ISSN 2411-3336; e-ISSN 2541-9404

ЗАПИСКИ ГОРНОГО ИНСТИТУТА

Journal of Mining Institute

Сайт журнала: pmi.spmi.ru



Научная статья

Розово-фиолетовые алмазы из месторождения им. М.В.Ломоносова: морфология, спектроскопия, природа окраски

Г.Ю.КРИУЛИНА[1,2]✉, **С.В.ВЯТКИН**[1], **Е.А.ВАСИЛЬЕВ**[3]

[1] *Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*

[2] *АК «АЛРОСА», Мирный, Республика Саха (Якутия), Россия*

[3] *Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*

Как цитировать эту статью: Криулина Г.Ю., Вяткин С.В., Васильев Е.А. Розово-фиолетовые алмазы из месторождения им. М.В.Ломоносова: морфология, спектроскопия, природа окраски // Записки Горного института. 2023. Т. 263. С. 715-723. EDN NYGZOX

Аннотация. Представлены результаты первого комплексного исследования минералогических и спектроскопических (ИК, ФЛ, ЭПР) характеристик алмазов из месторождения им. М.В.Ломоносова (трубка Архангельская) с уникальной розовой, розово-фиолетовой окраской. Показано, что все кристаллы относятся к IaA-типу, с суммарным содержанием азота в интервале 500-1500 ppm, с низкой степенью его агрегации. Окраска неоднородна, сосредоточена в узких двойниковых слоях, ее причиной предположительно являются описанные ранее центры *M*2. На оттенок окраски влияет содержание парамагнитных центров *P*1 (*C*-дефект), наблюдается положительная корреляция насыщенности окраски и интенсивности парамагнитных центров *W*7. Предполагается конвергентная модель образования розовых алмазов, согласно которой определяющими факторами являются соотношение и концентрации структурных примесей в алмазе, его термическая история и условия пластической деформации, а не происхождение алмаза и петрохимические свойства вмещающих его пород.

Ключевые слова: алмаз; природа окраски; фотолюминесценция; азотные центры; инфракрасная спектроскопия; электронный парамагнитный резонанс; Архангельская алмазоносная провинция; месторождение им. М.В.Ломоносова

Благодарность. Работа выполнена в рамках НИР ЦИТИС № 121061600049-4 при поддержке Российского научного фонда, грант № 21-77-20026.

Поступила: 29.04.2023 ***Принята: 11.10.2023*** ***Онлайн: 27.10.2023*** ***Опубликована: 27.10.2023***

Введение. Бриллианты цветов Fancy Pink, Fancy Purple-Pink – одни из самых дорогих, сочетание розового оттенка или цвета с ювелирным качеством настолько редки, что делают такие алмазы уникальными. В мире только шесть месторождений, в которых есть немногочисленные, но стабильные находки розовых и фиолетовых алмазов. В России розовые и розово-фиолетовые алмазы встречаются в месторождениях им. М.В.Ломоносова и в трубке Интернациональная. Ранее, на примере месторождений Австралии (Аргайл), Индии, Танзании было предложено несколько механизмов формирования розовой и фиолетовой окрасок, однако условия их возникновения пока не определены.

Известно несколько типов розовой окраски алмаза [1-3]. Они различаются по спектрам поглощения [4, 5] – это либо широкая бесструктурная полоса в области 550 нм, либо системы поглощения с бесфононными линиями при 575 и 637 нм [6, 7]. Системы поглощения 575 и 637 нм принадлежат азотно-вакансионным центрам NV^0 и NV^-, соответственно [3, 8]. Розовая окраска первого типа неоднородна, в кристаллах она локализуется в отдельных плоскостях, индуцированных пластической деформацией [9-11]. Розовая окраска второго типа менее интенсивная, но однородная. Такая природа окраски обнаружена у некоторых исторических бриллиантов Индии, алмазы этого типа обладают весьма низкими концентрациями азота [2, 4, 12]. В природе такие кристаллы встречаются крайне редко, а для синтетических камней отработана методика получения розовой

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

окраски, связанная именно с центрами NV^0 и NV^-. Напротив, полоса поглощения 550 нм пока не поддается воспроизведению при выращивании искусственных алмазов [13].

Алмазы розовой окраски из-за полосы поглощения с максимумом 550 нм, в свою очередь, делятся на два типа, различающихся по морфологическим особенностям, спектроскопическим характеристикам и привязке к определенным месторождениям [3, 9]. Основное их различие – концентрация азота в N_{tot} и степень его агрегации N_B, т.е. соотношение азота в форме *B*-центров N_B (четыре атома азота и вакансия углерода) к общей концентрации азота – в форме *B* и *A*-центров N_A (два соседних атома азота в углеродных позициях кристаллической структуры). Первый тип известен по алмазам трубки Аргайл (Австралия) [5, 11, 14], также подобные алмазы поступают из россыпных месторождений Венесуэлы [10]. Суммарное содержание азота в них обычно низкое, до 250 ppm, а степень его агрегации высокая, соотношение концентраций N_B/N_A больше единицы (IaA < B), причем часто кратно. Окраска распределена по кристаллам неравномерно, в основном она сконцентрирована в слоях – ламелях, часто волнистых, а также в пятнах [13, 15]; о механизме возникновения розового цвета единого мнения исследователей нет [4, 10, 16].

Второй тип розового алмаза (IaA >> B), окраска которого также обусловлена полосой поглощения 550 нм, встречается в месторождениях России [3, 7, 17] (трубки Интернациональная, Архангельская, им. Карпинского-1), Южной Африки [12] и Канады [8]. Суммарное содержание азота в кристаллах этого типа от 300 до 1200 ppm и более, а соотношение N_B/N_A меньше единицы [8, 14]. Причины окраски этих кристаллов исследованы значительно более детально, чем для алмазов трубки Аргайл, и подробно описаны в работах [6, 7]. Розовая, часто с фиолетовым оттенком, окраска сосредоточена в тонких слоях по {111}, находящихся в двойниковой ориентации по отношению к основному объему кристалла. Интенсивность окраски коррелирует с концентрацией содержащегося в этих микродвойниковых слоях парамагнитного центра *M*2, имеющего деформационную природу. Вероятно, центр *M*2 проявляется в видимом диапазоне как центр окраски и является причиной возникновения полосы поглощения 550 нм [3, 16]. Центр образован двумя неэквивалентными атомами азота, разделенными тремя атомами углерода, при этом атомы азота расположены вдоль направления $\langle 001 \rangle$, образуя противоположные вершины многогранника, близкого по конфигурации к октаэдру с пониженной симметрией [6, 16].

