

УДК 622.371(571.56)

EDN: FWWDURU

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-232-243>



Оригинальная статья

Идентификация происхождения исходного сырья бриллиантов по дефектно-примесному составу алмазов

**Марина Алексеевна Федотова[✉], Михаил Алексеевич Иванов,
Семен Павлович Леонтьев, Дайаана Григорьевна Эверстова**

*Северо-Восточный федеральный университет, ул. Белинского, 58, г. Якутск, 677000, Российская Федерация
[✉]fedmar_fti@mail.ru*

Аннотация

Из ряда типоморфных признаков алмазов после обработки их в бриллианты остается только дефектно-примесный состав. В работе использованы 60 образцов из трех различных месторождений Якутской алмазоносной провинции. Методами ИК-, УФ- и видимой области, ЭПР-спектроскопии определены концентрации Н-, В2-, N3-, P1-, 490.7-, N3V-центров в исходных алмазах и в изготовленных из них бриллиантах. Корреляционно-регрессионный анализ полученных данных показал, что между концентрациями примесных дефектов в исходных кристаллах алмаза и изготовленных из них бриллиантах существует определенная корреляция, свидетельствующая о наличии «наследования» комплекса дефектно-примесного состава исходных алмазов и изготовленных из них бриллиантов. На основе экспериментальных данных построены линейные регрессионные модели, описывающие зависимость концентрации дефектов в бриллиантах от их концентрации в алмазах указанных месторождений. Поскольку условия образования алмазов в различных месторождениях сходны, по единичным бриллиантам невозможно определить географическое происхождение исходного алмаза. Результаты исследования показали, что статистически значимая выборка бриллиантов для определения месторождения алмазов, из которых они изготовлены, составляет 400 экземпляров при условии принадлежности алмазов к одному месторождению.

Ключевые слова: алмазы, типоморфные признаки, бриллианты, примесные дефекты, методы математической статистики

Финансирование. Исследование выполнено в рамках госконтракта № 1921189205662017729147283/2018-566 от 01.06.2019 по теме «Исследование возможности определения источника происхождения обработанных алмазов (бриллиантов)».

Для цитирования: Федотова М.А., Иванов М.А., Леонтьев С.П., Эверстова Д.Г. Идентификация происхождения исходного сырья бриллиантов по дефектно-примесному составу алмазов. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2026;31(2):232–243. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-232-243> EDN: FWWDURU

Original article

Origin identification of rough diamonds using impurity composition from polished diamonds

Marina A. Fedotova[✉], Mikhail A. Ivanov, Semyon P. Leontyev, Daiaana G. Everstova

*Ammosov North-Eastern Federal University, 58, Belinsky St., Yakutsk, Russian Federation, 677027
[✉]fedmar_fti@mail.ru*

Abstract

Among the typomorphic features of rough diamonds, only the defect-impurity composition is preserved after their processing into jewelry diamonds. In this study, 60 samples from three different deposits of the Yakutian diamond province were examined. The concentrations of H-, B2-, N3-, P1-, 490.7-, N3V-centers in the original rough diamonds and in the polished diamonds derived from them were determined using IR, UVVis, and EPR spectroscopy. Correla-

tion-regression analysis of the obtained data revealed correlation between the concentrations of impurity defects in the original rough diamond crystals and in the resulting jewelry diamonds, indicating an “inheritance” of the defect-impurity composition from the rough to the polished diamonds. Based on the experimental data, linear regression models were derived to describe the dependence of defect concentrations in polished diamonds on their concentration in rough diamonds from the specified deposits. However, because the formation conditions of diamonds from different deposits can be similar, it is not possible to determine the geographic origin of the original diamond from the impurity-defect composition of a single polished diamond. The results indicate that, assuming the diamonds originate from the same deposit, a statistically significant sample for determining their source deposit consists of 400 polished diamonds.

Keywords: diamonds, typomorphic features, polished diamonds, impurity defects, statistical methods

Funding. This research was conducted within the framework of state contract No. 1921189205662017729147283/2018-566 dated 01 June 2019 under the topic “Study of the possibility of determining the source of origin of processed diamonds (brilliants)”.

For citation: Fedotova M.A., Ivanov M.A., Leontyev S.P., Everstova D.G. Origin identification of rough diamonds using impurity composition from polished diamonds. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2026;31(2):232–243. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2026-31-2-232-243> EDN: FWWDUR

Введение

В настоящее время растет интерес к разработке методов определения географического источника происхождения алмазов и изготовленных из них бриллиантов (ограненных алмазов). Тем не менее, надежного метода определения источника бриллианта все еще нет, хотя на решение данной задачи направлены усилия многочисленных исследователей и специалистов многих стран.

