

Практика экспертизы бриллиантов в современных условиях: классификация и основные типы бриллиантов

Р.А. Хмельницкий^{1,2}, М.М. Плешанова³, П.А. Хабибова³, П.В. Грязнов²,  Е.И. Герасимова³

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, Москва 119991, Россия

² ООО «Алмазный НТК», Москва 108840, Россия

³ Федеральное бюджетное учреждение Российский федеральный центр судебной экспертизы имени профессора А.Р. Шляхова при Министерстве юстиции Российской Федерации, Москва 101000, Россия

Аннотация. Статья посвящена актуальным вопросам инструментальной диагностики происхождения бриллиантов в условиях современного ювелирного рынка, характеризующегося массовым появлением синтетических и облагороженных камней. Целью работы является определение ключевых диагностических оптических признаков, необходимых для надежной идентификации природы бриллиантов.

Представлены результаты обобщения экспертной практики отдела минералогической экспертизы ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России по исследованию 55 образцов с использованием комплекса неразрушающих методов (визуального анализа, оптической микроскопии, ИК-Фурье-спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии).

Рассмотрены и подробно описаны характеристики, приведены спектральные маркеры для четырех основных типов ограненных алмазов – природных бриллиантов (IaAB), облагороженных природных бриллиантов после высокотемпературного HPHT-отжига и синтетических, выращенных методами HPHT и CVD.

Ключевые слова: бриллианты, природа происхождения, природные алмазы, синтетические алмазы, HPHT, CVD, ИК-спектроскопия, фотолюминесценция, дефектно-примесный состав, судебная минералогическая экспертиза

Для цитирования: Хмельницкий Р.А., Плешанова М.М., Хабибова П.А., Грязнов П.В., Герасимова Е.И. Практика экспертизы бриллиантов в современных условиях: классификация и основные типы бриллиантов // Теория и практика судебной экспертизы. 2026. Т. 21. № 2. С. 122–135. <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2026-2-122-135>

Practice of Diamond Examination in Modern Conditions: Classification and Main Types of Diamonds

Roman A. Khmel'nitskii^{1,2}, Maria M. Pleshanova³, Polina A. Khabibova³, Pavel V. Gryaznov²,  Ekaterina I. Gerasimova³

¹ P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

² Diamond STC (LLC), 108840 Moscow, Russia

³ The Russian Federal Centre of Forensic Science named after professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation, Moscow 101000, Russia

Abstract. The article addresses topical issues of instrumental diagnostics of diamonds' origin in the context of the modern jewelry market characterized by the widespread appearance of synthetic and treated stones. The objective of the study is to define the key diagnostic optical features necessary for the reliable identification of diamonds' nature of origin.

The paper summarizes findings of The Russian Federal Centre of Forensic Science expert practice findings of examination of 55 samples using a complex of non-destructive methods (including visual analysis, optical microscopy, FTIR spectroscopy, and photoluminescence spectroscopy).

The study considers and provides the detailed characteristics and spectral markers for four primary types of cut diamonds: natural diamonds (Type IaAB), natural diamonds treated with high-temperature HPHT-annealing, and synthetic HPHT and CVD diamonds.

Keywords: diamonds, nature of origin, natural diamonds, synthetic diamonds, HPHT, CVD, IR spectroscopy, photoluminescence, defective impurity composition, forensic mineralogy examination

For citation: Khmel'nitskii R.A., Pleshanova M.M., Khabibova P.A., Gryaznov P.V., Gerasimova E.I. Practice of Diamond Examination in Modern Conditions: Classification and Main Types of Diamonds. *Theory and Practice of Forensic Science*. 2026. Vol. 21. No. 2. P. 122–135. (In Russ.). <https://doi.org/10.30764/1819-2785-2026-2-122-135>

Введение

На протяжении многих лет наблюдается устойчивый рост цен на природные ювелирные алмазы и изделия из них (в частности, бриллианты)¹, в том числе из-за постоянного удорожания добычи этого минерала. В 1950-х годах были разработаны две технологии искусственного выращивания алмазов, включая крупные монокристаллы: HPHT (High Pressure High Temperature – отжиг при высоких давлениях и температурах) и CVD (Chemical Vapour Deposition – химическое газозоное осаждение). С течением времени данные технологии совершенствовались, постепенно росли размеры выращенных кристаллов, улучшалось их примесное и структурное совершенство [1], тогда как цены на синтетические бриллианты снижались и к настоящему моменту значительно упали в связи с крупными поставками синтетических бриллиантов.

Сложившуюся ситуацию осложняет получившая популярность практика облагораживания, то есть улучшения цвета и/или чистоты камня. Усовершенствовались методы облагораживания как низкосортных природных алмазов, так и синтетических алмазов, особенно выращенных методом HPHT [2]. Все это привело к легальному и нелегальному появлению на ювелирном рынке синтетических и облагороженных природных алмазов. Алмазы природного происхождения и алмазы, выращенные с использованием HPHT, CVD, по внешнему виду (габитусу) сильно отличаются, но в ограненном бриллианте их трудно различить традиционными геммологическими методами. Это поставило задачу их инструментальной идентификации [3].

Поскольку идеальных кристаллов (и тем более кристаллов алмаза) не бывает, то ос-

новой для определения происхождения алмаза является исследование его примесно-дефектного состава [4]. Главными отличительными свойствами алмазов разного происхождения выступают состав и концентрация основных азотных и азотно-вакансионных дефектов. Для синих алмазов ключевым фактором является наличие примеси бора. Это различие лежит в основе общепринятой классификации алмазов по типам.

Основное отличие синтетических и облагороженных природных алмазов от чистых природных состоит в продолжительности времени пребывания кристаллов в условиях повышенной температуры. Природные кристаллы растут и подвергаются воздействию сравнительно невысоких температур (<1400 °C) миллионы лет, в то время как процессы синтеза алмаза и/или его термобарической обработки длятся часами (максимум – сотни часов). При такой длительности недостижима характерная для природных алмазов полная агрегация примеси азота. Эта особенность должна выступать основным, дискриминирующим геммологическим признаком. Также у алмазов разного происхождения различаются картины распределения примесей и дефектов по объему.

Основные примеси и дефекты в алмазе ярко проявляются в его оптических свойствах. В алмазах разного происхождения обнаружено огромное количество оптических центров (более 500), в основном в оптическом, ИК поглощении и люминесценции [5]. Поэтому наиболее информативными методами геммологического исследования алмазов являются методы оптической спектроскопии (такие, как спектроскопия оптического поглощения в видимом и ИК диапазонах) и, особенно, наиболее чувствительный метод – фотолюминесценция. Изучение оптических характеристик алмаза и, прежде всего, пространственной и спектральной картин фотолюминесценции позволяет устанавливать природу происхож-

¹ Diamond Price Trends & Appreciation Over Time // Leibish. <https://www.leibish.com/blogs/investment/color-diamond-investment-value-over-the-years>;
Diamond Price with Technicals Chart // Paul Zimnisky, Diamond Analytics. 24.04.2025. <https://www.paulzimnisky.com/Diamond-Price-with-Technicals-Chart>

дения алмазов и других драгоценных камней, несмотря на попытки производителей синтетических алмазов минимизировать проявление характерных признаков [3]. При этом изучение оптических свойств необходимо дополнять исследованием таких традиционных признаков, как наличие включений в камне (эклогитовых и перидотитовых включений в природных кристаллах и металлических, в том числе обладающих магнитными свойствами, – в НРНТ-алмазах).

К сожалению, в настоящее время не существует универсального и абсолютно точного способа определения происхождения алмазов (природные, синтетические или облагороженные). Любой алгоритм и тем более автоматический прибор позволяет установить природу кристаллов лишь с большей или меньшей степенью достоверности. Для надежного геммологического анализа алмаза, помимо детального микроскопического визуального изучения кристалла (включая анализ включений), необходим комплексный подход. Это и определение основных оптических характеристик кристалла (цвет, двулучепреломление, картина фотолюминесценции при разных видах УФ- и видимого возбуждения), и спектральное исследование рамановского рассеяния, оптического поглощения, ИК-Фурье-спектроскопия и фотолюминесцентный анализ.

