УДК 553.08

АЛМАЗЫ ТРУБКИ УДАЧНАЯ: ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК С ГЛУБИНОЙ И ПОСТМАНТИЙНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ

Сергей Васильевич Вяткин[1]✉, Галина Юрьевна Криулина[2], Виктор Константинович Гаранин[3]

[1] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; vyt_box@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-5054-575X
[2] Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; galinadiamond@gmail.com
[3] Минералогический музей имени А.Е. Ферсмана, Москва, Россия; vgaranin@mail.ru

Аннотация. Исследовано закономерное изменение с глубиной нахождения комплекса характеристик алмазов из трубки Удачная: габитуса кристаллов, морфологии их поверхности, окраски, наличия включений, спектроскопических характеристик (ИК, ФЛ, ЭПР). Установлено увеличение с глубиной нахождения алмазов интенсивности процессов их растворения и травления, пластической деформации, а также процессов агрегации структурных примесей азота. Предполагается, что эти изменения происходили на промежуточном этапе становления трубки Удачная в условиях магматического очага.

***Ключевые слова*:** алмаз, трубка Удачная, морфология, типоморфизм, ИК, ФЛ, ЭПР

Для цитирования: *Вяткин С.В., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К.* Алмазы трубки Удачная: изменение характеристик с глубиной и постмантийная эволюция // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 3. С. 45–53.

DIAMONDS OF THE UDACHNAYA PIPE: CHANGING CHARACTERISTICS WITH DEPTH AND POST-MANTLE EVOLUTION

Sergey V. Vyatkin[1]✉, Galina Y. Kriulina[2], Viktor K. Garanin[3]

[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; vyt_box@mail.ru✉, https://orcid.org/0000-0002-5054-575X
[2] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; galinadiamond@gmail.com
[3] Fersman Mineralogical Museum, Moscow, Russia; vgaranin@mail.ru

Abstract. A regular change with the depth of finding of the complex of characteristics of Udachnaya pipe diamonds is studied: the habitus of crystals, the morphology of their surface, color, the presence of inclusions, spectroscopic characteristics (IR, FL, EPR). An increase in the intensity of the processes of their dissolution and etching, plastic deformation, as well as the processes of aggregation of structural nitrogen impurities with the depth of finding diamonds was found. It is assumed that these changes occurred at the intermediate stage of the formation of the Udachnaya pipe, in the conditions of a magmatic chamber.

***Keywords*:** diamond, Udachnaya pipe, morphology, typomorphism, IR, FL, EPR

For citation: Vyatkin S.V., Kriulina G.Y., Garanin V.K. Diamonds of the Udachnaya pipe: changing characteristics with depth and post-mantle evolution. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 3: 45–53 (In Russ.).

Введение. Трубка Удачная, принадлежащая Далдынскому кимберлитовому полю Якутской алмазоносной провинции, открыта в 1955 г., она стала одним из основных по объему добычи месторождений алмазов в России. Трубка отрабатывалась карьерным способом с 1971 по 2016 г., открытые разработки начались с горизонта +320 м (здесь и далее — абсолютные отметки) и завершены горизонтом –320 м. За это время добыто более 350 млн т руды, к 2015 г. карьер обеспечил производство более половины всех алмазов Западной Якутии. Работы по строительству рудника «Удачный» были начаты в 2004 г., первые партии руды добыты подземным способом в 2014 г. (http://www.alrosa.ru/). Месторождение трубка Удачная типично для Якутской алмазоносной провинции, а значительный период отработки дает возможность проследить изменения свойств алмазов с глубиной, что имеет важное теоретическое и практическое значение и для установления закономерностей алмазообразования, и для прогнозирования алмазоносности глубоких горизонтов других кимберлитовых трубок провинции.

Трубка Удачная образована двумя телами — западным и восточным, которые образовывали единый комплекс на поверхности, но обособлялись одно от другого с глубиной начиная с горизонта –270 м [Костровицкий и др., 2015]. Этапы формирования кимберлитового комплекса месторождения алмазов трубки Удачная выделены в работе [Егоров, Мельников, 2013]. С ранним этапом связано образование

малопродуктивных интрузивных тел, выполненных слюдяными, интенсивно карбонатизированными и массивными крупнопорфировыми (монтичеллит-оливиновыми) кимберлитами. Основной объем кимберлитовых фаз трубок Удачная-Западная и Удачная-Восточная образовался во второй этап кимберлитового магматизма, когда произошло внедрение кимберлитового материала в виде брекчиевидного овоидового кимберлита, кимберлитовой брекчии в трубке Удачная-Западная, протокластического и дейтеропорфирового кимберлитов, кимберлитовой брекчии в трубке Удачная-Восточная. Во время подъема они дезинтегрировали и частично ассимилировали встречающиеся на пути небольшие по объему ранние фазы массивных порфировых кимберлитов. Временной интервал между двумя этапами становления кимберлитового комплекса мог составлять десятки миллионов лет.

Нами изучены две представительные коллекции алмазов из трубки Удачная, предоставленные компанией АЛРОСА: алмазы добычи 2012 г. (500 кристаллов), извлеченные из целиков в нижней части карьера (горизонт –300 м), и алмазы, добытые в 2017 г. на подземном руднике «Удачный» (1000 кристаллов), горизонт –450 м. Также в работе использованы литературные данные. Морфология 319 кристаллов алмаза (197 и 122 шт. из западного и восточного тел соответственно), извлеченных из пород горизонта +10 м, приведена согласно [Барашков, Алтухова, 2005]. В работах [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003] представлены статистические характеристики для более чем 8 тыс. алмазов, добытых в 1990-х гг. при отработке горизонтов нижней трети карьера (западное тело — 2877 шт., восточное — 5310 шт.). Эти данные для удобства рассмотрения условно объединены как горизонт –120 м. Это упрощение, а также то, что в исследованных коллекциях алмазов 2012 г. и 2017 г. добычи отсутствует разделение по западному и восточному телам, следует учитывать при использовании результатов нашей работы.