Разработаны отраслевые инициативы по отслеживанию (трекингу) алмазов, которые учитывают растущее внимание к корпоративному управлению, воздействию на окружающую среду и социальной ответственности [1, 2]. Так, компания De Beers разработала инициативу по отслеживанию под названием Tracr, которая использует блокчейн, безопасную цифровую запись транзакций, позволяющую отследить конкретный алмаз от рудника до ювелирного рынка. Компания Lucara имеет собственную систему отслеживания с использованием блокчейна с Clara Diamond Solutions. Компания Rio Tinto разработала программу для отслеживания алмазов со своего рудника Аргайл (сейчас закрытого) по всей цепочке поставок.

В работах [1–6] приведены сведения по исследованиям элементов-индикаторов в алмазах и утверждается, что данные о микроэлементах в алмазах, собранные на сегодня, весьма ограничены и не являются доказательствами географических признаков. Хотя первоначальные результаты были обнадеживающими, единственный проверенный метод количественного анализа следовых элементов в алмазах ювелирного качества LA-ICP-MS (лазерная абляция–индуктивно связанная плазма–масс-спектрометрия)

оказался медленным, дорогим и разрушающим. Эти ограничения исключают фундаментальное исследование происхождения алмазов по содержанию следовых элементов данным методом.

Также работы по исследованию изотопного состава азота, кислорода и серы, углерода в сочетании с исследованиями минеральных включений в алмазах разрушающими методами не привели к разрешению противоречий по вопросу образования алмазов [7, 8]. Приведенные в работах [9, 10] геологические и экспериментальные данные, подтвержденные термодинамическими соображениями, свидетельствуют о том, что алмаз является полигенетическим минералом, образующимся в различных физико-химических условиях и различных геотектонических обстановках.

Учитывая высокую стоимость бриллиантов, в практических целях необходимо использовать неразрушающие методы исследования. Так, например, в [3, 11] сообщается о разработке лазерной нанометки, которая может быть считана в любое время, для идентификации алмазов таким образом, чтобы метка выдерживала огранку и полировку. Примесные центры в алмазах, являясь дефектами наноразмерного уровня, способны подвергаться воздействию электромагнитных волн соответствующих длин, что позволяет «манипулировать» ими, создавая различные комбинации и комплексы из них в кристаллической решетке. Так, например, компания АЛРОСА (ПАО) представила технологию лазерной нанометки, представляющей собой трехмерный идентификационный код [12], используемый для трейсинга алмазов и бриллиантов.

Термин «трейсинг» (tracing) алмазов означает отслеживание движения алмаза от месторожде-

ния до производственной огранки, дальнейшей сертификации и рынка бриллиантов. В данной работе не ставилось задачи трейсинга алмаза по производственной цепочке от добычи до его конечного потребления как бриллианта. Здесь рассматривается вопрос о возможности определения источника происхождения бриллианта, имея в виду, что алмаз — это сырье, из которого изготавливается конечный продукт — бриллиант (ювелирная вставка), т. е. используется отличный от трейсинга подход.

Если рассматривать аспект природного различия алмазов из разных месторождений, то стоит обратить внимание на следующее: каждый алмаз в виде сырья или в виде бриллианта имеет присущий только ему индивидуальный набор примесных дефектов, который возможно установить комплексом спектральных методов [13–16]. Тем не менее, до настоящего времени не было проведено научно обоснованного исследования с использованием какого-либо метода, демонстрирующего результаты изучения характеристик алмазов, которые позволили бы объективно определить происхождение какого-то отдельно алмаза или бриллианта.

Исходя из анализа доступных информационных источников авторы работы изначально предположили, что кристалломорфологические признаки и включения в алмазах не смогут дать достоверной информации о бриллианте, который был из него изготовлен, по следующим причинам:

- во-первых, большая часть этих признаков исчезает при огранке алмаза в бриллиант;
- во-вторых, те признаки, которые сохраняются, могут быть сходны или даже одинаковы с такими же характеристиками у алмазов из других месторождений, в том числе зарубежных, ввиду близких геолого-генетических условий образования алмаза как минерала в целом [7–9].

Таким образом, основное внимание было уделено примесному составу, одному из типоморфных признаков алмаза и, соответственно, изготовленного из него бриллианта. Целью настоящей работы является выяснение возможности установления источника (конкретного месторождения) алмазного сырья, из которого изготовлены бриллианты, по признаку «наследования» комплекса примесно-дефектного состава при исключении любого воздействия на исследуемые бриллианты.