В особых случаях следует применять методику электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) или даже такие малоинвазивные методы, как масс-спектрометрию с индуктивно связанной плазмой и лазерной абляцией (laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry – LA-ICP-MS) [6] и лазерно-искровую эмиссионную спектроскопию (laser-induced breakdown spectroscopy – LIBS) [7]. Для проведения спектрального анализа свечения алмаза требуется применение максимально широкого спектра диагностических признаков. Крайне важно учитывать полный состав и соотношение интенсивностей разных оптических центров. Кроме того, обязательным условием выступает изучение пространственной картины фотолюминесценции кристалла.

Алмазы обладают определенными дефектами, то есть имеют то или иное нарушение регулярной кристаллической решетки. Например, расположение атома углерода в нерегулярной позиции или отсутствие атома в регулярной позиции – это собственные

дефекты; примесные атомы – примесные дефекты. Большинство дефектов в алмазе сложные, содержат собственные и примесные компоненты.

Азот – наиболее распространенная примесь в алмазах, его концентрация может достигать 0,3 % по массе. В течение роста азот входит в кристаллическую решетку алмаза в виде одиночных атомов. В природе благодаря длительному отжигу при температурах 1000–1400 °С в процессе диффузии по кристаллической решетке атомы азота образуют агрегаты азота, так что одиночных атомов азота не остается. Исследования показывают, что атомы азота присутствуют во всех алмазах и в весьма разнообразных конфигурациях.

Оптические и другие физические свойства алмаза сильно зависят от содержания и агрегатного состояния примеси азота. Хотя почти все азотные агрегаты дают поглощение в ИК-диапазоне, алмазы с азотом в агрегированном состоянии обычно бесцветны, то есть почти не дают поглощения в видимом диапазоне.

Азотные алмазы классифицируются как тип I [8]. Алмазы с необнаруживаемой в ИК-спектроскопии концентрацией азота (< 5 ppm²) классифицируются как тип II (малоазотные). Большинство природных алмазов относится к типу I, и лишь малая доля (~ 1–2 %) – к типу II. Алмазы типа I подразделяют в зависимости от агрегации азота в кристаллической решетке:

1) Ib (азот в виде одиночных атомов; крайне редко встречается среди природных и тем более ювелирных алмазов, но характерен для синтетических);

2) Ia (доминирующий среди природных алмазов):

– IaA (агрегаты азота N₂);

– IaB1 (агрегаты азота N₄V, где V – вакансия);

– IaB2 (так называемые platelets – пластинчатые образования с повышенной концентрацией азота).

Малоазотные кристаллы типа II подразделяют на бесцветные (IIa) и синие (IIb) с доминирующей примесью бора. Они являются редчайшими среди природных, но часто синтезируются.

Ранее в геммологической практике приходилось часто сталкиваться с «симулянтами» алмазов: бесцветным цирконом, синтетическим рутилом, титанатом стронция,

² В алмазе 1 ppm = 1,76 × 10¹⁷ см⁻³.

синтетической бесцветной шпинелью, синтетическим бесцветным сапфиром, алмазными дублетами и пастами. Сравнительно недавно появились синтетический муассанит (карбид кремния), иттрий-алюминиевый гранат, гадолиний-галлиевый гранат и кубическая окись циркония (фианит). Существует несколько простых способов их выявления; самым быстрым и эффективным, дающим стопроцентный результат, является анализ рамановского рассеяния. В настоящее время симулянты алмазов встречаются все реже в связи с сильным снижением цен на синтетические алмазы.

Целью настоящей работы является определение основных диагностических оптических признаков, необходимых для надежной идентификации происхождения бриллиантов, на примере анализа представительного набора кристаллов, исследованных в ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России (далее – РФЦСЭ).

Объекты и методы

Объектами являлись 55 бриллиантов, переданных на исследование в РФЦСЭ в 2025 году.

Согласно ГОСТ Р 70856-2023³, в зависимости от значения массы они были разделены на три группы (п. 4.2.1): мелкие, средние, крупные. Мелкие и средние бриллианты (п. 4.2.2) были определены по массе в размерно-весовые подгруппы: «6–5», «5–4», «4–3,4», «0,30–0,39» кар.

Природу происхождения объектов устанавливали неразрушающими методами: визуально, с помощью оптической микроскопии, изучением картин флуоресценции и фосфоресценции при воздействии возбуждающего ультрафиолетового излучения, ИК-Фурье-спектроскопии и фотолюминесцентной спектроскопии. Классификационные признаки бриллиантов – группу цвета, группу чистоты, форму и наименование огранки, группу и качество огранки – определяли после установления происхождения кристалла.

ИК-Фурье-спектроскопия поглощения – метод регистрации межатомных колебаний для измерения полос поглощения основных дефектов с примесями азота, бора и водорода, выполненная на инфра-

красном спектрометре с преобразованием Фурье GemmoFtir с диффузным отражением DRIFTS торговых марок MAGILabs и Interspectrum, позволила определить тип алмаза с чувствительностью по примеси азота не ниже 1–5 ppm.

Другим современным, информативным и чувствительным методом геммологического исследования алмазов является фотолюминесценция [4] – наиболее чувствительная (но не количественная) методика выявления оптических центров, образованных примесями и дефектами. С ее помощью возможно обнаружение даже одиночных оптических центров. Преимущество фотолюминесценции алмазов заключается в том, что большая часть их излучения попадает в видимый диапазон, что позволяет опытному эксперту проводить предварительную оценку характеристик кристалла, основываясь на визуальном анализе его свечения. Тем не менее более надежным методом считается спектроскопическое исследование.

Еще одной отличительной особенностью алмаза является возможность фиксировать узкие бесфонные линии (БФЛ) оптических центров даже при комнатной температуре. Примечательно, что понижение температуры значительно увеличивает выход люминесценции, но также подчеркивает БФЛ и одновременно подавляет фоновые повторения, связанные с оптическим центром. Используемые для идентификации алмазов фотолюминесцентные инструменты можно разделить на два класса: 1) получение картины фотолюминесценции и фосфоресценции всего кристалла (принцип работы прибора ADI-V1); 2) измерение спектра фотолюминесценции в определенном месте кристалла (принцип работы прибора ADI-S2). Оба этих прибора были задействованы при изучении обсуждаемых в представленной работе объектов.

Соотношение интенсивностей полос и линий в спектре люминесценции значительно зависит от длины волны возбуждающего излучения – интенсивность полос и линий тем выше, чем ближе к ней длина волны возбуждающего излучения. Поэтому важно иметь возможность возбуждения на разных длинах волн для выявления всех оптических центров. Имеет значение и спектр возбуждающего света. Возбуждение светом с длиной волны вблизи фундаментального края оптического поглощения алмаза (EGUV), как показывает практика, позволяет выявить неоднородную структуру кристалла.

³ ГОСТ Р 70856–2023. Бриллианты. Классификация. Требования к сортировке и аттестации: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: введен в действие 01.06.2024 / Гохран России. М.: Российский институт стандартизации, 2023. 36 с.

Коротковолновое УФ-возбуждение (SWUV) обычно вызывает эффективную фотолюминесценцию синтетических кристаллов, а длинноволновое УФ-возбуждение (LWUV) – эффективную фотолюминесценцию природных кристаллов. Возбуждение EGUV (225 нм), LWUV (365 нм), SWUV (254 нм) реализовано в тестере ADI-V1, который дает картину свечения всего кристалла.

В спектроскопическом тестере ADI-S2 используется три источника возбуждения: LWUV, лазерное излучение фиолетового диапазона и лазерное излучение зеленого диапазона. Стоит отметить, что лазерное облучение кристалла, помимо фотолюминесценции, вызывает в спектре свечения кристалла проявление рамановского рассеяния. В случае алмаза – это узкая линия свечения, отстоящая от лазерной линии на $1\,332\text{ см}^{-1}$ в длинноволновую сторону (Стоксов сдвиг). Наличие такой линии однозначно указывает на алмаз – гарантированно исключаются все симулянты.