Розовые, розово-фиолетовые кристаллы обнаружены в кимберлитовых трубках Архангельская, Интернациональная [3], принадлежащих по петрохимической классификации [17] к породам низкотитанистого типа (TiO_2 < 1 %), и в лампроитовой трубке Аргайл. По ряду петрологических и геохимических характеристик [18, 19] низкотитанистые кимберлиты имеют сходство с лампроитами. Предполагается близкий тренд формирования – оливиновые лампроиты трубки Аргайл – Al-кимберлиты Золотицкого поля – Al-кимберлиты трубки Интернациональная [8, 19, 20]. Во многих работах проводится корреляция между дефектно-примесным составом алмазов [14, 21-23], габитусом [17, 24], внешним обликом кристаллов алмаза и условиями формирования и нахождения их в мантийных породах [25-27].

В данной работе были изучены морфологические и спектроскопические характеристики розово-фиолетовых алмазов трубки Архангельская месторождения им. М.В.Ломоносова. Целью исследования являлось установление особенностей внешнего и внутреннего строения алмазов, образовавшихся в пострстовой период в результате механических и температурных воздействий, а также оценка состава структурных дефектов и их возможного влияния на розовую окраску кристаллов.

Материалы и методы исследований. Исследованы семь кристаллов алмаза розового цвета различных оттенков и насыщенности из партий промышленной добычи трубки Архангельская 2010-2020 гг. (рис.1, *а*). Проведено минералогическое описание, выполнены исследования методами инфракрасной (ИК) и фотолюминесцентной (ФЛ) спектроскопии, а также электронного парамагнитого резонанса (ЭПР). Систематика структурных дефектов дана согласно работам [17, 21, 25]. Обр. 1784-8-1 после проведения спектроскопических исследований был пришлифован, что дало возможность получения спектра поглощения в видимой области.

Морфология кристаллов изучалась под бинокуляром «Motic» SMZ-143 с УФ осветителем-боксом (365 нм). Регистрация ИК-спектров проводилась на Фурье-спектрометре «Vertex-70»

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.263. С. 715-723
© Г.Ю.Криулина, С.В.Вяткин, Е.А.Васильев, 2023

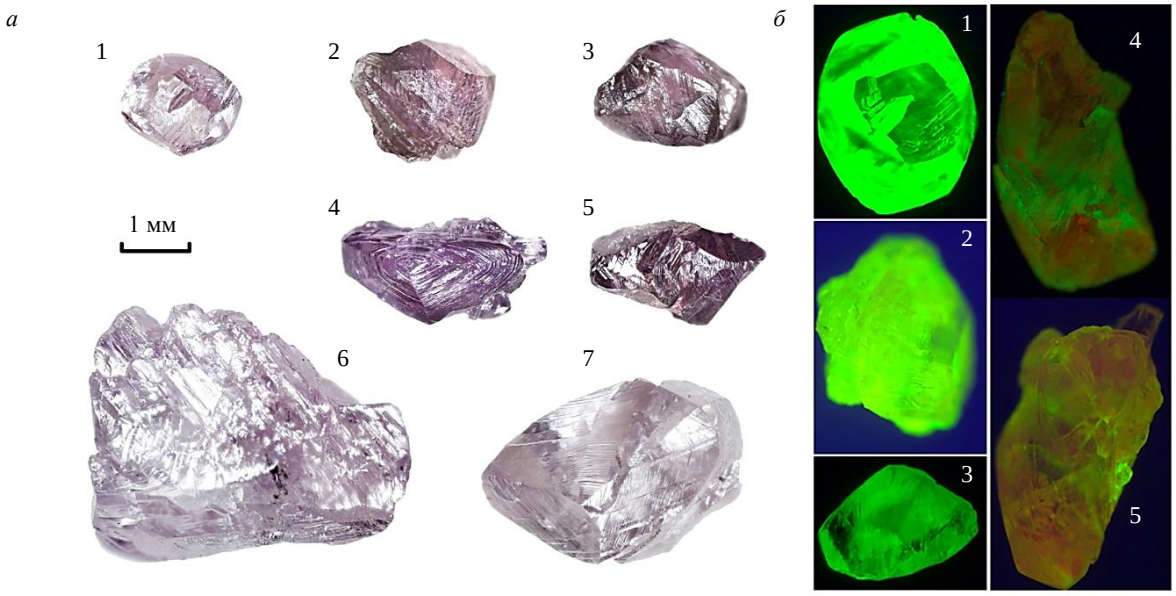


Рис.1. Исследованные кристаллы алмаза трубки Архангельская:
фото и изображения фотолюминесценции кристаллов при возбуждении лазером 405 нм
1 – обр. 1784-8-1; 2 – обр. 1784-41-2; 3 – обр. 1784-41-6; 4 – обр. 1784-41-11; 5 – обр. 1784-41-14; 6 – обр. А0058-1; 7 – обр. 1797-3

(фирма «Bruker») с микроскопом «Hyperion-1000». Общая концентрация азота (N_{tot}) и доля азота – в форме дефектов *B* (N_B, %) вычислялись по известным коэффициентам пропорциональности. Нижний предел выявления азота в форме *B* составляет 5-7 %, индикатором присутствия *B*-дефектов также является полоса *B*′ с максимумом в области 1360 $см^{-1}$. Планарные дефекты *B*′ (platelets) сложены межузельными атомами углерода, концентрация которых пропорциональна амплитуде полосы $a_{B'}$, а положение максимума полосы зависит от размера [14]. Наличие и относительное содержание водородсодержащих центров определялось в соответствии с [28].