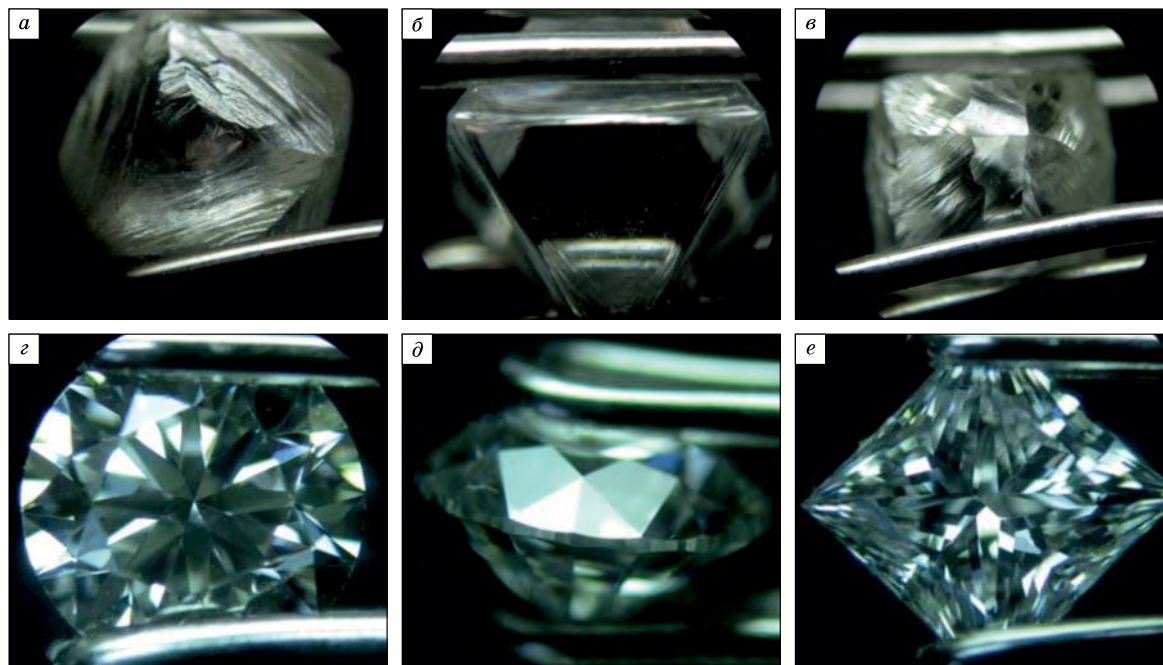


Рис. 1. Исследованные алмазы и бриллианты: *а* – округлоступчатое строение грани (трубка Юбилейная), $\times 45$; *б* – гладкогранный острореберный (трубка Интернациональная), $\times 60$; *в* – блоковое строение граней (россыпь Молодо), $\times 45$; *г* – корона Кр-57, $\times 60$; *д* – основные грани Кр-57, $\times 45$; *е* – площадка П-57, $\times 45$

Fig. 1. Studied rough and polished diamonds: *a* – round-step structure of facet (Yubileinaya pipe), $\times 45$; *b* – smooth and sharp-edged (Internatsionalnaya pipe), $\times 60$; *v* – block facet structure (Molodo placer), $\times 45$; *г* – crown of Kr-57, $\times 45$; *д* – main facets of Kr-57, $\times 45$; *е* – table of P-57, $\times 45$

Объекты и методы исследования

Исследовано 60 кристаллов алмаза размерности 2 Gr (0,45–0,65 кар) – по 20 образцов из трех месторождений Якутской алмазоносной провинции (ЯАП): месторождений трубок Юбилейная и Интернациональная, а также россыпного месторождения Молодо.

Исследованные кристаллы алмазов имели высокое качество и относились к ювелирному сырью Sawables (Z) и Shapes (Sh). В отдельных алмазах имелись единичные включения разного размера, но они были расположены в основном в периферийной зоне, редко в промежуточной и центральной (рис. 1, а–в). Sawables – целые кристаллы правильной формы и с незначительным искажением, гладкогранные и с незначительной рельефностью граней. Shapes – целые кристаллы с небольшим искажением, гладкогранные, с незначительной или небольшой рельефностью граней. Цвет исследованных кристаллов от 1 до 5 [17].