Полуколичественной характеристикой интенсивности фотолюминесценции любого кристалла (в том числе алмаза) является соотношение интенсивностей ее компонент в сравнении с интенсивностью проявления рамановского рассеяния. При этом нужно принять во внимание сильную зависимость его интенсивности от длины волны возбуждающего лазерного излучения.

Результаты и обсуждение

В настоящее время наибольшее распространение получили четыре типа алмазов, ограненных в бриллианты [9].

Основной массив исследованных бриллиантов образован природными алмазами. На рисунке 1 приведены основные диагностические черты типичного представителя этой категории. По характеристикам ИК-поглощения этот кристалл относится к типу IaAB (рис. 1b). То есть он содержит все основные агрегаты азота: типа A (N_2 , головная полоса на 1282 см^{-1} и полосы меньшей интенсивности на 1215 , 1100 и 480 см^{-1}), типа B1 (N_4V , система полос с наиболее интенсивной узкой линией на 1175 см^{-1} , особенностями при 1332 , 1100 , 1010 , плато на $1290\text{--}1210\text{ см}^{-1}$), дефекты типа B2 (platelets – узкая линия на $1360\text{--}1380\text{ см}^{-1}$). Кроме того, в ИК-спектре обнаруживается узкая линия на 3107 см^{-1} , ее дает характерный для природных алмазов агрегат N_3VH (N – атом азота, V – вакансия, H – атом водорода). Все описанные агрегаты азота формиру-

ются в кристалле в результате длительной выдержки (многие миллионы лет) в недрах Земли при температурах $1000\text{--}1400\text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Остальные полосы ИК-поглощения в диапазоне $1500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ определяются собственным поглощением алмазной решетки.

В большинстве случаев природные кристаллы люминесцируют синим светом (рис. 1а, с). Такая люминесценция образована двумя компонентами: широкая бесструктурная А-полоса с максимумом примерно на 430 нм (вызвана дислокационными дефектами) и оптический центр N_3V^0 (БФЛ 415 нм) с его фононными повторениями, простирающимися в длинноволновую сторону вплоть до 600 нм (рис. 1d). Оптический центр N_3V не проявляется в ИК-поглощении. У кристалла на рисунке 1 излучение оптического центра N_3V^0 намного сильнее А-полосы. Излучение в синей области не может быть возбуждено более длинноволновым излучением (закон Стокса), поэтому облучение зеленым лазером практически не вызывает люминесценцию такого кристалла. Это видно по тому, насколько в этом случае слаба люминесценция по сравнению с рамановским рассеянием (рис. 1d). Но в то же время синяя люминесценция хорошо возбуждается EGUV-, LWUV-излучением и фиолетовым лазером (рис. 1а, с, d).

LWUV-возбуждение слабо поглощается алмазом, поэтому излучение исходит из всего кристалла, что дает однородную картину (рис. 1с). EGUV-возбуждение поглощается приповерхностным слоем алмаза, из которого исходит фотолюминесценция, которая показывает детали неоднородного строения кристалла. В картине фотолюминесценции при EGUV-возбуждении (рис. 1а) хорошо видна слоистая структура. Это проявление характерного для природных алмазов зонального роста [9]. Оно показывает историю их длительного роста с разными этапами формирования примесно-дефектной структуры. Природные кристаллы растут во все стороны, это отличает их от синтетических HPHT- и CVD-алмазов, растущих только в одно полупространство.

Совершенные бесцветные алмазы и алмазы чистых фантазийных цветов редки и дороги. Большинство природных алмазов структурно не совершенны, имеют непривлекательный цвет, например, серый, желтоватый или коричневый, в связи с чем ценятся значительно ниже. Люди всегда искали способы «улучшения» таких малоценных с ювелирной точки зрения природных

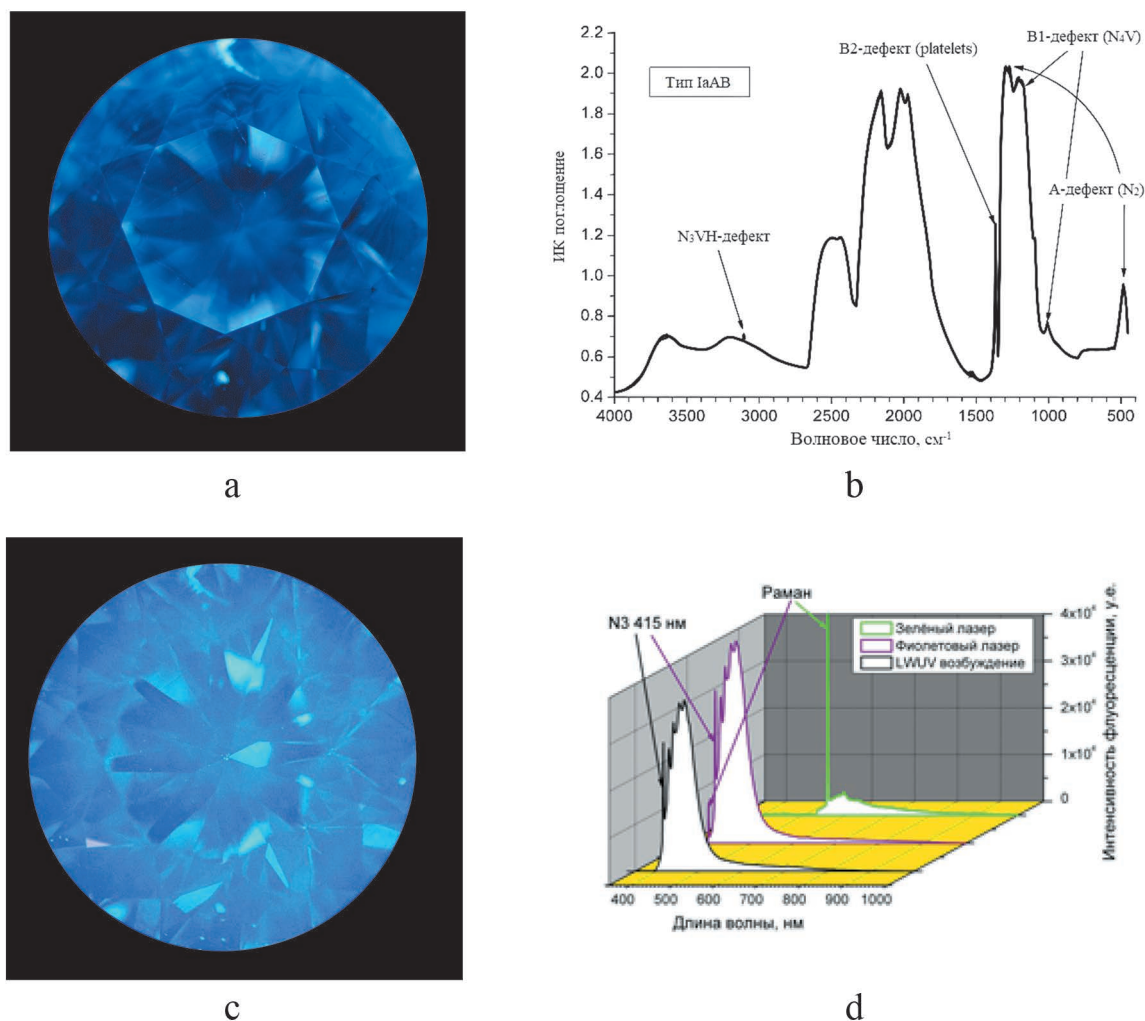


Рис. 1. Характеристики бриллианта (огранка Кр-57, масса 0,30 кар, группа цвета 4, группа чистоты 7а, группа Б по качеству огранки), ограненного из природного алмаза: а) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней короны при возбуждении EGUUV-излучением; б) спектр ИК-поглощения камня; в) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней павильона при возбуждении LWUV-излучением; д) спектры свечения камня при возбуждении указанными на вставке источниками

Fig. 1. Natural cut diamond characteristics (cut KR57, weight 0.3 ct, color group 4, clarity group 7a, cut quality group B): a) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by EGUUV radiation; b) the stone IR absorption spectrum; c) the diamond photoluminescence pattern from the side of the pavilion facets when excited by LWUV radiation; d) the stone glow spectra when excited by the sources indicated on the insert

алмазов. Одним из наиболее желательных «улучшений» является ослабление коричневого цвета, в идеале получение бесцветных алмазов. Также стоит задача по созданию алмазов редких, так называемых фантазийных цветов (розового, красного, голубого, зеленого и т. п.). Для облагораживания алмазов применяют технологию HPHT-отжига при высоких температурах (до 2350 °C) и стабилизирующем высоком давлении (выше 60 тыс. атм) [2] в аппаратах высокого давления, используемых также для выращивания HPHT-алмазов.