Материалы и методы исследований. Отбор коллекций для исследования проводился методом квартования из промышленных проб алмазного сырья. Исходная проба алмазов добычи 2012 г. составляла 5000 кристаллов алмаза размерновесовых групп –12+11, –11+9, –9+5. Исходная проба алмазов добычи 2017 г. составляла 2423 кристалла алмаза размерно-весовых групп –12+11, –9+7. Выполнен статистический анализ кристаллов по окраске, морфологии и характеру фотолюминесценции, на основе которого с соблюдением пропорционального наличия кристаллов выделены коллекции для исследований в 500 и 1000 кристаллов соответственно.

Для всех алмазов этих выборок проведено покристальное минералогическое описание. Кроме того, для части кристаллов выполнены исследования методами фотолюминесцентной спектроскопии (361 кристалл с горизонта –450 м), инфракрасной спектроскопии (141 и 328 кристаллов с горизонтов –300 и –450 м соответственно) и электронного парамагнитого резонанса (информативные спектры получены для 34 и 213 кристаллов с горизонтов –300 и –450 м соответственно). Спектроскопические свойства алмаза, изучаемые методами ФЛ, ИК и ЭПР, обусловлены наличием в его кристаллической структуре различных примесных центров. Их систематика дана согласно [Dischler, 2013; Zaitsev, 2001; Минеева и др., 1996].

Минералогическое описание алмазов сделано под бинокуляром 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 использован спектрофлюориметр Fluorolog-3. 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, локальное травление, наличие двойников и сростков, степень сохранности, характер и интенсивность окраски, визуальная оценка наличия и состава включений, а также цвет, однородность и интенсивность фотолюминесценции.

Габитус и морфология кристаллов. Для корректного сравнения данных о габитусе кристаллов, полученных из разных источников, потребовалось, во-первых, унифицировать их разделение на группы (с использованием наименее дробного деления) и, во-вторых, исключить из рассмотрения бесформенные осколки и обломки. Последнее необходимо, так как сохранность кристаллов, как правило, снижается с увеличением глубины их извлечения по техногенной причине — увеличивается прочность пород. Кроме того, границы определимости формы в некоторой степени субъективны у разных исследователей. Оба эти фактора маскируют истинные изменения процентного содержания преобладающих габитусов кристаллов с глубиной. Распределение кристаллов алмаза по габитусу (с учетом такой обработки данных) отражено в табл. 1.

Главная тенденция изменения габитуса алмазов из трубки Удачная по мере увеличения глубины — это, безусловно, трехкратное снижение процентного содержания октаэдрических кристаллов. Такое сокращение компенсируется значительным ростом доли кристаллов переходного габитуса ряда октаэдр–додекаэдроид и заметным увеличением процентного содержания ламинарных додекаэдроидов. Также отметим снижение количества псевдокубических алмазов I разновидности и поликристаллических агрегатов VII–IX разновидностей по классификации Ю.Л. Орлова.

Морфология поверхности алмазов из трубки Удачная описана для кристаллов с горизонтов –300 и

Таблица 1

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

Разновидности по классификации Ю.Л. Орлова	Форма кристаллов	Процент содержания по горизонтам (абс. отм.)*, %			
		+10 м	–120 м	–300 м	–450 м
I	октаэдр	40,1	24,4	19,2	13,4
	октаэдр — додекаэдроид	20,4	23,3	26,0	37,3
	ламинарный додекаэдроид	32,3	35,7	34,8	40,5
	додекаэдроид уральского типа		7,5	13,2	3,3
	псевдокуб	0,9	1,0	0,2	0,2
II	куб — тетрагексаэдр	н.д.**	0,8	0,4	0,7
III	куб	н.д.	0,1	0,2	0,2
IV	алмаз в оболочке	н.д.	0,2	0,2	0,7
VII–IX	поликристаллические агрегаты	6,3	7,0	5,8	3,7

* Горизонт +10 м — по [Барашков, Алтухова, 2005]; –120 м — по [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003]; **н.д. — нет данных.

–450 м. Результаты сгруппированы как формы роста (рис. 1), растворения (рис. 2), локального травления и проявления процессов пластической деформации (рис. 3), фото алмазов представлены на рис. 4–6.

Работы по экспериментальному изучению процессов растворения алмаза, в том числе в средах, соответствующих кимберлитовым породам [Хохряков 2000, 2004; Сонин 2005; Пальянов и др., 2015; Грязнов и др., 2019], дают основание пересмотреть точку зрения на происхождение некоторых морфологических характеристик кристаллов алмаза. В частности, ступенчатость, параллельная штриховка и некоторые другие морфологические формы кристаллов алмаза из трубки Удачная в соответствии с отмеченными выше исследованиями, а также по совокупности с другими совместно наблюдаемыми особенностями рассматриваются нами как формы растворения.

Формы роста сохранены в большей степени для кристаллов с горизонта –300 м. Формы растворения — округление вершин, овализация ребер, штриховки растворения и ступенчатость — в более значительной степени проявлены у кристаллов с горизонта –450 м. Кроме того, для алмазов с горизонта –450 м более распространены формы локального травления — каверны, треугольные и тетрагональные фигуры и пирамиды. В то же время отметим чувствительность морфологии кристаллов к изменениям условий: у алмазов с горизонта –300 м более распространены слабые, но с широким охватом поверхности формы локального травления — ямки, коррозия и матировка.