Спектр поглощения в видимой области был получен с помощью микроскопа-спектрофотометра ЛОМО МСФУ-К. Спектры ФЛ регистрировались на спектрометре InVia (Renishaw) с возбуждением лазерами 405, 488 и 785 нм с объективом (×5) при температуре 77 К [29].

Спектры ЭПР регистрировались на спектрометре «CMS-8400» в X-диапазоне (~9,4 гГц) при амплитуде модуляции 0,1 мТл, частоте модуляции 100 кГц и мощности СВЧ излучения 0,2 и 5 мВт. Образцы юстировались в L4 || H по угловой зависимости центра *P*1, съемки проводились со значительным накоплением (до 75 сканирований).

Результаты исследования. Исследованные образцы представлены додекаэдроидами и кристаллами комбинационной формы с проявлениями граней октаэдра. Розовые кристаллы октаэдрического габитуса в трубке Архангельская редки, их находки за все время отработки трубки единичны. Морфология поверхности кристаллов специфична, ее главная черта – сильное влияние процессов пластической деформации (рис.1, *а*). Все кристаллы сформированы при тангенциальном механизме роста и имеют тонкослоистое строение, выраженное в морфологии поверхности резкой концентрической штриховкой вокруг осей L_3, также наблюдаются плоскости пластической деформации в двух-трех кристаллографических направлениях (рис.2). Наложенные резкие сдвиги плоскостей пластической деформации пронизывают весь объем кристалла и фиксируются на поверхности с противоположных сторон в виде параллельных полос и ступеней, вместе с основной штриховкой образуют крупный блоковый рельеф. Образовавшиеся ступени часто углубляются в объем камня. Поверхность блоков матовая (покрыта мелкой шагренью) (рис.3). По этим признакам и степени их выраженности кристаллы розовой окраски отличаются не только от бесцветных и окрашенных в желтые тона, но и от кристаллов коричневого цвета, также подвергнутых пластической деформации. Почти все кристаллы имеют крупные протомагматические и незначительные техногенные сколы. При просмотре в поляризованном свете отчетливо видны участки с внутренними напряжениями,

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

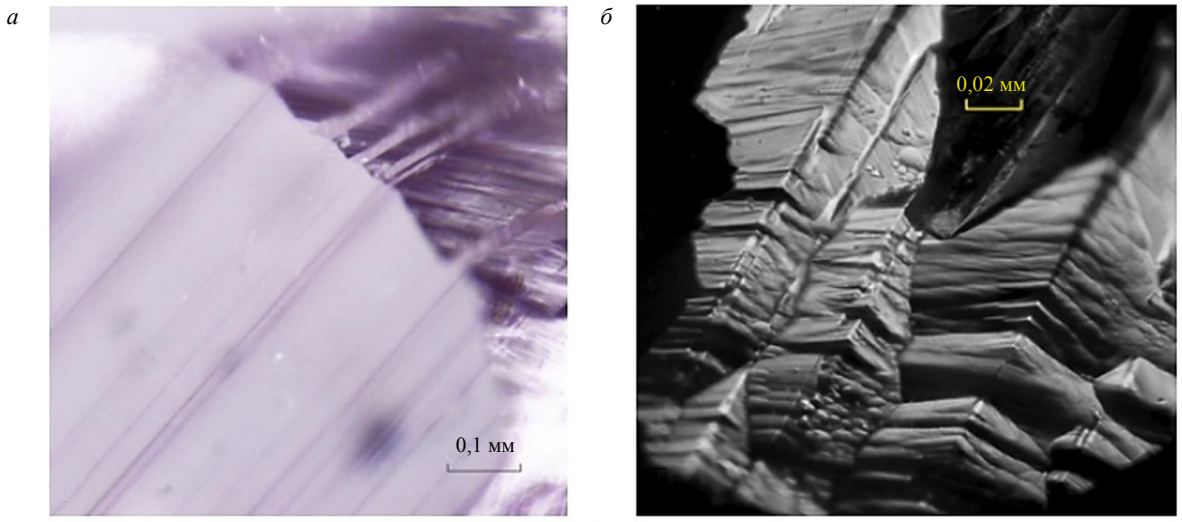


Рис.2. Плоскости пластической деформации в розово-фиолетовом алмазе 1784-8-1:
а – граница пришлифованной области и поверхности кристалла (макрофотография);
б – выход полосы пластической деформации на поверхность кристалла (микрофотография)

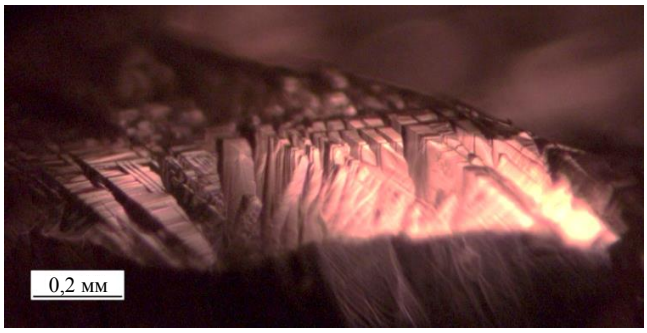


Рис.3. Матовая поверхность
(микрофотография обр. А0058-1)

характеризующиеся аномальным двупреломлением. Проявляются признаки линейного дихроизма окраски при просмотре в различной ориентировке относительно направлений с наиболее выраженными плоскостями пластической деформации.

Визуальная фотолюминесценция (под УФ-лампой 365 нм) умеренной интенсивности проявлена в желтоватых либо желтовато-голубоватых тонах (см. рис.1, *б*). На спектрах ФЛ при возбуждении лазером 405 нм диагностируются малоинтенсивные системы *N*3, 491 нм, *H*3.