В настоящее время распознавание облагороженных алмазов является непростой задачей, непосильной для большинства покупателей и продающих алмазы ювелиров. Сложность распознавания HPHT-обработанных природных алмазов обусловлена тем, что исходно облагороженные алмазы несут в себе многие черты природных, а HPHT-обработка хорошо имитирует процесс отжига алмазов в недрах Земли. Тем не менее некоторые специфические отличия HPHT-обработанных алмазов от необработанных природных используются для обнаружения облагораживания. Эти отличия

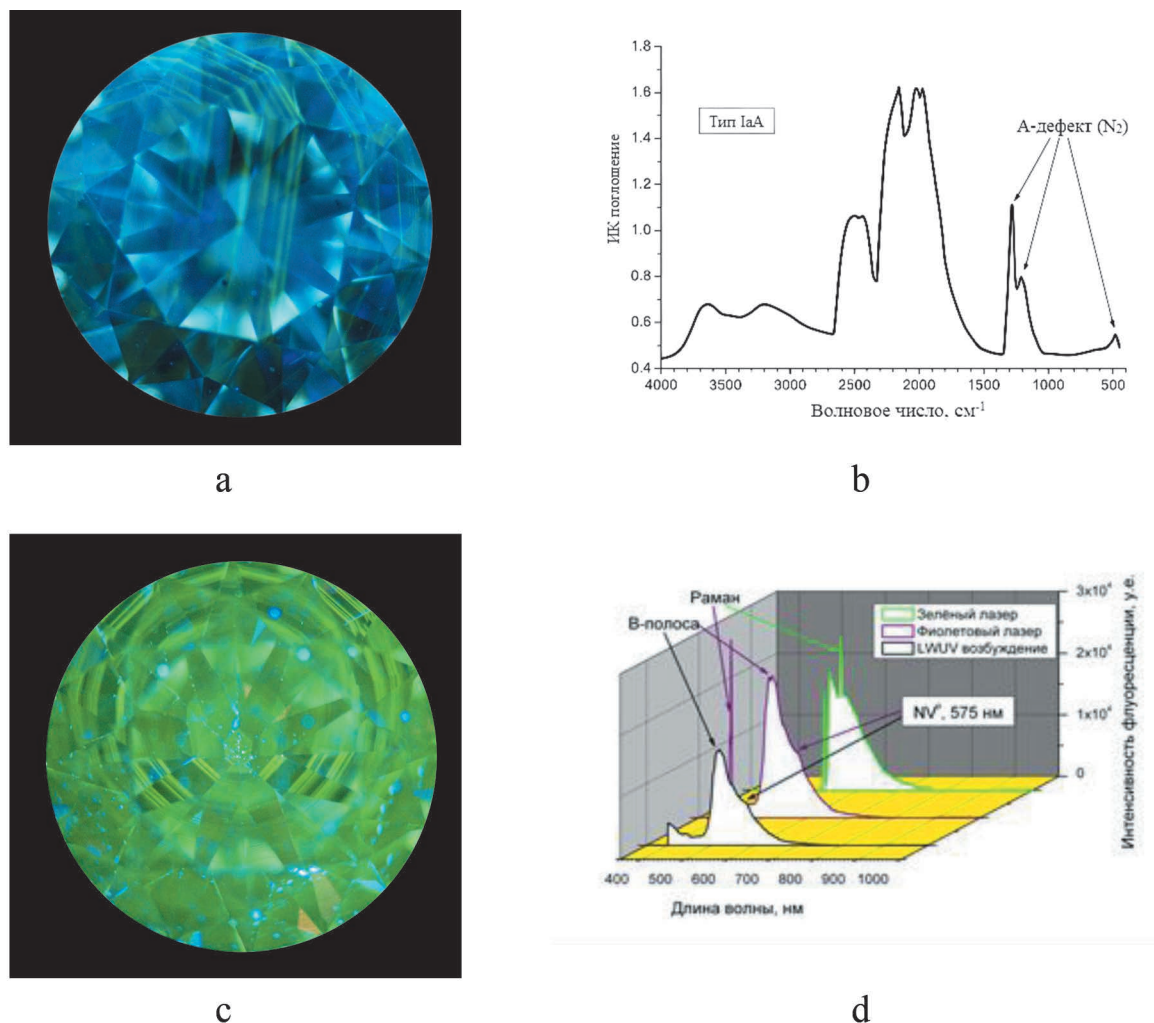


Рис. 2. Характеристики бриллианта (огранка Кр57, масса 0,20 кар, группа цвета 2, группа чистоты 2, группа А по качеству огранки), ограненного из природного облагороженного алмаза: а) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней коронки при возбуждении EGUV-излучением; б) спектр ИК-поглощения камня; в) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней павильона при возбуждении LWUV-излучением; г) спектры свечения камня при возбуждении указанными на вставке источниками

Fig. 2. Characteristics of the diamond (cut KR57, weight 0.2 ct, color group 2, purity group 2, cut quality group A), cut from a natural treated diamond: а) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by EGUV radiation; б) the stone IR absorption spectrum; в) the diamond photoluminescence pattern from the side of the pavilion facets when excited by LWUV radiation; г) the stone glow spectra when excited by the sources indicated on the insert

относятся к примесно-дефектной структуре алмаза и могут быть распознаны квалифицированными специалистами с использованием специализированных тестеров.

Картина фотолюминесценции при EGUV-возбуждении (рис. 2а) показывает характерную для природных алмазов слоистую зональность облагороженного алмаза (в данном случае синее свечение вызвано в основном А-полосой). Спектр ИК-поглощения типичен для азотных природных алмазов – в однофоновой полосе наблюдаются характерные полосы поглощения на А-дефектах (N₂). В этом камне концентрация других, проявляющихся в ИК-

поглощении, агрегатов азота невелика, так что он относится к чистому типу IaA. Но при LWUV-возбуждении алмаз люминесцирует зеленым цветом (рис. 2с). Анализ показывает, что в спектре люминесценции этого камня доминируют две компоненты: так называемая В-полоса и оптический центр NV⁰ с БФЛ 575 нм.

Появление В-полосы, характеризующейся пиком поглощения в диапазоне 500–530 нм (энергия кванта света ~ 2,5 эВ), обусловлено присутствием в кристаллической решетке алмаза одиночных атомов азота (N_s) в качестве глубоких доноров, а также атомов бора (B_s) как мелких акцепторов, занима-

ющих замещающие позиции. Оптический центр NV^0 образован одиночным атомом азота в замещающем положении и вакансией (отсутствием атома углерода) в соседнем положении. Для образования этих дефектов необходимо появление одиночного азота, не характерного для природных алмазов, в которых азот находится в агрегированном состоянии. Причина в том, что высокотемпературный отжиг алмаза (выше 2000 °C) помимо улучшения его цвета одновременно приводит к распаду части агрегатов азота на одиночные атомы, некоторые из которых в процессе диффузии по кристаллу связываются с вакансиями термического происхождения,

что приводит к появлению дефекта NV , в нейтральном зарядовом состоянии дающему оптический центр NV^0 .

