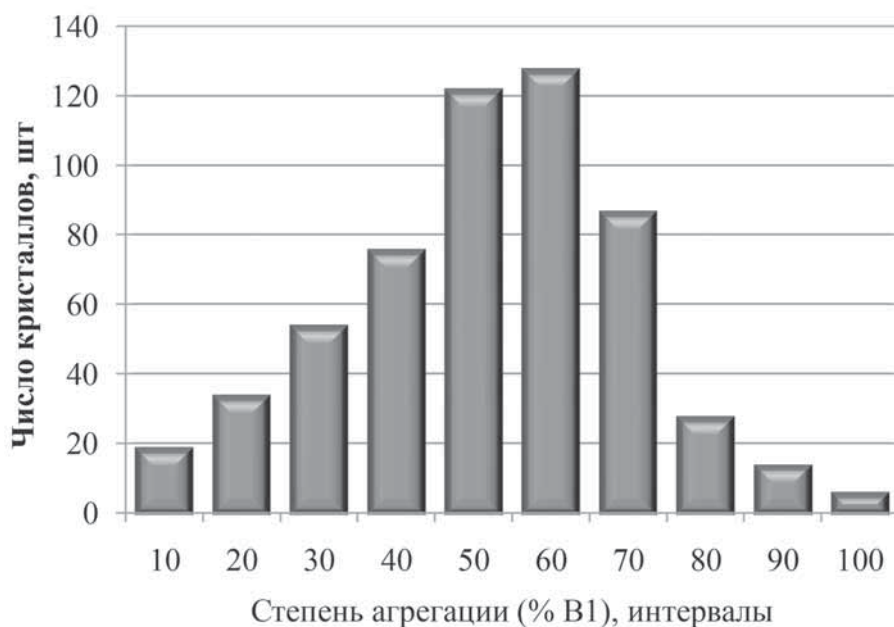
По высокому содержанию кристаллов с глубокой люминесценцией и наличию алмазов с зональным свечением в УФ-лучах алмазы из трубки

Заполярная близки к алмазам из тел Далдыно-Алакитского района.

Согласно данным ИК-спектроскопии, распределение кристаллов по концентрации азота, как в виде А-, так и в виде В1-центров, не имеет выраженных локальных максимумов, что свидетельствует об образовании кристаллов трубки в ходе единого процесса. Распределение кристаллов по степени агрегации (% центров В1) характеризуется выраженным максимумом ~55% (рис. 11). Алмазы из трубки Заполярная относятся к средне-низкоазотным, что соответствует данным, полученным в работе [Зинчук и др., 2001]. Согласно данным [Криулина и др., 2013], сдвиг характеристического пика дефекта В2 в длинноволновую область ($1363,8 \text{ см}^{-1}$) отражает принадлежность алмазов из трубки Заполярная к умеренно титанистому типу кимберлитов. Среднее содержание водородных дефектов — одно из самых низких среди алмазов Якутской алмазоносной провинции. По перечисленным показателям алмазы из трубки Заполярная наиболее близки к алмазам Далдынского кимберлитового поля.

Отметим широкое развитие в алмазах из трубки Заполярная процессов пластической деформации, что находит отражение в значительном (более половины кристаллов) развитии эпигенетической коричневой окраски. Связанная с ней [Gaft et al., 2015] полоса с максимумом 720 нм регистрируется в спектрах ФЛ у 46% кристаллов; в ИК-спектрах полоса “amber”-центра [Massi et al., 2005] с максимумом около 4170 см^{-1} зарегистрирована в 11,5% кристаллов. Для пластически деформированных кристаллов характерно значительное распространение ЭПР-центров N2 и W7 [Минеева и др., 1996]. Центры N2 (в том числе в группе P2+N2)

Рис. 11. Распределение кристаллов по степени агрегации (% центров B1)



обнаружены в 42,6% кристаллов, а центры W7 — в 38,6% кристаллов.

По набору парамагнитных центров, а также по соотношению концентрации центров P1/P2 алмазы из трубки Заполярная близки к алмазам Далдынского кимберлитового поля. Среди исследованных нами выборок алмазов из разных кимберлитовых трубок России алмазы из трубки Заполярная лидируют по доле кристаллов, в которых обнаружен центр W7, при этом значения концентрации центра не экстремально высокие.

Заключение. Алмазы из трубки Заполярная образовались в кимберлитах умеренно-титанистого типа и относятся к средне- и низкоазотным. По составу включений они принадлежат к ультра-основному парагенезису, дунит-гарцбургитовой и лерцолитовой ассоциациям. К их типоморфным признакам можно отнести близкое к максимальному среди алмазов из трубок России содержание дефектов B2 (плейтелетс), низкое содержание водорода (CH-центр), а также широкое распространение парамагнитных центров W7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев В.П., Ефимова Э.С., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Атлас морфологии алмазов России. Новосибирск: СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 2000. 298 с.

ГОСТ Р 51519.2-99 — Алмазы природные необработанные. М.: Стандартинформ, 2005.

Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Особенности алмазов из кимберлитовых тел Сибирской платформы // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. 1999. № 7. С. 155–167.

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

Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Махин А.И. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитов северо-востока Сибирской и Архангельской алмазоносных провинций // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. Геология. 2001. № 11. С. 106–115.

Кроме того, для алмазов из трубки Заполярная характерно:

- преобладание кристаллов I разновидности по классификации Ю.Л. Орлова, большинство среди которых — кривогранные додекаэдроиды;
- широкое развитие процессов сглаживающего окислительного растворения, а также аксессуарного коррозионного травления;
- преобладание кристаллов с видимой окраской;
- широкое распространение процессов пластической деформации.

По люминесцентным свойствам, а также по составу и взаимным соотношениям примесных структурных центров, устанавливаемых методами ИК- и ЭПР-спектроскопии, алмазы из трубки Заполярная наиболее близки к алмазам Далдыно-Алакитского района из трубок Комсомольская и Удачная.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзаказа № 1719189201752017729147283/2017-175 от 16.06.2017.

Кононова В.А., Богатилов О.А., Кондрашов И.А. Кимберлиты и лампроиты: критерии сходства и различий // Петрология. 2011. Т 19, № 1. С. 35–55.

Костровицкий С.И., Спеццус З.В., Яковлев Д.А. и др. Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: ООО «МГТ», 2015. 480 с.

Криулина Г.Ю., Гаранин В.К., Самосоров Г.Г. Прогнозирование качества алмазного сырья в месторождениях различных петрохимических типов // Изв. вузов. Геология и разведка. 2013. № 6. С. 25–32.

Кухаренко А.А. Алмазы Урала. М.: Госгеолтехиздат, 1955. 515 с.

Минеева Р.М., Титков С.В., Сперанский А.В., Бершов Л.В. ЭПР-классификация природных алмазов // Докл. РАН. 1996. Т. 346, № 5. С. 660–663.

Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М.: Наука, 1984. 221 с.

Титков С.В. Изоморфные примеси в природных алмазах и их генетическое значение: Автореф. докт. дисс. М., 2018.

Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М: Недра, 1998. 556 с.

Gaft M., Reisfeld R., Panzer G. Modern luminescence spectroscopy of minerals. Springer, 2015. 606 p.

Massi L., Fritsch E., Collins A.T. et al. The amber center and their relation to the brown colour in diamond // *Diamond and related materials*. 2005. Vol. 14. P. 1623–1629.

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

Поступила в редакцию 12.05.2020

Поступила с доработки 30.10.2020

Принята к публикации 30.10.2020