В значительно более сильной степени у кристаллов с горизонта –450 м проявлены процессы пластической деформации, отраженные в морфологии поверхности. Это линии скольжения, декорированные фигурами локального травления; полосы пластической деформации, выраженные уступами на поверхности кристалла; шагреневая поверхность.

Распределение алмазов по наличию двойников и сростков отражено в табл. 2. Разделение по прозрачности и степени сохранности алмазов выполнено для горизонтов –300 и –450 м, при этом

Таблица 2

Наличие двойников и сростков кристаллов алмаза из трубки Удачная

Характер образования	Процент содержания по горизонтам (абс. отм.)*, %			
	+10 м	–120 м	–300 м	–450 м
Монокристалл	64,6	68,7	77,2	63,9
Сросток	29,8	22,1	11,6	20,1
Двойник	5,6	9,2	11,2	16,0

* Горизонт +10 м — по [Барашков, Алтухова, 2005]; –120 м — по [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003].

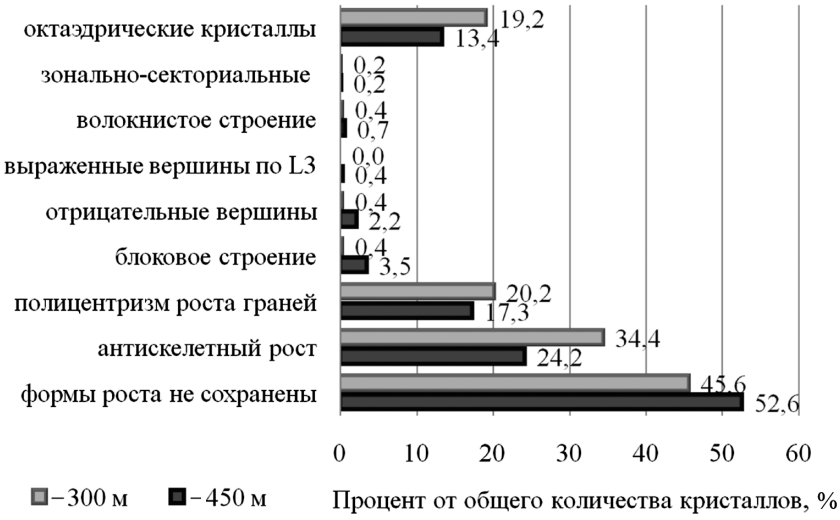

Рис. 1. Частота проявления различных форм роста на поверхности кристаллов алмаза из трубки Удачная

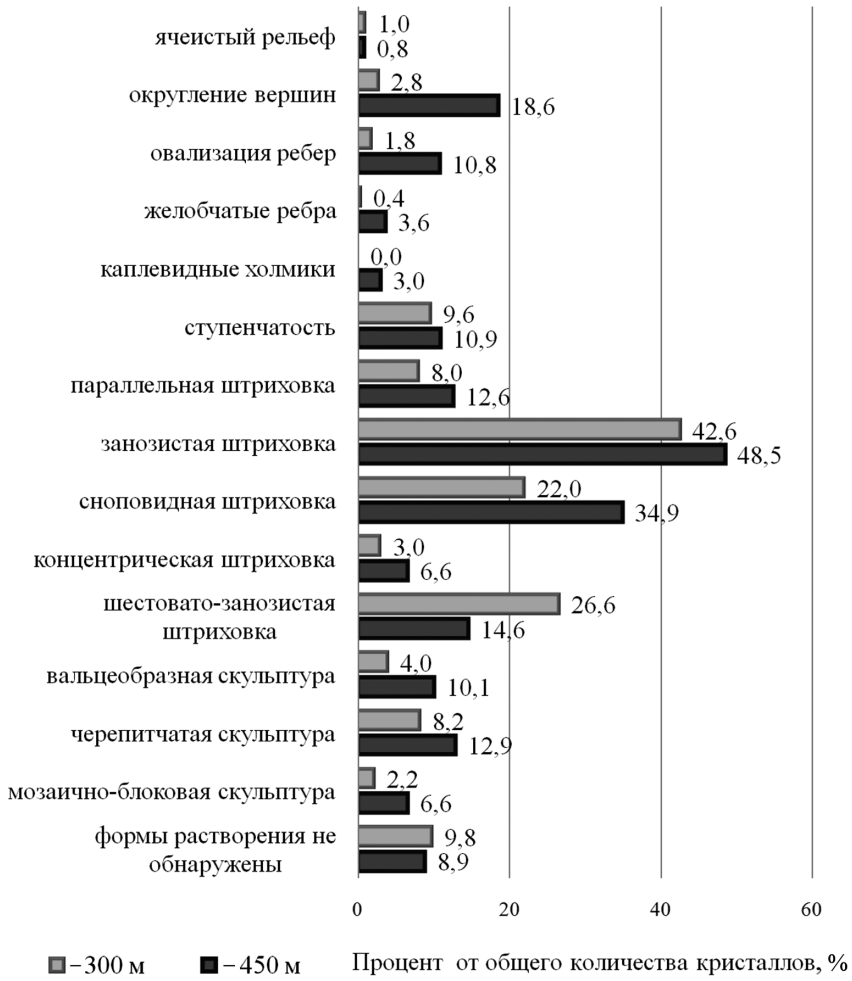

Рис. 2. Частота проявления различных форм растворения на поверхности кристаллов алмаза из трубки Удачная. Сумма различных форм превышает 100%, так как на одном кристалле часто встречается несколько типов форм. Графа «формы растворения не обнаружены» объединяет как кристаллы без следов растворения, так и индивиды, оформленные сколовыми поверхностями

зафиксированные изменения невелики. Количество прозрачных кристаллов с глубиной уменьшается с 94,2 до 89,4%, и, что интересно, количество непрозрачных индивидов при этом также снижается с 1,8 до 1,3%. Возрастают же доли полупрозрачных (с 2,8 до 5,6%) и просвечивающих алмазов (с 1,2 до 3,8%).