При возбуждении лазером 488 нм в спектрах всех образцов регистрируется интенсивная система *H*3 с бесфононной линией 503 нм, пик 612 нм и широкая бесструктурная полоса с максимумом около 720 нм. Относительные интенсивности этих систем меняются в широких пределах, как между кристаллами, так и в объеме некоторых образцов. В спектрах большинства кристаллов регистрируются пики 700, 787, 926 нм, в некоторых образцах – 523, 694 нм. Если в спектре с возбуждением лазером 488 нм регистрируется линия 787 нм, то фононное крыло этой системы определяет вид спектра при возбуждении 785 нм, и отмечается высокая интенсивность линии 926 нм. В образцах 1797-3 и 1784-41-14 выявляется система с максимумами 868, 895, 923, 952, 983, 1018 нм (энергетический сдвиг 0,042 эВ). В других образцах эта система не выявляется, возможно, на фоне фононного крыла систем 787 и 926 нм. Этот комплекс особенностей ФЛ типичен для кристаллов с пластической деформацией [29]. При возбуждении 785 нм в спектрах всех кристаллов выявляется система с максимумом 986 нм (*H*2). Неравномерность в объемном распределении люминесценции некоторых кристаллов показана на рис.1, *б*. Кристаллы 1784-8-1, 1784-41-2, 1784-41-6 имеют равномерную зеленую ФЛ системы *H*3, а в образцах 1784-41-11 и 1784-41-14 есть области с доминированием как красной люминесценции (полоса 720 нм), так и более яркой зеленой. Результаты исследований методами ИК, ЭПР и ФЛ спектроскопии приведены в таблице.

В спектрах ИК поглощения большинства образцов выявляется только азотный А-дефект и линия 3107 см$^{-1}$ с сателлитами, соответствующая водородсодержащему центру *VN*3*H* [28] (рис.4, *а*). В четырех образцах выявляется полоса с максимумом около 4160 см$^{-1}$, в таблице приведена ее амплитуда. Эта полоса «amber»-центра, он типичен в спектрах коричневых кристаллов с признаками пластической деформации. В спектрах ИК поглощения четырех кристаллов выявляются дополнительные пики 3311, 3189, 3154, 3144, 3050 см$^{-1}$, амплитуда пика 3154 (a_{3154})

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.263. С. 715-723
© Г.Ю.Криулина, С.В.Вяткин, Е.А.Васильев, 2023

приведена в таблице. Этот набор характерен для алмаза без *B*-дефектов трубок Архангельская и Карпинского-I [18]. Все алмазы с розовым и фиолетово-розовым оттенком среднеазотные и высокоазотные с очень малой степенью агрегации азота в *B*-дефект (рис.4, *а*, таблица). Полоса *B′* в спектрах двух кристаллов не выявлена, в спектрах трех имеет амплитуду менее 1 см$^{-1}$, что указывает на очень низкую концентрацию *B*-дефектов, они не выявляются по спектрам.

Результаты исследований кристаллов методами ИК, ЭПР и ФЛ спектроскопии

Исследование	Образцы						
	1784-8-1	1784-41-2	1784-41-6	1784-41-11	1784-41-14	A0058-1	1797-3
Цвет алмаза	Pink Purple	Pink Purple	Pink Purple	Purple	Dark Purple	Pink	Light purple pink
Масса, мг	8	5,5	5,5	8	7	70	45
N_{tot}, ppm	1146	850	990	1330	840	570	540
N_A, ppm	1015	800	990	1330	840	492	420
N_B, ppm	130	–	–	–	–	108	120
N_B, %	11	–	–	–	–	19	22
$a_{B'}/v_{B'}$, см$^{-1}$	0.3/1380	–	–	0.8/1382	0,5/1377	2,5/1365	4,6/1365
a_{3107}, см$^{-1}$	7,0	10.8	13.5	6.1	6.5	0.15	0.12
a_{4160}, см$^{-1}$	0.12	0.1	0.2	–	0.41	–	–
a_{3154}, см$^{-1}$	0.16	0.44	0.6	0.28	–	–	–
ЭПР-центры*	***P1***, *W7*, *N2*, *M2*	***W7***, *P1*, *N2*, *M2*	***W7***, *P1*, *N2*, *M2*	***W7***, *P1*, *N2*, *M2*	***W7***, *N2*, *P1*, *M2*	***P1***, *M2*, *M5*	***P1***, *N2*, *W7*, *M2*
λ_{ex} = 488 нм**	*H3*, 612, 720ш***, 694, 700, 787, 926	*H3*, 612, **720ш**, 694, 700, 787, **926**	*H3*, 612, **720ш**, 694, 700, **787**, 926	*H3*, 612, **720ш**,	***H3***, **612**, **720ш**, 694, 700, 787, 926	*H3*, 720ш	*H3*, 612, 580ш, 720ш
λ_{ex} = 787 нм**	926, 904, 986	926, 904, 986	926, 904, 986	**986**	926, **986**	**820/896/925**	986

* Выделен парамагнитный центр, доминирующий по интенсивности в паре *P*1-*W*7.
** Жирным выделены наиболее, курсивом – наименее интенсивные системы.
*** 720ш – широкая полоса с максимумом 720 нм, 580ш – с максимумом 580 нм.