В ходе работы все изученные кристаллы алмазов были огранены, в результате чего получено 106 бриллиантов. Огранка проведена в соответствии с требованиями [18] в условиях действующего алмазогранильного производства. Исходное алмазное сырье имело высокое ювелирное качество, по габитусу это были в основном октаэдры, встречались додекаэдры и кристаллы переходной формы с небольшим уплощением. В соответствии с производственным исследованием и разметкой для получения наибольшего выхода годного алмазы огранены в бриллианты двух видов: Кр-57 (круглая пятидесятигранная) и П-57 («принцесса» пятидесятигранная) (рис. 1, г–е). Бриллианты формы Кр-57 обычно изготавливаются из кристаллов алмаза октаэдрического габитуса, П-57 – из уплощенных кристаллов. Из октаэдров получают обычно по два бриллианта, один основной бриллиант с рассчитанным при разметке наибольшим выходом годного и второй – маленького размера из оставшегося объема исходного кристалла. В исследовании использованы бриллианты большего размера, так как маленькие камни были с практической точки зрения неудобны для работы. Из уплощенных кристаллов алмаза изготавливаются по одному бриллианту формы П-57.

Исследование проведено в два этапа. Для изучения дефектно-примесного состава образцов в начальном состоянии в виде алмазного сырья,

а затем в виде изготовленных из них бриллиантов использовались следующие методы: ИК-, УФ- и спектроскопия видимой области, КР-спектроскопия и метод ЭПР. При исследованиях кристаллов методами ИК-, УФ- и видимой области спектроскопии обычно регистрируют спектры с алмазных пластинок, но в данной работе ни алмазы, ни бриллианты не подвергались какой-либо предварительной механической пробоподготовке.

Из-за необходимости использования неразрушающих методов некоторые из них были исключены для использования в данной работе, как например, метод катодolumинесценции (КЛ), позволяющий изучать внутреннее зонально-секториальное распределение примесей в кристалле, поскольку данный метод требует изготовления пластинок путем вырезания из кристалла.

Исследование образцов методом ИК-спектроскопии проводили на ИК-микроскопе Perkin-Elmer Spotlight 200i (Perkin Elmer Inc., США). Диапазон измерений – $350\text{--}4000\text{ см}^{-1}$. Была выполнена съемка интегральных спектров по выбранной линии кристалла из 11 измерений на 1 кристалл с накоплением сигнала (4 скана). Проведена обработка спектров с помощью метода базовой линии по трем точкам: 4000 см^{-1} (точка), $1600\text{--}1450\text{ см}^{-1}$ и $870\text{--}670\text{ см}^{-1}$ (минимумы точки в диапазоне). Нормирование спектров осуществляли по поглощению в двухфононной области, коэффициент поглощения на частоте 1974 см^{-1} ($\alpha_{1974} = 12,5\text{ см}^{-1}$) выбран в качестве параметра внутреннего стандарта. Определяли коэффициенты поглощения для всех переменных частот, для слабых пиков отдельно вычисляли базовые линии для вычитания фона. По характерным частотам поглощения определяли концентрации А-, В-, В2-агрегатов (плейтлетс) и Н [16]. Нормирование спектров и вычитание базовой линии выполняли в программе UV WinLab DPV (Perkin Elmer Inc., США).

Спектрофотометрические исследования алмазов в УФ- и видимой областях выполняли на двухлучевом сканирующем спектрофотометре с двойным монохроматором Lambda 750S (Perkin Elmer Inc., США) в диапазоне $250\text{--}800\text{ нм}$ при комнатной температуре. Спектры поглощения регистрировались при ширине щели 5 нм и разрешении 1 нм в диапазоне $250\text{--}500\text{ нм}$. Воспроизводимость на приборе составляла $\pm 0,06\text{ нм}$, точность $\pm 0,15\text{ нм}$. Рассеяние пучка – менее

0,0001 %Т при 220, 340 и 370 нм. Скорость сканирования – 11,94 нм/мин. В УФ-области проявляются системы электронно-колебательных полос N3 (415,2 нм), N4 (354 нм), N9 (236 и 230,8 нм), N10 (240 и 248 нм) и другие [16]. В исследованных в данной работе образцах проявился только примесный дефект N3 (415,2 нм).

При регистрации спектров поглощения образцов в области УФ- и видимого спектра разработан специальный держатель кристаллов [19], который размещался в кюветном отделении прибора перед интегральной сферой, второй держатель без кристалла устанавливали в пути луча сравнения. Геометрическое измерение оптического пути луча спектрофотометра позволило определить коэффициент поглощения α , что позволило вычислить концентрацию N3-центров, используя формулу

$$N_{N3} = 2 \cdot 10^{17} \cdot \alpha_{415,2},$$

где N_{N3} – концентрация азота в форме N3 дефекта (см^{-3}), $\alpha_{415,2}$ – коэффициент поглощения на соответствующей длине волны.

$$\alpha = \frac{1}{d} \cdot \ln \frac{I_0}{I} = \frac{1}{d} 2,30259 \lg \frac{I_0}{I} = \frac{1}{d} 2,30259 \cdot D,$$

где D – оптическая плотность: $D = \lg(I_0/I) = \lg 1/T$; d – толщина кристалла. Оптическая плотность находится по методу базовой линии с использованием пакета программ UV WinLab.