На долю целых (и с незначительными сколами) кристаллов приходится 55,8 и 48,9% для горизонтов –300 и –450 м соответственно, на долю кристаллов со сколами — от 1/3 до 2/3 объема — 11,2 и 8,5%. Обломки и осколки кристаллов с объемом <1/3 от полного составляют 33,0 и 42,6% соответственно. С глубиной уменьшается доля сколов протомагматического характера — с 30,6 до 20,8%, что компенсируется почти равным (на 2–4%) увеличением сколов техногенного, механического и комбинационного характера.

В табл. 3 приведены данные об окраске алмазов из трубки Удачная для горизонтов –300 и –450 м, полученные при покристальном описании. Их имеет смысл рассматривать в сравнении с оценками окраски алмазов, добытых в 1990-х гг. (условный горизонт –120 м). В частности, согласно данным [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003], основную массу алмазов составляют бесцветные и слабоокрашенные индивиды, на долю которых приходится 66,7–75% от общего количества всех кристаллов. Отметим, что для горизонта –300 м эта величина (бесцветные+слабый оттенок) составляет лишь 64,2%, а для горизонта –450 м — всего 45,7%. Количество кристаллов разных оттенков коричневого цвета [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003] оценивают в 33–40%. Для горизонта –300 м эта величина составляет уже 38,2%, а для горизонта –450 м — 44,1%. Несколько возрастает с глубиной и содержание алмазов, окрашенных в оттенки серого цвета, — 11,0 и 9,9% соответственно (против ≤ 7% для горизонта –120 м). Кроме того, авторы работы [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003] приводят следующие данные об окраске алмазов с горизонта –120 м: «Другие цвета окраски встречаются значительно реже. К ним относится желтая и желто-зеленая окраска, характерная для алмазов II и IV разновидностей. Еще более редкой является соломенно-желтая и цвета морской волны окраска кристаллов I разновидности» [там же]. Отметим, что содержание алмазов, окрашенных в оттенки желтого и желто-зеленого, достигает 10,2% для горизонта –300 и 19,0% для горизонта –450 м. Можно предположить, что в работах [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003] речь идет о интенсивно окрашенных кристаллах.

Процентные соотношения минералов включений в алмазах сгоризонтов –300 и –450 м отражены на рис. 7. Определение проведено визуально, выборочный анализ небольшого числа кристаллов с приповерхностным расположением включений методом КР-спектроскопии не выявил существенных ошибок в диагностике. Обозначение графит/сульфид введено для включений, которые нельзя однозначно

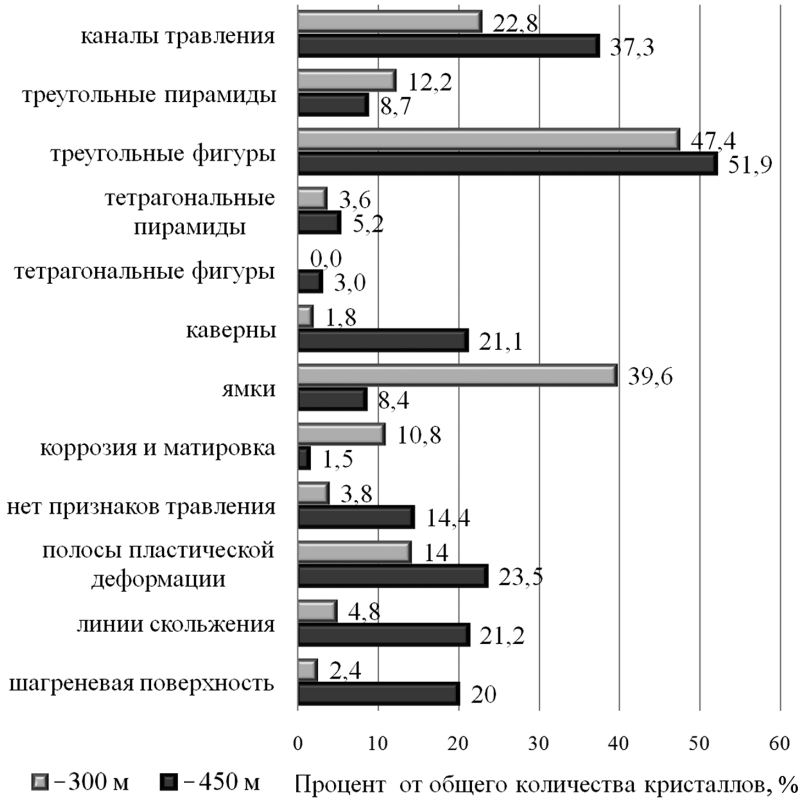

Рис. 3. Частота встречаемости различных типов локального травления поверхности, а также форм проявления пластической деформации кристаллов алмаза из трубки Удачная. Сумма различных типов превышает 100%, так как на одном кристалле может быть проявлено несколько из них. Под пирамидами и фигурами подразумеваются отрицательные формы

разделить между этими категориями. К группе оливин–сульфид отнесены включения, образованные из оливина и сульфидного минерала по дисковидной трещине вокруг него.