Первым методом синтеза кристаллов алмаза, пригодных для ювелирных целей, была технология HPHT с использованием температурного градиента [10]. По температуре и давлению условия роста алмаза близки к условиям природного роста, однако ростовая среда при HPHT совсем другая – это металл-растворитель/катализатор (обычно сплавы Fe, Ni, Co, Mn), в котором растворен углерод. Алмазы, выращенные методом температурного градиента, имеют секториальное строение (сектора типов

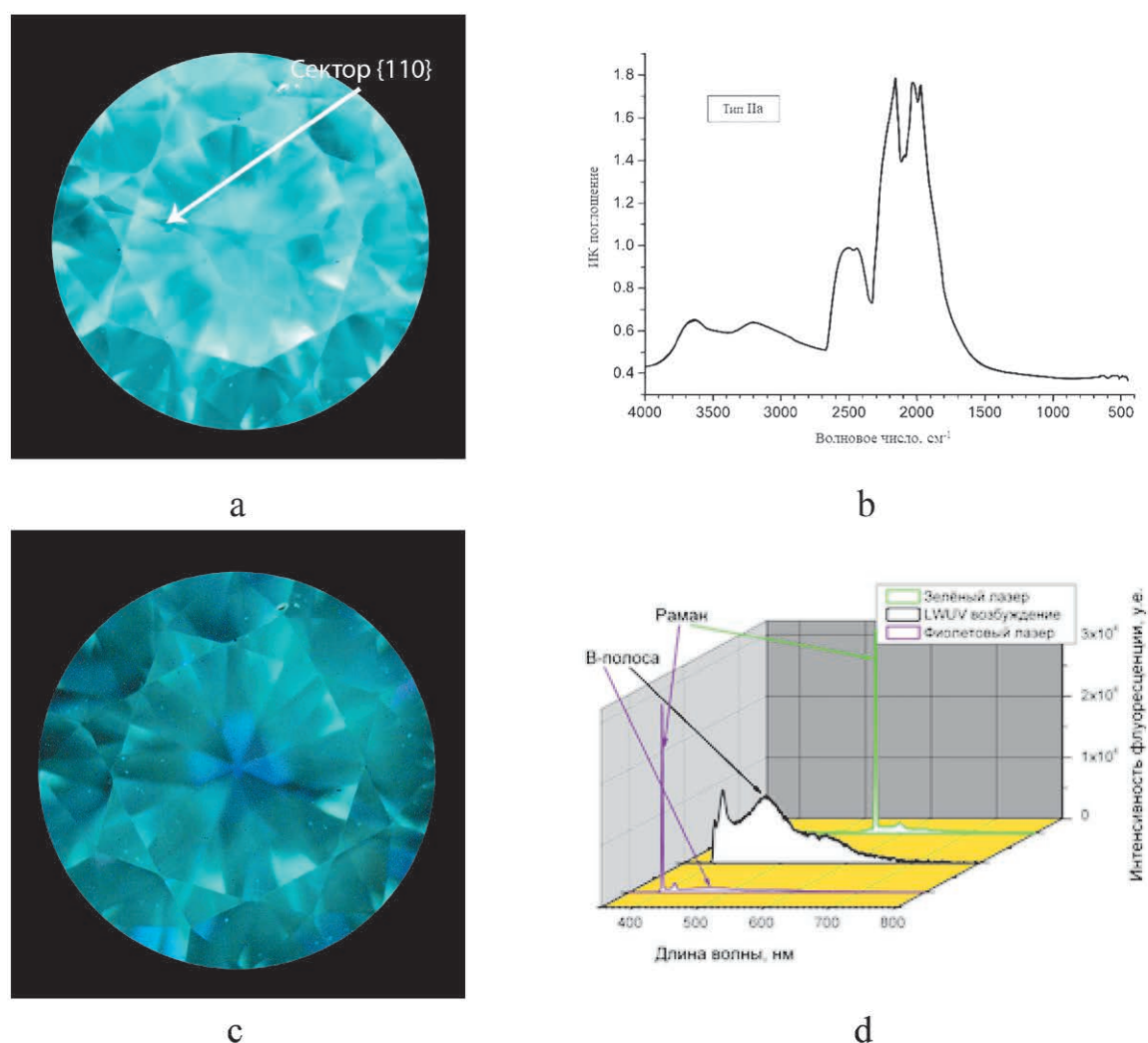


Рис. 3. Характеристики бриллианта (огранка Кр-57, масса 0,25 кар), ограненного из HPHT-алмаза: а) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней коронки при возбуждении EGUV-излучением; б) спектр ИК-поглощения камня; в) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней коронки при возбуждении SWUV-излучением; д) спектры свечения камня при возбуждении указанными на вставке источниками

Fig. 3. Characteristics of the diamond (cut KR57, weight 0.25 ct), cut from HPHT diamond: a) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by EGUV radiation; b) the stone IR absorption spectrum; c) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by SWUV radiation; d) the stone glow spectra when excited by the sources indicated on the insert

{111}, {100}, {110}, {311}) и часто содержат включения металла растворителя или его карбиды (ГОСТ Р 70856-2023). Часто металлические включения настолько мелки, что их невозможно рассмотреть даже в микроскоп, но иногда они присутствуют в HPHT-алмазах в таком количестве, что кристалл притягивается сильным магнитом – это верный признак HPHT происхождения [11]. Такого типа включения совершенно не характерны для природных алмазов, тем не менее полное отсутствие таких металлических включений не исключает HPHT происхождение алмаза.

Развивающиеся от маленького заправочного кристаллика сектора в HPHT-алмазах различаются кристаллическим совершенством и содержанием примесей [12]. Границы секторов обогащены дислокациями и другими дефектами. Сектора часто можно идентифицировать на картинах EGV-возбуждения. Так, на рисунке 3а в левой части изображения хорошо видна узкая, неровная, темная полоса от ростового сектора типа {110}. Чаще секториальная структура кристалла хорошо просматривается со стороны граней павильона при наблюдении под углом. В целом картины люминесценции алмазов лучше изучать со стороны граней павильона (рис. 3с), поскольку грани коронки специально гранятся так, чтобы обеспечить многократное полное отражение света внутри кристалла.

На спектре ИК-поглощения HPHT-алмаза есть только собственное поглощение, а поглощение на примесях и дефектах в однофоновой области ($400\text{--}1400\text{ см}^{-1}$) отсутствует (рис. 3б). Следовательно, кристалл содержит азот в концентрации менее 5 ppm и относится к категории IIa (это характерно для бесцветных синтетических алмазов). Примесь азота встраивается в кристаллическую решетку алмаза в виде одиночных атомов (N_s) в замещающих положениях (то есть азот находится в форме C-дефекта) – это тип кристалла Ib. Даже небольшая концентрация C-дефектов ($< 10\text{ ppm}$) вызывает интенсивный желтый цвет. Поскольку природные алмазы в недрах Земли подвергаются длительному естественному отжигу, азот в них почти всегда агрегирован. По этой причине природные алмазы типа Ib очень редки. Синтетические кристаллы с заметной примесью азота неизменно относятся к этому типу, отчего технологи принимают специальные меры по их очистке при выращивании.

Чтобы уменьшить содержание примесей, источник углерода для роста алмаза (графит) подвергают глубокой очистке и отжигу. Также выращивание малоазотных кристаллов типа IIa не обходится без добавления в ростовую среду специальных геттеров азота, чаще всего Al, Ti или Zr. Они связывают азот в устойчивые соединения AlN, TiN, ZrN, которые вытесняются в ростовую среду. За счет этого удается снизить концентрацию азота в алмазе до уровня 1 ppm и менее. Именно поэтому все без исключения IIa алмазы, будучи очень редкими в природе, должны привлекать особое внимание эксперта.