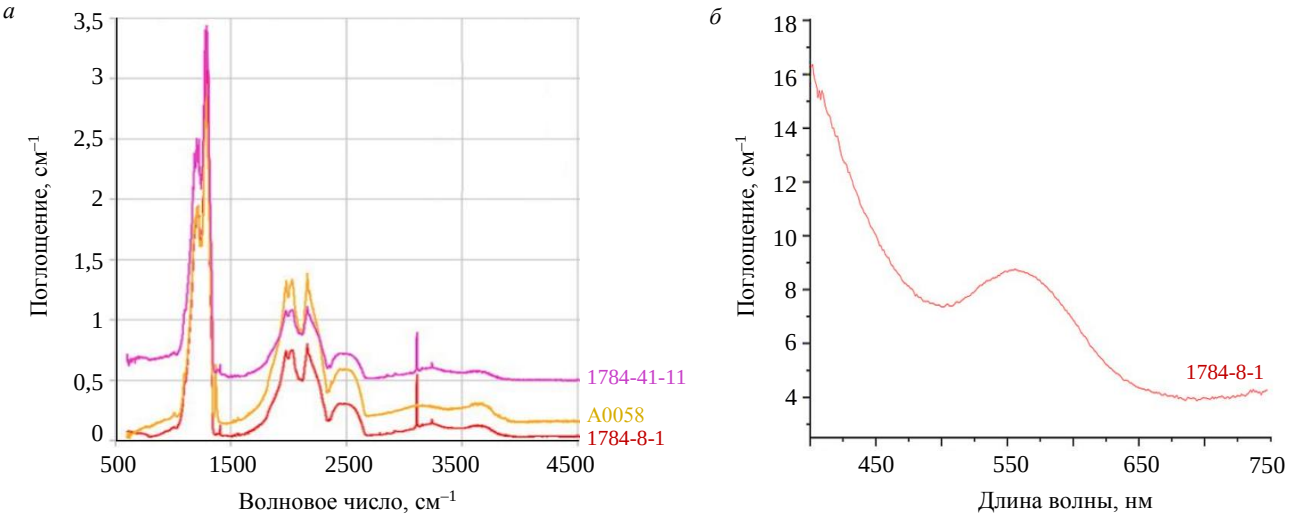


Рис.4. Спектры поглощения розовых алмазов трубки Архангельская в ИК (*а*) и в видимой (*б*) областях

На спектре поглощения в видимой области (рис.4, *б*), полученном после пришлифовки образца 1784-8-1, проявляется широкая полоса в области 550 нм, определяющая его розовую окраску, а также боковое крыло поглощения в коротковолновой части спектра, обусловленное присутствием *C*-дефектов.

Обсуждение результатов. Розовая окраска в исследованных образцах неоднородна, она сконцентрирована в тонких слоях по {111}, совпадая по ориентировке с полосами пластической деформации (см. рис.2). Участки с изгибающимися, «волнистыми» полосами распределения окраски, либо «пятнистого» характера, описанного для кристаллов из трубки Аргайл [13], в исследованных образцах не обнаружены. Слои интенсивной розовой окраски приурочены к выявляемым в рельефе плоскостям пластической деформации, что видно на примере пришлифованного обр. 1784-8-1 (см. рис.2, *а*). Причина такой взаимосвязи вскрывается при дальнейшем увеличении: наблюдаемые

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

визуально полосы пластической деформации маркируют участки кристалла с микродвойниковой структурой (см. рис.2, *б*). Матовая поверхность (мелкая шагрень) некоторых блоков объясняется пересечением структур пластической деформации (см. рис.3).

Таким образом, микроструктура распределения розовой окраски и присутствующего фиолетового оттенка в исследованных кристаллах алмаза отвечает модели окраски, описанной в работах [3, 16], т.е. ее концентрации в тонких пластинках в двойниковой ориентации [6, 10].

Результаты исследования поглощения в ИК-области полностью соответствуют выявленной модели распределения цвета. Все образцы имеют содержание азота порядка 500-1500 ppm, что значительно больше характерного для алмазов трубки Аргайл диапазона (менее 250 ppm). При этом два образца розовой окраски (А0058-1, 1797-3), обладают меньшим содержанием суммарного азота (700 и 540 ppm соответственно), а для более интенсивно окрашенных фиолетовых (2-5 на рис.1, *а*) N_{tot} находится в интервале 950-1500 ppm. Эту корреляцию нарушает слабоокрашенный кристалл 1784-8-1 (1 на рис.1, *а*), для которого N_{tot} = 1010 ppm. Все изученные алмазы относятся к группе IaA (A > B), значение N_B менее 22 %. Высокое суммарное содержание азота ($N_A + N_B$), низкая степень агрегации центров в *B*-форму и повышенная концентрация *C*-дефектов (N^+) в кристаллах ряда октаэдр – додекаэдроид типичны для большинства бесцветных и желтоокрашенных алмазов из месторождения им. М.В.Ломоносова [17, 21]. Для большинства образцов отмечены высокие относительные содержания водородсодержащих центров *VN*3*H*.

Центры *M2*, образовавшиеся вследствие процессов пластической деформации и предположительно являющиеся центрами розовой окраски, обнаружены во всех образцах. Также во всех образцах обнаружены парамагнитные центры *P*1 (рис.5, таблица) [16]. Парамагнитный центр *P*1 – это одиночный замещающий атом азота (*C*-дефект). Вследствие низкой концентрации *C*-дефекты в исследованных алмазах выявляются только методом ЭПР. В спектрах ИК поглощения система *C* (основной пик 1130 $см^{-1}$) не проявляется. В алмазах месторождения им. М.В.Ломоносова *C*-дефекты влияют на восприятие фиолетовой и розовой окраски: поглощение в коротковолновой части спектра уменьшает долю холодных тонов в балансе окраски, смещая результирующий цвет ближе к теплому розовому. На первый взгляд, дополнительное поглощение в коротковолновой части области видимой области (см. рис.4, *б*) должно было бы сделать цвет кристалла более темным, однако наблюдается обратный эффект. Светлее других именно образцы 1784-8-1, А0058-1 и 1797-3, в которых ЭПР центр *P*1 (*C*-дефект) наиболее выражен (см. таблицу). Это можно заметить на рис.1, *а*.

В таблице жирным выделены парамагнитные центры, доминирующие по интенсивности в паре *P*1-*W*7. Центр *W*7 представляет собой кольцо, состоящее из четырех атомов углерода и двух атомов азота, расположенных на противоположных участках. Согласно современным представлениям, центры *W*7 образуются из центров *A* при пластической деформации кристаллов алмаза, с локальным понижением симметрии кристалла, являясь одним из главных маркеров этого