В работе [Зинчук, Коптиль, 2003] для горизонта –120 м оценено общее содержание алмазов с твердыми включениями в 43,4–60,5% от общего количества кристаллов. Для горизонта –300 м это количество составило 47,2%, а для горизонта –450 м — 50,7%. Наиболее распространенное включение на всех горизонтах — графит. Доля сингенетических включений в работе [Зинчук, Коптиль, 2003] указана в диапазоне 3,8–8,0%, в то время как для горизонтов –300 и –450 м она составляет 17 и 23% соответственно. Однако отметим, что прямое сравнение данных не совсем правомерно, так как процент обнаружения включений зависит от размера кристаллов. Для горизонтов –300 и –450 м выявлена резко возрастающая с глубиной роль сульфидных включений.

Визуальная фотолюминесценция. Бóльшая часть кристаллов алмаза трубки Удачная люминесцирует под УФ-излучением. При этом резко доминируют алмазы с голубой люминесценцией, количество же алмазов с желтым свечением по сравнению с выборками предшествующих периодов добычи снижается, Отмечено также снижение до нескольких процентов доли алмазов с желто-зеленым и зеленым свечением. Встречаются единичные кристаллы с зеленым и оранжевым цветом люминесценции. Вместе с тем с глубиной отработки трубки Удачная увеличивается содержание кристаллов с зональной люминесценцией, а также с ее отсутствием (не диагностируется визуально): для горизонта –450 м уже более 1/4 коллекции приходится на инертные кристаллы (табл. 4).

Таблица 3

Окраска кристаллов алмаза с горизонтов –300 и –450 м из трубки Удачная

Окраска и ее интенсивность, процент числа кристаллов с горизонтов –300 / –450 м	Слабый оттенок	Видимый оттенок	Цвет	Всего, %
Бесцветная	40,6/26,2			
Желтая	2,2/8,4	3,8/7,5	3,8/2,9	9,8/18,8
Желто-зеленая	0,0/0,1	0,2/0,1	0,2/0,0	0,4/0,2
Коричневая	17,0/10,1	2,6/11,0	12,0/16,7	38,2/44,1
Дымчато-коричневая	2,4/0,8	2,2/1,3	1,6/2,3	
Оранжево-коричневая		0,4/0,0		
Розово-коричневая		00/1,9		
Серая	1,4/0,0	4,0/0,6	4,8/9,2	11,0/9,9
Серо-желтая	0,6/0,1	0,2/0,0		
Черная	0,0/0,8			

Фотолюминесцентная спектроскопия. Исследования методом фотолюминесцентной спектроскопии выполнены для кристаллов с горизонта –450 м. Данные о частоте встречаемости основных пиков люминесценции в кристаллах алмаза приведены в

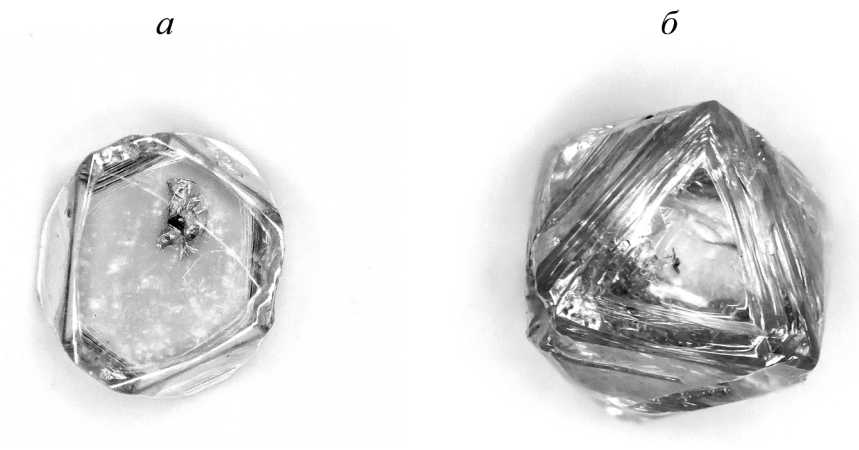

Рис. 4. Алмазы с горизонта –300 м: *а* — обр. 821-14, бесцветный, плоскогранный, уплощенный октаэдрический кристалл со слабо выраженным округлением ребер и сноповидной штриховкой, включение — гранат; *б* — обр. 836-2, желтоватый октаэдрический кристалл со ступенчатостью и расщеплением вершин, сноповидно-занозистой штриховкой и отрицательными треугольными фигурами травления. Здесь и далее фото алмазов приведены в одном масштабе, поле зрения 7×5,2 мм

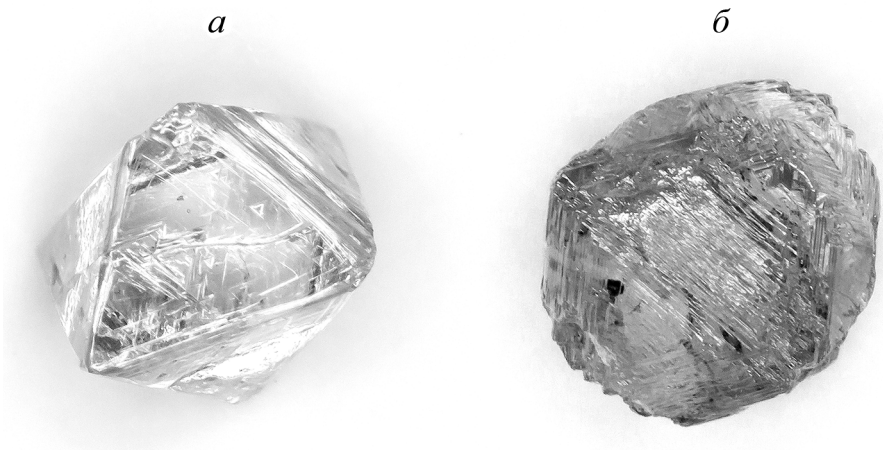

Рис. 5. Алмазы с горизонта –450 м: *а* — обр. Удп 7-5, бесцветный, плоскогранный октаэдрический кристалл с расщеплением вершин и незначительным округлением вершин и ребер, сноповидной штриховкой и треугольными фигурами травления; *б* — обр. Удп 6-13, плоскогранно-кривогранный кристалл с коричневым оттенком, переходной формы ряда октаэдр–ромбододекаэдр, со сноповидно-занозистой штриховкой, округлением вершин и ребер