Этот типичный HPHT-кристалл содержит мало примесей, поэтому интенсивность его люминесценции слабая. Это видно по доминированию рамановского рассеяния в свечении кристалла при лазерном возбуждении (рис. 3д). При этом метод фотолюминесценции очень чувствителен даже к незначительным концентрациям примесей и дефектов [13]. Рисунки 3а и 3б показывают бирюзовое свечение кристалла (B-полоса с максимумом вблизи $500\text{--}530\text{ нм}$). Спектр этой широкой бесструктурной B-полосы виден на рисунке 3д. Такое свечение весьма характерно для HPHT-кристаллов и является геммологическим признаком.

В качестве ключевого фактора выступает наличие в алмазе в замещающих положениях одиночных атомов азота (N_s), являющегося глубоким донором, а также бора (B_s) – мелкого акцептора. Азот и бор являются главными примесями в алмазе. Несмотря на технологические достижения в синтезе алмаза, полностью избавиться от них не представляется возможным, а в ювелирных целях это и вовсе не требуется. Даже при очень низких концентрациях (на уровне единиц на миллиард) они великолепно проявляются в люминесценции, что еще раз показывает исключительно высокую чувствительность фотолюминесценции к оптически активным примесям и дефектам.

При фотовозбуждении носителей заряда люминесценция возникает из-за их рекомбинации через посредство находящихся недалеко друг от друга доноров (N_s) и акцепторов (B_s). Это явление называется излучением на донорно-акцепторных парах. Вероятность акта рекомбинации на донорно-акцепторных парах очень невелика – электрону нужно «одним махом перепрыгнуть» на большое по атомным меркам расстояние. Причем, чем дальше друг от друга находятся атомы N_s и B_s в парах, тем меньше

вероятность такой рекомбинации. Все это приводит к задержке рекомбинации, в результате чего излучение на донорно-акцепторных парах также дает фосфоресценцию – явление, свойственное HPHT-алмазам.

Химическое газозофазное осаждение (CVD) – технология синтеза алмаза из газовой фазы при низком давлении [8]. Смесь газов (обычно $H_2 + CH_4$) чаще всего активируется СВЧ-разрядом. Технология CVD-роста алмаза усовершенствовалась настолько, что позволяет выращивать монокристаллический алмаз с беспрецедентно низким уровнем примесей – вплоть до 0,01 ppm. Если раньше среди синтетических ювелирных алмазов доминировали кристаллы HPHT происхождения, то в последнее время стало больше CVD-кристаллов. Себестоимость последних снизилась, поскольку в одном реакторе одновременно можно выращивать десятки кристаллов [3].

Рост алмаза происходит из нагретой смеси углеводорода и водорода, и несмотря на то, что некоторые другие примеси (такие как азот, бор или кремний) умышленно или ненамеренно попадают в эту смесь, главной примесью в CVD алмазе является водород (рис. 4b). Даже небольшая добавка азота в газовую смесь способна резко (в десятки раз) увеличить скорость роста алмаза, но, к сожалению, это также увеличивает содержание азота в растущем кристалле. Такие кристаллы, содержащие даже немного азота, имеют желтый или даже коричневый цвет, хотя и относятся к типу IIa (рис. 4b).

В настоящее время большинство выращенных CVD-алмазов подвергают термическому облагораживанию методом HPHT. Это позволяет удалить непривлекательный коричневый цвет, исходно свойственный CVD-кристаллам, выращенным с высокой скоростью благодаря небольшой добавке азота в ростовую среду. Такая двухстадийная процедура более экономически выгодна, чем выращивание бесцветных, малопримесных CVD-кристаллов с низкой скоростью. Одновременно такое облагораживание весьма сильно сказывается на примесно-дефектной структуре алмаза, что проявляется в его оптических свойствах.

Показанный на рисунке 4 кристалл выращен сравнительно чистым, бесцветным и не подвергался облагораживанию. Он люминесцирует красным светом (рис. 4а, с). Красная люминесценция определяется в основном (рис. 4d) оптическими центрами NV^0 (БФЛ 575 нм) и NV^- (БФЛ 638 нм), кото-

рые образованы дефектами одного типа NV , но находятся в нейтральном и отрицательном зарядовом состояниях. Этот дефект содержит один атом азота, что является главной отличительной чертой синтетических алмазов. Доказано, что отрицательный заряд дефекта NV^- возникает в результате захвата электрона с расположенного недалеко одиночного замещающего азота (N_s – C-дефект), являющегося донором. Данное свидетельство наличия одиночного азота в кристалле косвенное, поскольку сам одиночный азот не проявляется в люминесценции.

В люминесценции кристалла на рисунке 4d также наблюдается оптический центр с БФЛ 389 нм. Природа его не установлена, однако известно, что он образуется только в CVD-алмазах, и поэтому является геммологическим признаком. Саму БФЛ 389 нм на спектре не видно, так как в приборе ADI-S2 она отрезается оптическим фильтром, не пропускающим УФ-излучение возбуждения. Однако его характерные фоновые повторения в диапазоне 400–450 нм хорошо видны.

Другой характерный для CVD-алмазов оптический центр SiV^- (БФЛ 738 нм) образован дефектом с участием примесного атома кремния. В природных и HPHT-алмазах такой оптический центр встречается крайне редко. В ростовых CVD-реакторах имеется кварцевый колпак или, по крайней мере, стеклянные окна. Иногда чистый кремний используется в реакторах в качестве подложкодержателя, особенно при выращивании поликристаллических пленок. В процессе работы реактора кварц или кремний немного подтравливаются под воздействием активной водородной плазмы, и атомы кремния попадают на стенки реактора и в газовую среду, а из нее уже в растущий алмаз. Отрицательное зарядовое состояние дефекта SiV^- в очередной раз свидетельствует о наличии в кристалле доноров электронов, прежде всего одиночного замещающего азота (N_s – C-дефект), поставляющего свой лишний электрон дефекту SiV .

На рисунке 4а выявляется слоистое строение CVD-алмаза, которое легче всего увидеть на гранях павильона при EGV-возбуждении. CVD-алмазы выращивают на монокристаллических алмазных подложках с кристаллографической ориентацией (001). Особенности роста грани (001) определяют внутреннюю структуру кристалла. Расстояние между слоями достаточно постоянно в пределах одного образца, од-