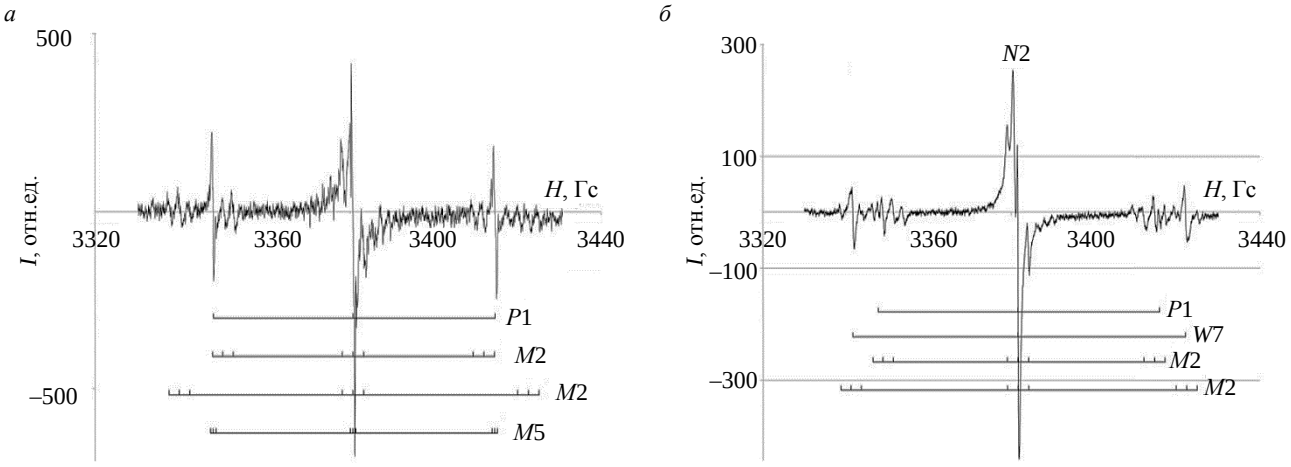


Рис.5. Спектры ЭПР исследованных алмазов: *а* – бледно-розового кристалла А0058-1; *б* – более интенсивно окрашенного кристалла 1784-41-14

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

Записки Горного института. 2023. Т.263. С. 715-723
© Г.Ю.Криулина, С.В.Вяткин, Е.А.Васильев, 2023

процесса [3, 16]. Исходя из того, что центры *M*2 также имеют деформационную природу [16], представляется логичной положительная корреляция между интенсивностью линий центра *W*7 как маркера процессов пластической деформации, и насыщенностью розово-фиолетовой окраски. Однако следует учитывать, что центры *W*7 образуются в значительно более широком диапазоне температур по сравнению с центрами *M*2 и встречаются в алмазах разных типов намного чаще. Отмеченное выше разделение исследованных кристаллов по интенсивности окраски полностью соответствует особенностям состава парамагнитных центров в них. Например, ЭПР спектр обр. А0058-1 (рис.5, *а*) отличается заметно более высокой интенсивностью линий центров *P*1 (одиночные замещения углерода азотом) по сравнению с линиями центра *W*7, его окраска светлее и более розовая. Обратное соотношение, например, для кристалла 1784-41-14 (рис.5, *б*), приводит к более насыщенной фиолетовой окраске.

Также для кристаллов с *C*-дефектами характерна система ФЛ *H*2 [1, 12], которая обнаружена во всех образцах. Дефект *H*2 является ионизованным центром *H*3 [12]. По-видимому, дефект *H*2 возникает при взаимодействии двух *NV* центров, которые характеризуются высокой подвижностью [6]. Ранее наличие *C*-дефектов в алмазе с розовой окраской было выявлено при изучении фотохромизма кристаллов с высокой долей *B*-дефектов [1, 5]. Одним из источников *C*-дефектов является разрушение *B*-дефектов в ходе пластической деформации, с образованием дефектов *C*, *H*3, *N*3 [12, 18, 30]. Таким образом, и в розовых кристаллах без *B*-дефектов, и в кристаллах с высокой долей азота в форме *B* (из месторождения Аргайл) есть *C*-дефекты, вносящие вклад в восприятие розовой окраски.

Соотношение и концентрации азотных и водородных центров в алмазах месторождения им. М.В.Ломоносова близки к фиолетовым алмазам из кимберлитовой трубки Интернациональная. Полоса поглощения 550 нм является причиной розовой окраски не только для исследованных алмазов кимберлитовой трубки Архангельская, но и для отличающихся от них по множеству характеристик алмазов лампроитовой трубки Аргайл [2, 5, 8]. Следует также отметить сходство в неравномерном распределении окраски, вызванной полосой 550 нм, для кристаллов алмаза как кимберлитовых, так и лампроитовых месторождений. Сопоставление этого фактического материала позволяет высказать предположение о конвергентном характере образования розовых алмазов, в значительно большей степени зависящем от характера пластической деформации и *PT*-условий ее протекания, чем от происхождения алмаза и свойств содержащих его пород. В то же время однозначный признак петрохимического сходства упомянутых алмазоносных трубок – низкое содержание TiO_2 – становится понятным в свете работ [19, 20], где низкое содержание титана рассматривается как показатель высокого давления при формировании кимберлитов. Для большинства кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции характерно умеренное содержание оксида титана (TiO_2 1-2,5 мас.%) и большие глубины зарождения как алмазов [20, 24, 31], так и протокимберлитовых магм [25, 32, 33], следовательно, более высокие температуры посткристаллизационного отжига [24, 34, 35], в том числе и при продвижении содержащих алмазы пород к поверхности. Высокая температура и более низкое давление способствовали протеканию процесса пластической деформации по механизму скольжения дислокаций с формированием коричневой окраски алмазов, характерной для 25-50 % кристаллов из кимберлитовых трубок Удачная, Заполярная, Комсомольская [24, 25, 31].

Таким образом, наблюдаемая эмпирическая закономерность распределения алмазов по наличию розовой окраски с содержанием TiO_2 в алмазоносных породах является следствием влияния главного фактора – условий давления и температуры. Примером влияния *PT*-условий является месторождение им. М.В.Ломоносова (трубки Архангельская и им. Карпинского-1), относящееся к низкотитанистому типу кимберлитов и имеющее розово-фиолетовые алмазы, и месторождение им. Гриба, принадлежащее к умеренно-титанистому типу кимберлитов [19] и не содержащее алмазов с розовой и фиолетовой окраской, несмотря на пространственную, геологическую и временную близость этих месторождений [36-38], а также общее сходство минералогии и дефектно-примесного состава алмазов [17, 39].