Рис. 6. Алмазы с горизонта –450 м: *а* — обр. Удп 5-1, коричневый ламинарный додекаэдроид без гранного шва, со сноповидной и занозистой штриховкой, резкими полосами пластической деформации и шагреневой поверхностью; *б* — обр. Удп 9-1, коричневый кривогранный додекаэдроид уральского типа с отрицательными треугольными пирамидами, глубокими каналами травления и шагреневой поверхностью

табл. 5. В подавляющем большинстве изученных образцов алмаза регистрируется интенсивная полоса поглощения N3 (415 нм) совместно с полосами 428 и 440 нм. Также 53% алмазов имеют широкую бесструктурную полосу с максимумом на 520 нм, наличие этой полосы вносит белесую составляющую в видимое восприятие люминесценции. Наиболее распространенные системы люминесценции связаны с процессами высокотемпературного отжига и обусловлены наличием в кристаллах центров N3, H3 и центров группы S. В 5% алмазов центры N3, H3 и S3 зафиксированы совместно. В 41% кристаллов изученной коллекции совместно наблюдаются пики N3, H3, 520 нм.

ИК-спектроскопия. Данные исследований алмазов трубки Удачная методом ИК-спектроскопии для горизонта –120 м [Зинчук, Коптиль, 2003], а также результаты, полученные для горизонтов –300 и –450 м, представлены в табл. 6.

Согласно приведенным данным по мере увеличения глубины трубки Удачная среднее содержание А-центров в алмазах уменьшается, а В1-центров, напротив, растет. При этом распределение концентрации А-центров остается одномодальным, его максимум смещается незначительно (рис. 8). Рост степени агрегации азота (% В1) свидетельствует об увеличении температуры посткристаллизационного отжига с глубиной; увеличивается также средний

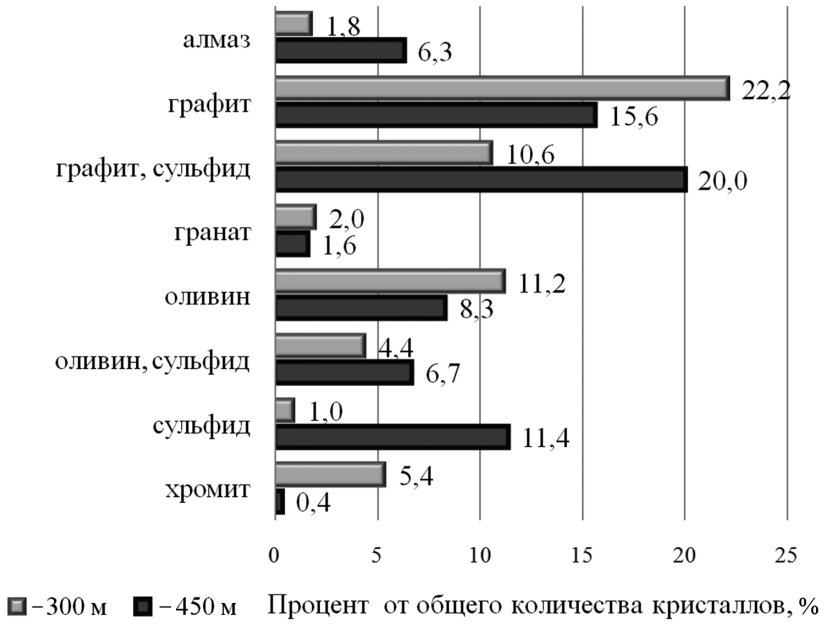

Рис. 7. Минералы включений в алмазах с горизонтов –300 и –450 м трубки Удачная

Таблица 4

Визуальная люминесценция кристаллов алмаза из трубки Удачная для горизонтов –300 и — 450 м

Люминесценция	Процент содержания по горизонтам (абс. отм.), %		
	–120 м*	–300 м	–450 м
Белесая		0,8	1,6
Сине-голубая	45,9	69,8	58,7
Оранжевая		0,4	0,8
Желтая, зеленая	21,4	12,4	5,2
Розово-сиреневая	9,1	0,4	
Зональная		1,4	7,7
Неопределенная	16,5		
Отсутствует	7,1	14,8	26

* По данным [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003].

Таблица 5

Частота встречаемости систем люминесценции в кристаллах алмаза из трубки Удачная, горизонт –450 м

Частота встречаемости систем люминесценции, %								
N3, регистрируется/доминирует	H3, 503 нм	S1, 510 нм	S2, 489 нм	S2, 470 нм	S3, 497 нм	520 нм	583–585 нм	655 нм
98/97	63,6	3,2	56,8	1,6	13,6	53,6	13,6	5,6

показатель поглощения B2-центров. Содержание центров CH изменяется слабо. Общее содержание азота (Ntot) низкое по сравнению с алмазами из других трубок [Kaminsky, Khachtryan, 2001].