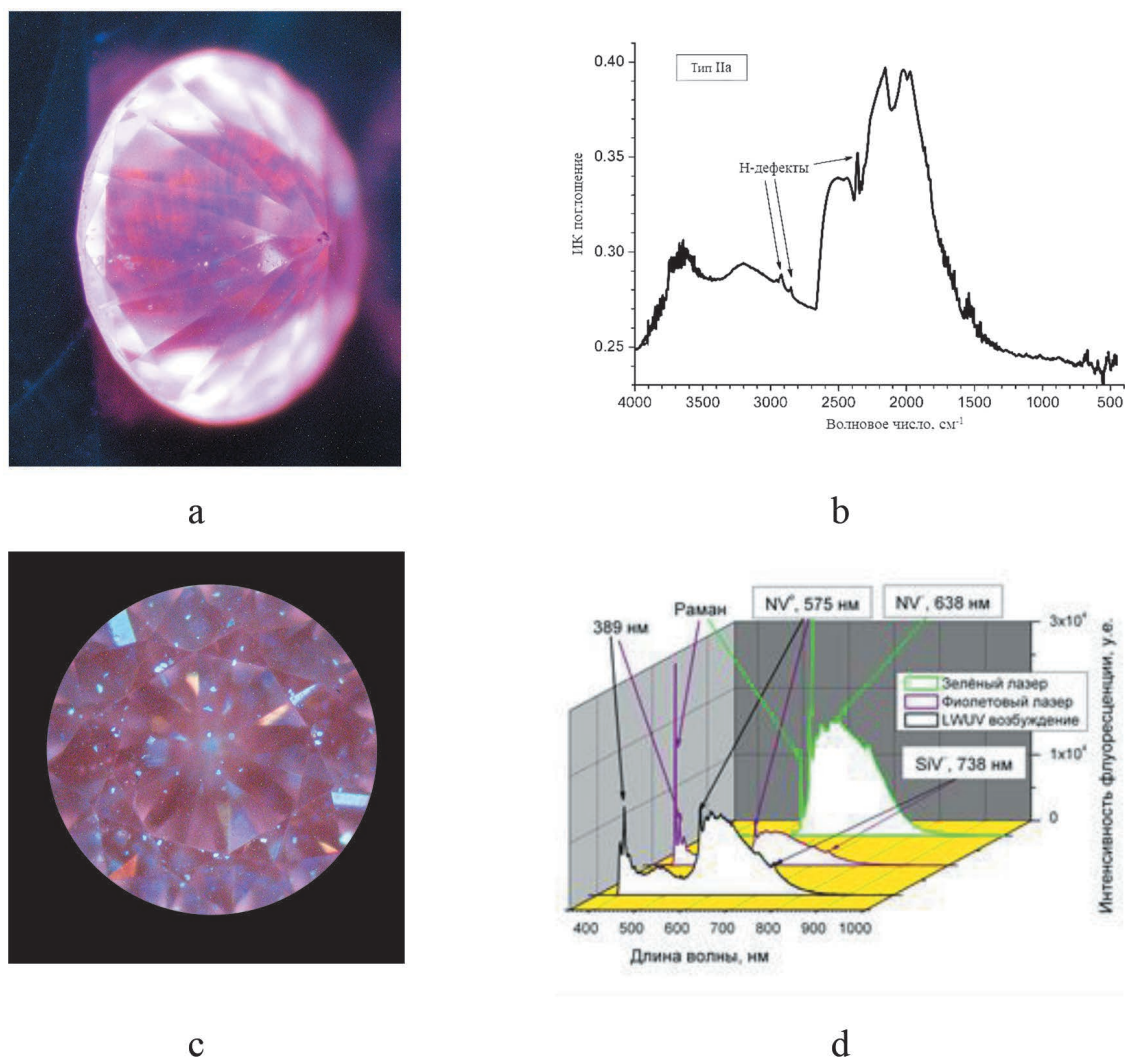


Рис. 4. Характеристики бриллианта (огранка Кр-57, масса 0,25 кар), ограненного из CVD-алмаза: а) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней коронки при возбуждении EGVV-излучением; б) спектр ИК-поглощения камня; в) картина фотолюминесценции бриллианта со стороны граней коронки при возбуждении LWUV-излучением; г) спектры свечения камня при возбуждении указанными на вставке источниками

Fig. 4. Characteristics of the diamond (cut KR57, weight 0.25 ct), cut from a CVD diamond: а) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by EGVV radiation; б) the stone IR absorption spectrum; в) the diamond photoluminescence pattern from the side of the crown facets when excited by LWUV radiation; г) the stone glow spectra when excited by the sources indicated on the insert

нако в разных образцах оно варьируется приблизительно от 1 до 200 мкм. Эти слои являются результатом различного захвата примесей и дефектов на торцах и террасах ростовых ступеней.

Часто на люминесцентных изображениях можно также увидеть несколько ярких полос свечения от перерывов роста. Причина в том, что в настоящее время CVD технология не позволяет вырастить крупный кристалл за один сеанс из-за развития рельефа ростовой поверхности и появления на ней неэпитаксиальных наростов. Приходится

вынимать кристаллы из реактора, переполнировывать и помещать в реактор для нового сеанса роста. Именно эти перерывы ярко проявляются в люминесценции [8].

Закключение

Текущая ситуация на рынке ювелирных алмазов требует применения современных инструментальных методов диагностики их происхождения.

В настоящее время не существует универсальной процедуры стопроцентного определения происхождения алмаза. В свя-

зи с этим экспертам необходимо использовать широкий спектр исследовательских методик в сочетании с профессиональным опытом.

Как показала настоящая работа, это требуется даже при анализе типичных представителей: не бывает двух одинаковых алмазов, даже синтетических. Каждый алмаз уникален, среди них неизбежно присутствуют экземпляры со сложной комбинацией характеристик, что ставит перед экспертом сложные и нетривиальные задачи.

Наиболее эффективными неинвазивными методами исследования являются оптические, прежде всего ИК-поглощение и фотолюминесценция, для которой информативен как спектральный анализ, так и анализ пространственной картины свечения.

Приведем основные диагностические признаки происхождения алмазов.

Практически все почти бесцветные синтетические алмазы (цветовые категории от D до K) относятся к типу IIa, в то время как 99 % бесцветных и околобесцветных природных кристаллов – к типу Ia. В связи с этим в настоящее время при проведении геммологического анализа важно уделять особое внимание бесцветным кристаллам типа IIa. Наличие азота в А и В-форме, определяемое по оптическому поглощению в ИК-диапазоне, говорит о природном происхождении алмаза, но и не может исключать термобарическую обработку природных или даже синтетических кристаллов.

Фотолюминесценция – наиболее чувствительная (но не количественная) методика выявления оптических центров, образованных примесями и дефектами. Полуколичественной характеристикой интенсивности люминесценции является соотношение интенсивностей ее компонент с интенсивностью рамановского рассеяния. Наличие в спектре свечения кристалла рамановской линии, отстоящей от лазерного возбуждения на 1332 см^{-1} , однозначно указывает на алмаз – гарантированно исключаются все симулянты. Практика показала, что не бывает нелюминесцирующих алмазов. Ключевыми факторами, определяющими наблюдаемую люминесценцию, являются интенсивность возбуждения, эффективность фильтрации фонового излучения и чувствительность приемника. Для природных кристаллов характерно синее свечение, однако иногда встречается желтое и белое. Синтетические и облагороженные природ-

ные алмазы обычно дают бирюзовое, красное, оранжевое или зеленое свечение.

Люминесцентное исследование всего кристалла дает больше ценной информации, чем измерения в одной точке, позволяя выявить детали внутреннего строения кристалла. Обнаружение в картине флуоресценции секториальной структуры кристалла показывает НРНТ-происхождение кристалла, слоистой структуры и перерывов роста – CVD происхождение кристалла, а в картине зональной структуры – природное происхождение кристалла.

Наличие оптического центра N_3V^0 (БФЛ 415 нм) в спектре люминесценции говорит о природном происхождении алмаза, но требует исследования других оптических центров для выявления термобарической обработки природных или даже синтетических алмазов. Обнаружение азотно-вакансионных дефектов, проявляющихся в оптических центрах NV (БФЛ 638 нм), NV^0 (БФЛ 575 нм) в зависимости от их набора, свидетельствует либо о синтетическом происхождении кристаллов, либо об облагораживании. Высокая интенсивность при флуоресценции отрицательно заряженных оптических центров NV (БФЛ 638 нм), SiV (БФЛ 738 нм) указывает на наличие одиночного замещающего донорного азота N_s , который предоставляет им свой лишний электрон, и свидетельствует о синтетическом происхождении алмаза и/или его облагораживании. Оптический центр SiV (БФЛ 738 нм) говорит о CVD-происхождении алмаза. Флуоресценция и фосфоресценция в В-полосе (максимум 480–550 нм) указывает на НРНТ-происхождение алмаза.