Заключение. Исследованные розовые и розово-фиолетовые алмазы месторождения им. М.В.Ломоносова являются средне- и высокоазотными, с низкой степенью агрегации азотных

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

центров и принадлежат к группе IaA > B. Во всех кристаллах методом ЭПР выявляются центры *P*1 (*C*) и *M*2, по спектрам люминесценции – азотно-вакансионные системы *H*3 и *H*2. Розовая окраска неоднородна, сконцентрирована в тонких слоях по {111}, совпадающих с плоскостями пластической деформации кристаллов. Центры *M*2, предположительно являющиеся центрами розовой окраски, обнаружены во всех образцах. Зафиксирована положительная корреляция между интенсивностью линий парамагнитного центра *W*7 как маркера процессов пластической деформации и насыщенностью розово-фиолетовой окраски. Оттенок окраски связан с балансом интенсивности в паре парамагнитных центров *P*1-*W*7. Наличие центров *P*1 (*C*-дефектов) вызывает поглощение в коротковолновой части видимой области, придавая окраске теплый оттенок. Фиолетовые, холодного оттенка кристаллы характеризуются доминированием парамагнитного центра *W*7.

Образование алмазов розовой и розово-фиолетовой окраски носит конвергентный характер: предположительные центры окраски *M*2 сконцентрированы в микродвойниковых ламелях, для возникновения которых требуются определенные *PT*-условия протекания процесса пластической деформации (относительно низкие температуры и направленное давление). Появление в том или ином месторождении алмазов розовой окраски в большей степени зависит от наличия этих условий, чем от происхождения алмаза и свойств содержащих его пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Byrne K.S., Chapman J.G., Luiten A.N.* Photochromic charge transfer processes in natural pink and brown diamond // Journal of Physics: Condensed Matter. 2013. Vol. 26. № 3. № 03551. DOI: 10.1088/0953-8984/26/3/035501

2. *Eaton-Magaña S., McElhenny G., Breeding C.M., Ardon T.* Comparison of gemological and spectroscopic features in type IIa and Ia natural pink diamonds // Diamond and Related Materials. 2020. Vol. 105. № 107784. DOI: 10.1016/j.diamond.2020.107784

3. *Titkov S.V., Shigley J.E., Breeding C.M. et al.* Natural-Color Purple Diamonds from Siberia // Gems and Gemology. 2008. Vol. 44. № 1. P. 56-64. DOI: 10.5741/GEMS.44.1.56

4. *Gaillou E., Post J.E., Bassim N.D. et al.* Spectroscopic and microscopic characterizations of color lamellae in natural pink diamonds // Diamond and Related Materials. 2010. Vol. 19. Iss. 10. P. 1207-1220. DOI: 10.1016/j.diamond.2010.06.015

5. *Byrne K.S., Anstie J.D., Chapman J., Luiten A.N.* Infrared microspectroscopy of natural Argyle pink diamond // Diamond and Related Materials. 2012. Vol. 23. P. 125-129. DOI: 10.1016/j.diamond.2012.01.032

6. *Titkov S.V., Krivovichev S.V., Organova N.I.* Plastic deformation of natural diamonds by twinning: evidence from X-ray diffraction studies // Mineralogical Magazine. 2012. Vol. 76. Iss. 1. P. 143-149. DOI: 10.1180/minmag.2012.076.1.143

7. *Yuryeva O.P., Rakhmanova M.I., Zedgenizov D.A., Kalinina V.V.* Spectroscopic evidence of the origin of brown and pink diamonds family from Internatsionalnaya kimberlite pipe (Siberian craton) // Physics and Chemistry of Minerals. 2020. Vol. 47. Iss. 20. DOI: 10.1007/s00269-020-01088-5

8. *King J., Shigley J.E., Jannucci C.* Exceptional Pink to Red Diamonds: A Celebration of the 30th Argyle Diamond Tender // Gems and Gemology. 2014. Vol. 50. № 4. P. 268-279. DOI: 10.5741/GEMS.50.4.268

9. *Gaillou E., Post J.E., Rose T., Butler J.E.* Cathodoluminescence of Natural, Plastically Deformed Pink Diamonds // Microscopy and Microanalysis. 2012. Vol. 18. Iss. 6. P. 1292-1302. DOI: 10.1017/S1431927612013542

10. *Howell D., Fisher D., Piazolo S. et al.* Pink color in Type I diamonds: Is deformation twinning the cause? // American Mineralogist. 2015. Vol. 100. № 7. P. 1518-1527. DOI: 10.2138/am-2015-5044

11. *Shigley J.E., Chapman J., Ellison R.K.* Discovery and Mining of the Argyle Diamond Deposit, Australia // Gems and Gemology. 2001. Vol. 37. № 1. P. 26-41. DOI: 10.5741/GEMS.37.1.26

12. *Smit K.V., D'Haenens-Johansson U.F.S., Howell D. et al.* Deformation-related spectroscopic features in natural Type Ib-IaA diamonds from Zimmi (West African craton) // Mineralogy and Petrology. 2018. Vol. 112. Iss. 1. P. 243-257. DOI: 10.1007/s00710-018-0587-6

13. *Eaton-Magaña S., Ardon T., Smit K.V. et al.* Natural-Color Pink, Purple, Red, and Brown Diamonds: Band of Many Colors // Gems and Gemology. Vol. 54. № 4. P. 352-377. DOI: 10.5741/GEMS.54.2.352

14. *Taylor W.R., Jaques A.L., Ridd M.* Nitrogen-defect aggregation characteristics of some Australasian diamonds: Time-temperature constraints on the source regions of pipe and alluvial diamonds // American Mineralogist. 1990. Vol. 75. P. 1290-1310.