Результаты исследования алмазов методом ЭПР отражены в табл. 7. Концентрацию парамагнитных центров рассчитывали с использованием эталонных образцов. Спектры снимали в ориентации кристаллов H||L4, юстировка проводилась по центрам P1 (иногда по W7). Согласно приведенным данным от горизонта –300 м к горизонту –450 м значительно

Таблица 6

Данные ИК-спектроскопии алмазов из трубки Удачная

Горизонт, абс. отм.	–120 м*	–300 м	–450 м
Исследовано кристаллов, шт.	39	141	328
A-центры, средняя концентрация, ppm	295	274	203
A-центры, максимальная концентрация, ppm		1510	1103
B1-центры, средняя концентрация, ppm	133	136	156
B1-центры, максимальная концентрация, ppm		1499	1696
% B1	31	32	39
Ntot, среднее значение, ppm	428	410	359
Ntot, максимальное значение, ppm		2123	1732
B2-центры, средний показатель поглощения, $см^{-1}$	4,2	5,8	6,7
CH-центры, средний показатель поглощения, $см^{-1}$	1,3	1,4	1,2

* По данным [Зинчук, Коптиль, 1999, 2003].

увеличиваются доли центров P2, N2 и W7, при этом их средняя концентрация меняется незначительно. Увеличение доли центров P2 свидетельствует об усилении процесса агрегации азотных центров в структуре алмаза при посткристаллизационном отжиге. Количество центров N2 и W7 — индикатор активности процессов пластической деформации кристаллов. Процент кристаллов, содержащих центр OK1, весьма мал, а количество исследованных методом ЭПР алмазов с горизонта –350 м значительно меньше, чем с горизонта –450 м, поэтому говорить о появлении центров OK1 некорректно.

Сравнение свойств алмазов с разных горизонтов трубки Удачная показывает последовательное изменение некоторых характеристик с увеличением

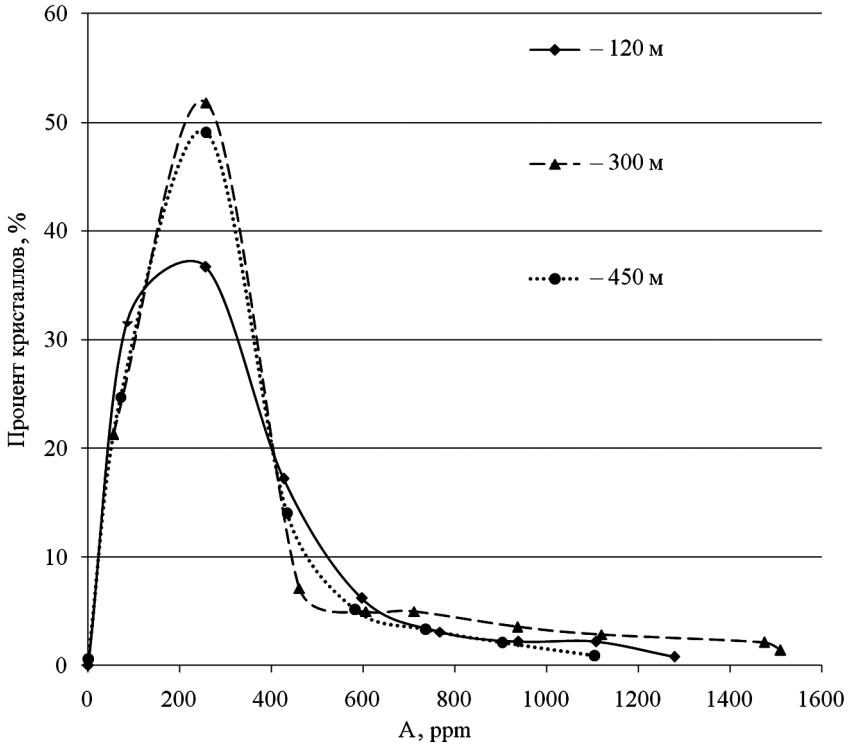

Рис. 8. Распределение алмазов с горизонтов –120, –300 и –450 м трубки Удачная по концентрации центров А (распределение для горизонта –120 м построено по данным [Зинчук, Коптиль, 2003])

глубины их нахождения. Уменьшается доля алмазов первичного октаэдрического габитуса, а также кристаллов с сохранением форм роста на поверхности (табл. 1, рис. 1). Увеличивается интенсивность процессов растворения, локального травления и коррозии кристаллов (рис. 2–5). С глубиной также увеличивается доля кристаллов, подвергавшихся пластической деформации, что отражено в морфологии поверхности (полосы пластической деформации, линии скольжения, шагреневая поверхность, рис. 3, 6), в увеличении доли окрашенных в коричневые тона кристаллов (табл. 3) и кристаллов, имеющих связанные с пластической деформацией парамагнитные центры N2, W7 (табл. 7). Анализ данных ИК и ЭПР выявляет увеличение с глубиной интенсивности процессов агрегации азота в кристаллической структуре, что отражается в уменьшении средней концентрации А-центров в пользу В1-центров (ИК), а также в увеличении доли центров Р2 (ЭПР) (табл. 6, 7). При этом среднее значение общего содержания азота (Ntot) в кристаллах изменяется незначительно, величина этих изменений не дает оснований считать их статистически значимыми.

Перечисленные изменения в характеристиках алмазов с разных горизонтов определяют наличие в геологической истории кимберлитов трубки Удачная этапа, на котором возникновение таких изменений становится возможным. В предположениях о возможной локализации места изменений следует учитывать следующие условия.

1. Для возникновения такого закономерного изменения характеристик алмазов требуются вертикальные градиенты давления, температуры и, возможно, величины соотношения $H_2O/(CO_2+CO)$ в содержащей алмазы среде.