Соотношение интенсивностей полос и линий в спектре люминесценции сильно зависит от длины волны возбуждающего излучения – интенсивность полос и линий тем выше, чем ближе к ней длина волны возбуждающего излучения. Поэтому важно иметь возможность возбуждения на разных длинах волн, чтобы максимально выявить все оптические центры. Возбуждение светом с длиной волны вблизи фундаментального края поглощения (EGUV – 225 нм), как показывает практика, позволяет выявить неоднородную структуру кристалла. SWUV-возбуждение (254 нм) обычно вызывает эффективную фотолюминесценцию синтетических кристаллов. В свою очередь, LWUV-возбуждение (365 нм), как правило, вызывает эффективную фотолюминесценцию природных кристаллов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D'Haenens-Johansson U.F.S., Butler J.E., Katrusha A.N. Synthesis of Diamonds and Their Identification // *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 689–754. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.13>
2. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. *HPHT-Treated Diamonds*. Diamonds Forever. Heidelberg: Springer Berlin, 2013. 257 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37490-6>
3. Eaton-Magaña S., Hardman M.F., Odake S. Laboratory-Grown Diamonds: An Update on Identification and Products Evaluated at GIA // *Gems & Gemology*. 2024. Vol. 60. No. 2. P. 146–167. <https://doi.org/10.5741/GEMS.60.2.146>
4. Хмельницкий Р.А. Оптические методы в геммологии алмаза. Москва: Перо, 2025. 152 с.
5. Zaitsev A.M. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Heidelberg: Springer Berlin, 2001. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04548-0>
6. Sun Z., Jollands M., Palke A.C. Chemical Analysis in the Gemological Laboratory: XRF and LA-ICP-MS // *Gems & Gemology*. 2024. Vol. 60. No. 4. P. 536–559. <https://doi.org/10.5741/GEMS.60.4.536>
7. McManus C.E., McMillan N.J., Dowe J., Bell J. Diamonds Certify Themselves: Multivariate Statistical Provenance Analysis // *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 10. <https://doi.org/10.3390/min10100916>
8. Breeding C.M., Shigley J.E. The “Type” Classification System of Diamonds and Its Importance in Gemology // *Gems & Gemmology*. 2009. Vol. 45. No. 2. P. 96–111.
9. Deljanin B. *Diamonds: Natural, Treated, and Laboratory-Grown*. Vancouver: Gemmological Research Industries Inc., 2021. 190 p.
10. Eaton-Magaña S., Shigley J.E. Observations on CVD-Grown Synthetic Diamonds: A Review // *Gems & Gemology*. 2016. Vol. 52. No. 3. P. 222–245.
11. Eaton-Magaña S., Shigley J.E., Breeding C.M. Observations on HPHT-Grown Synthetic Diamonds: A Review // *Gems & Gemmology*. 2017. Vol. 53. No. 3. P. 262–284. <https://doi.org/10.5741/GEMS.53.3.262>
12. D'Haenens-Johansson U.F.S., Katrusha A., Soe Moe K., Johnson P., Wang W. Large Colorless HPHT-Grown Synthetic Gem Diamonds from New Diamond Technology, Russia // *Gems & Gemmology*. 2015. Vol. 51. No. 3. P. 260–279. <https://doi.org/10.5741/GemS.51.3.260>
13. Eaton-Magaña S., Breeding C.M. An Introduction to Photoluminescence Spectroscopy for Diamond and Its Applications in Gemology // *Gems & Gemology*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 2–17. <https://doi.org/10.5741/GEMS.52.1.2>

REFERENCES

1. D'Haenens-Johansson U.F.S., Butler J.E., Katrusha A.N. Synthesis of Diamonds and Their Identification. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2022. Vol. 88. P. 689–754. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.13>
2. Dobrinets I.A., Vins V.G., Zaitsev A.M. *HPHT-Treated Diamonds*. *Diamonds Forever*. Heidelberg: Springer Berlin, 2013. 257 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-37490-6>
3. Eaton-Magaña S., Hardman M.F., Odake S. Laboratory-Grown Diamonds: An Update on Identification and Products Evaluated at GIA. *Gems & Gemology*. 2024. Vol. 60. No. 2. P. 146–167. <https://doi.org/10.5741/GEMS.60.2.146>
4. Khmel'nitskii R.A. *Optical Methods in Diamond Gemology*. Moscow: Pero, 2025. 152 p. (In Russ.).
5. Zaitsev A.M. *Optical Properties of Diamond: A Data Handbook*. Heidelberg: Springer Berlin, 2001. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04548-0>
6. Sun Z., Jollands M., Palke A.C. Chemical Analysis in the Gemological Laboratory: XRF and LA-ICP-MS. *Gems & Gemology*. 2024. Vol. 60. No. 4. P. 536–559. <https://doi.org/10.5741/GEMS.60.4.536>
7. McManus C.E., McMillan N.J., Dowe J., Bell J. Diamonds Certify Themselves: Multivariate Statistical Provenance Analysis. *Minerals*. 2020. Vol. 10. No. 10. <https://doi.org/10.3390/min10100916>
8. Breeding C.M., Shigley J.E. The “Type” Classification System of Diamonds and Its Importance in Gemology. *Gems & Gemmology*. 2009. Vol. 45. No. 2. P. 96–111.
9. Deljanin B. *Diamonds: Natural, Treated, and Laboratory-Grown*. Vancouver: Gemmological Research Industries Inc., 2021. 190 p.
10. Eaton-Magaña S., Shigley J.E. Observations on CVD-Grown Synthetic Diamonds: A Review. *Gems & Gemology*. 2016. Vol. 52. No. 3. P. 222–245.
11. Eaton-Magaña S., Shigley J.E., Breeding C.M. Observations on HPHT-Grown Synthetic Diamonds: A Review. *Gems & Gemmology*. 2017. Vol. 53. No. 3. P. 262–284. <https://doi.org/10.5741/GEMS.53.3.262>
12. D'Haenens-Johansson U.F.S., Katrusha A., Soe Moe K., Johnson P., Wang W. Large Colorless HPHT-Grown Synthetic Gem Diamonds from New Diamond Technology, Russia. *Gems & Gemmology*. 2015. Vol. 51. No. 3. P. 260–279. <https://doi.org/10.5741/GemS.51.3.260>
13. Eaton-Magaña S., Breeding C.M. An Introduction to Photoluminescence Spectroscopy for Diamond and Its Applications in Gemology. *Gems & Gemology*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 2–17. <https://doi.org/10.5741/GEMS.52.1.2>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Хмельницкий Роман Абрамович – к. ф.-м. н., ведущий научный сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева РАН; научный консультант ООО «Алмазный НТК»;
e-mail: khmelnitskyra@lebedev.ru

Плешанова Мария Максимовна – государственный судебный эксперт отдела минералогической экспертизы ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России;
e-mail: m.pleshanova@sudexpert.ru

Хабибова Полина Андреевна – государственный судебный эксперт отдела минералогической экспертизы ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России;
e-mail: p.khabibova@sudexpert.ru

Грязнов Павел Владимирович – сотрудник ООО «Алмазный НТК»;
e-mail: pvlgryaznov@gmail.com

Герасимова Екатерина Игоревна – к. г.-м. н., заместитель начальника отдела минералогической экспертизы ФБУ РФЦСЭ имени профессора А.Р. Шляхова при Минюсте России;
e-mail: e.gerasimova@sudexpert.ru

ABOUT THE AUTHORS

Khmelnitsky Roman Abramovich – Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Leading Research Fellow, P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences; Scientific Consultant of Diamond STC (LLC); e-mail: khmelnitskyra@lebedev.ru

Pleshanova Maria Maksimovna – State Forensic Expert of the Mineralogical Examination Department of the Russian Federal Centre of Forensic Science named after Professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation;
e-mail: m.pleshanova@sudexpert.ru

Khabibova Polina Andreevna – State Forensic Expert of the Mineralogical Examination Department of the Russian Federal Centre of Forensic Science named after Professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation;
e-mail: p.khabibova@sudexpert.ru

Gryaznov Pavel Vladimirovich – Employee of Diamond STC (LLC); e-mail: pvlgryaznov@gmail.com

Gerasimova Ekaterina Igorevna – Cand. Sc. (Geology and Mineralogy), Deputy Head of the Mineralogical Examination Department of the Russian Federal Centre of Forensic Science named after professor A.R. Shlyakhov of the Ministry of Justice of the Russian Federation;
e-mail: e.gerasimova@sudexpert.ru

*Статья поступила: 10.04.2026
После доработки: 20.05.2026
Принята к печати: 27.05.2026*

*Received: April 10, 2026
Revised: May 20, 2026
Accepted: May 27, 2026*