15. *Levashova E.V., Skublov S.G., Popov V.A.* Distribution of Trace Elements Controlled by Sector and Growth Zonings in Zircon from Feldspathic Pegmatites (Ilmen Mountains, the Southern Urals // Geosciences. 2021. Vol. 7. P. 1-21. DOI: 10.3390/geosciences11010007

16. *Гаврильчик А.К., Скублов С.Г., Котова Е.Л.* Редкоэлементный состав берилла из месторождения Шерловая Гора, Юго-Восточное Забайкалье // Записки Российского минералогического общества. 2021. Т. 150. № 2. С. 69-82. DOI: 10.31857/S0869605521020052

17. *Garanin V., Caranin K., Kriulina G., Samosorov G.* Diamonds from the Arkhangelsk Province, NW Russia. Switzerland: Springer, 2021. 248 p. DOI: 10.1007/978-3-030-35717-7

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0

18. *Melnik A.E., Korolev N.M., Skublov S.G. et al.* Zircon in mantle eclogite xenoliths: a review // Geological Magazine. 2021. Vol. 158. Iss. 8. P. 1371-1382. DOI: 10.1017/S0016756820001387

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

20. *Войтеховский Ю.Л.* Еще раз о принципе диссимметрии П.Кюри // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 3. С. 118-129. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1483.09

21. *Pashkevich M.A., Alekseenko A.V.* Reutilization prospects of diamond clay tailings at the Lomonosov mine, Northwestern Russia // Minerals. 2020. Vol. 10. P. 517-517. DOI: 10.3390/min10060517

22. *Harris J.W., Smit K.V., Fedortchouk Y., Moore M.* Morphology of Monocrystalline Diamond and its Inclusions // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. Iss. 1. P. 119-166. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.02

23. *Войтеховский Ю.Л.* Додекаэдро–икосаэдрическая система // Записки Российского минералогического общества. 2020. Т. 149. № 6. С. 101-109. DOI: 10.31857/S0869605520060155

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

25. *Костровицкий С.И., Специус З.В., Яковлев Д.А. и др.* Атлас коренных месторождений алмазов Якутской кимберлитовой провинции. Мирный: АЛРОСА, 2015. 480 с.

26. *Fedortchouk Y., Liebske C., McCammon C.* Diamond destruction and growth during mantle metasomatism: An experimental study of diamond resorption features // Earth and Planetary Science Letters. 2019. Vol. 506. P. 493-506. DOI: 10.1016/j.epsl.2018.11.025

27. *Stachel T., Cartigny P., Chacko T., Pearson D.G.* Carbon and Nitrogen in Mantle-Derived Diamonds // Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2022. Vol. 88. Iss. 1. P. 809-875. DOI: 10.2138/rmg.2022.88.15

28. *Goss J.P., Briddon P.R., Hill V. et al.* Identification of the structure of the 3107 cm^{-1} H-related defect in diamond // Journal of Physics: Condensed Matter. 2014. Vol. 26. № 145801. DOI: 10.1088/0953-8984/26/14/145801

29. *Vasilev E.A.* Luminescence of plastically deformed diamond in the range 800-1050 nm // Journal of Applied Spectroscopy. 2019. Vol. 86. № 3. P. 512-515. DOI: 10.1007/s10812-019-00850-0

30. *Надолинный В.А., Юрьева О.П., Елисеев А.П. и др.* Разрушение азотных *B*1-центров при пластической деформации природных алмазов типа 1aB и поведение образующихся при этом дефектов при *PT*-обработке // Доклады Академии наук. 2004. Т. 399. № 4. С. 532-536.

31. *Вяткин С.В., Криулина Г.Ю., Гаранин В.К. и др.* Морфология и дефектно-примесный состав алмазов из трубки Заполярная // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 2021. № 1. С. 99-109. DOI: 10.33623/0579-9406-2021-1-99-109

32. *Серебряков Е.В., Гладков А.С.* Геолого-структурная характеристика массива глубоких горизонтов месторождения Трубка «Удачная» // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 512-525. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.4

33. *Дурягина А.М., Таловина И.В., Либервирт Х., Илалова Р.К.* Морфометрические параметры сульфидных руд как основа селективной рудоподготовки сырья // Записки Горного института. 2022. Т. 256. С. 527-538. DOI: 10.31897/PMI.2022.76

34. *Garanin V.K., Kudryavtseva G.P.* Morphology, physical properties and paragenesis of inclusion-bearing diamonds from Yakutian kimberlites // Lithos. 1990. Vol. 25. № 1-3. P. 211-217. DOI: 10.1016/0024-4937(90)90016-T

35. *Gulbin Yu.L., Mikhalsky E.V.* Modeling of Mineral Parageneses and Thermobarometry of Metavolcanic Rocks of the Ruker Group in the Southern Prince Charles Mountains, East Antarctica // Geology of Ore Deposits. 2020. Vol. 62. № 7. P. 584-598. DOI: 10.1134/S1075701520070053

36. *Козлов А.В., Степанов С.Ю., Паламарчук Р.С., Минибаев Р.С.* Онтогенические ориентиры для выбора модели формирования платинового оруденения в зональных клинопироксенит-дунитовых массивах Урала // Записки Российского минералогического общества. 2019. Т. 148. № 2. С. 115-130. DOI: 10.30695/zrmo/2019.1482.08

37. *Устинов В.Н., Микоев И.И., Пивень Г.Ф.* Поисковые модели коренных месторождений алмазов севера Восточно-Европейской платформы // Записки Горного института. 2022. Т. 255. С. 299-318. DOI: 10.31897/PMI.2022.49

38. *Устинов В.Н., Неручев С.С., Загайный А.К. и др.* Алмазоносность севера Восточно-Европейской платформы. СПб: Наука, 2021. 410 с.

39. *Голубев Ю.К., Волоковых Т.С., Прусакова Н.А., Голубева Ю.Ю.* Перспективы развития минерально-сырьевой базы алмазов Архангельской области // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2020. № 1. С. 23-28.

***Авторы*: Г.Ю.Криулина,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник*; *старший научный сотрудник, https://orcid.org/0009-0009-8495-9289, G9671844057@gmail.com* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*; *АК «АЛРОСА», Мирный, Республика Саха* (*Якутия*), *Россия*), **С.В.Вяткин,** *канд. геол.-минерал. наук, научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0002-5054-575X* (*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия*), **Е.А.Васильев,** *д-р геол.-минерал. наук, ведущий научный сотрудник, https://orcid.org/0000-0003-2216-0956* (*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия*).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья опубликована в открытом доступе по лицензии CC BY 4.0