2. Диффузионные процессы агрегации азота в кристаллической структуре алмаза требуют продолжительного времени нахождения кристаллов при повышенной температуре. Высокая скорость подъема кимберлитового материала при образовании самой трубки, а также сравнительно быстрое ее остывание практически исключают возможность протекания процессов агрегации азота в алмазах с момента начала подъема кимберлитового материала из магматического очага.

Таблица 7

Примесные парамагнитные центры в кристаллах алмаза из трубки Удачная

Показатель	Парамагнитный центр					
	P1	P2	N2	W7	W21	OK1
Кристаллы, содержащие центр, %	55,9/53,5*	52,9/61,5	35,3/43,2	23,5/23,5	17,6/3,8	0/1,9
Максимальная концентрация, ppm	13,7/12,1	7,9/12,2	1,3/3,1	1,4/1,7	0,004/0,002	0/0,07
Средняя концентрация, ppm	2,4/0,5	1,3/1,0	0,3/0,5	0,4/0,6	0,0013/ 0,0014	0/0,05
Доля центров среди всех обнаруженных, %	60,4/20,7	31,1/49,7	4,5/18,0	4,0/11,6	0,01/0,004	0/0,08

*Указаны значения для горизонтов –350 и –450 м соответственно.

3. При нахождении алмазов в мантийных условиях времени для прохождения процессов агрегации было достаточно. Однако маловероятно, чтобы температурный градиент в условиях мантийного резервуара был настолько большим, чтобы привести к возникновению описанных выше закономерных различий в характеристиках алмазов, фиксируемых уже при разнице глубины в несколько сотен метров кимберлитовой трубки. Кроме того, с учетом огромной разницы в объеме и геометрии мантийного резервуара и внутритрубочного пространства, а также сотен километров подъема мантийного материала — даже при возникновении такого расслоения в условиях мантии — маловероятно, чтобы оно сохранилось в кимберлитах при образовании трубки.

4. Согласно экспериментальным исследованиям [Хохряков 2000, 2004, Сонин, 2005], характер растворения и травления поверхности большинства алмазов из трубки Удачная указывает на условия в магматическом очаге промежуточной стадии между мантийным резервуаром и приповерхностными условиями.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют о возникновении вторичных изменений характеристик алмазов из трубки Удачная во время их нахождения в магматическом очаге. Это время было достаточно продолжительным для проявления процессов агрегации азотных центров в структуре алмаза при посткристаллизационном отжиге, а сам магматический очаг представлял собой геологический объект, вертикальная протяженность которого обусловливала возникновение градиентов температуры, давления и, возможно, активности летучих компонентов. С этой точкой зрения согласуется и отсутствие закономерных изменений с глубиной тех параметров, которые определяются на стадии роста алмазов в мантийных условиях — суммарного содержания в них азота, а также состава сингенетических включений.

Заключение. С увеличением глубины нахождения изменяются характеристики алмазов из трубки Удачная: уменьшается доля алмазов октаэдрического габитуса, увеличивается интенсивность процессов растворения, травления, пластической деформации кристаллов. Также с глубиной увеличивается интенсивность процессов агрегации структурных примесей азота в алмазах. Эти изменения произошли в условиях магматического очага, в течение значительного периода времени, перед образованием трубки Удачная. Выявленные закономерности в той или иной степени могут быть проявлены для алмазов из других кимберлитовых трубок. При этом в случае реализации многократного порционного поступления кимберлитовых расплавов из магматического очага при формировании трубочного комплекса описанные изменения характеристик будут проявлены более интенсивно для алмазов поздних порций кимберлитового материала, поступивших с большей глубины магматического очага.

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность Е.А. Васильеву (Санкт-Петербургский Горный университет) за помощь в исследовании образцов алмаза методами ИК- и ФЛ-спектроскопии.

Финансирование. Работа выполнена в рамках госзаказа № 171918920175201772914728 3/2017-175 от 16.06.2017 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Барашков Ю.П., Алтухова З.А. Кристалломорфология и распределение алмазов в сложнопостроенных месторождениях (на примере кимберлитовой трубки Удачная, Якутия) // Геология алмазов — настоящее и будущее. Воронеж, 2005. С. 925–933.

Грязнов И.А., Жимулев Е.И., Сонин В.М. и др. Морфологические особенности кристаллов алмаза, возникающие при растворении в расплаве Fe-Ni-S при высоком давлении // Докл. РАН. 2019. Т. 489, № 5. С. 497–501.

Егоров К.Н., Мельников А.И. Структурно-вещественная эволюция системы кимберлитовых тел трубки Удачная // Руды и металлы. 2013. № 1. С. 53–59.

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.

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

Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н. Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 1–2. С. 254–272.

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

Сонин В.М. Моделирование эпигенетической эволюции кристаллов алмаза в флюидно-силикатных системах (по экспериментальным данным): Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 2005.

Хохряков А.Ф. Экспериментальное изучение образования округлых кристаллов алмаза // Вестн. ОГГГН РАН. 2000. Т. 1, № 5. С. 80–81.

Хохряков А.Ф. Растворение алмаза: экспериментальное исследование процессов и модель кристалломорфологической эволюции: Автореф. докт. дисс. Новосибирск, 2004.

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

Kaminsky F.V., Khachtryan G.K. Characteristics of nitrogen and other impurites in diamond, as revealed by infrared absorption data // Canad. Mineral. 2001. Vol. 39. P. 1733–1745.

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

Статья поступила в редакцию 13.06.2021,
одобрена после рецензирования 26.10.2021,
принята к публикации 31.05.2022