Спектры ЭПР кристаллов алмаза получены на спектрометре E-109 фирмы Varian в X-диапазоне частот при комнатной температуре. Методом ЭПР определяли концентрации парамагнитных примесных центров [20]. Средняя концентрация парамагнитных центров рассчитывалась при записи спектров ЭПР исследованных кристаллов совместно с эталонами, в качестве которых использовался микрокристалл $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.

В результате исследований вышеуказанными методами 60 кристаллов алмаза из трех различных месторождений и изготовленных из них бриллиантов получены данные по концентрации следующих дефектов: водородных центров (Н); плейтлетса (B2); центра N3 (образован тремя атомами азота и вакансией), а также N3V (парамагнитный аналог N3), одиночного азотного атома (P1); центра 490.7.

Для обработки экспериментальных данных была использована компьютерная программа для статистической обработки данных IBM SPSS Statistics. IBM® SPSS® Statistics, версия 22 [21].

Результаты исследования

ИК-спектроскопия. Исследование методом ИК-спектроскопии выявило наличие в исследованных образцах примесных А- и В-центров, а также водородных дефектов (Н) и плейтлетса (B2).

При этом концентрации А- и В-дефектов для образцов из трубки Интернациональная рассчитаны для 20 % исследованных алмазов и бриллиантов размерности из-за «зашкаливания» спектров в области определения А- и В-центров. Такое «зашкаливание» интенсивности спектров в области пиков, характерных для А- и В-дефектов, происходит при их содержании выше $\approx 450,0 \text{ ppm}$. Для образцов из остальных двух месторождений такого «зашкаливания» интенсивности не наблюдалось ни для одного примесного центра. Тем не менее, в данном исследовании для определения возможности «наследования» примесно-дефектного состояния из алмазов в бриллиантах А- и В-центры не включены. Очевидно, что для высокоазотных алмазов вычисление концентрации А- и В-центров связано с техническими возможностями метода ИК-спектроскопии. В случае, если параметры спектрометра позволяют регистрировать ИК-спектры алмазов с высоким содержанием А- и В-центров, то возможно проведение корреляционного анализа и по этим дефектам.

Как указано выше, исследование проводилось без разрушения образцов. Концентрации водородных дефектов и плейтлетса определены для всех образцов в условных единицах по методике, предложенной в [22]. Характерные спектры исследованных образцов представлены на рис. 2.

Спектроскопия в УФ- и видимой области. Зарегистрированные спектры поглощения в УФ- и видимой областях спектра показали наличие N3-центров во всех образцах. Типичные спектры оптической плотности исследованных образцов приведены на рис. 3, а–в; типичные спектры возбуждения – на рис. 3, г.

Азотсодержащие алмазы непрозрачны для ультрафиолетовых лучей с длиной волны менее 330 нм, что видно на полученных спектрах, при длинах волн менее 330 нм наблюдается область полного поглощения. В результате обработки полученных спектров в УФ- и видимой области вычислены концентрации N3-центров. В УФ- и видимой областях N3-дефект имеет главную линию 415,2 нм. Для этого дефекта характерна

зеркальная симметричность спектров поглощения и фотолюминесценции.

Метод ЭПР. Характерными центрами в исследованных методом ЭПР алмазах и изготовленных из них бриллиантов были: донорный азот (С или Р1-центр), N3V-центр, имеющий в своей структуре три атома азота вокруг вакансии, и центр 490.7, проявляющийся в фотолюминесценции эмиссией с бесфононной линией (БФЛ) 490,7 нм в пластически деформированных кристаллах алмаза типа Ia, содержащих агрегатную форму азота в виде А-центров (пары атомов азота в соседних углеродных положениях). Для 26 образцов наряду с ЭПР-спектром от одиночного примесного азота наблюдался разрешенный спектр от сверхтонкой структуры N3V-центров (рис. 4, а), спектр ЭПР в виде одиночной широкой линии от N3V-центров в областях кристалла с сильно искаженной структурой (рис. 4, б), а также спектр ЭПР-центра 490.7 (рис. 4, в).

Большинство кристаллов имело зональность по содержанию примеси азота и его агрегатных форм. При изготовлении бриллиантов происхо-

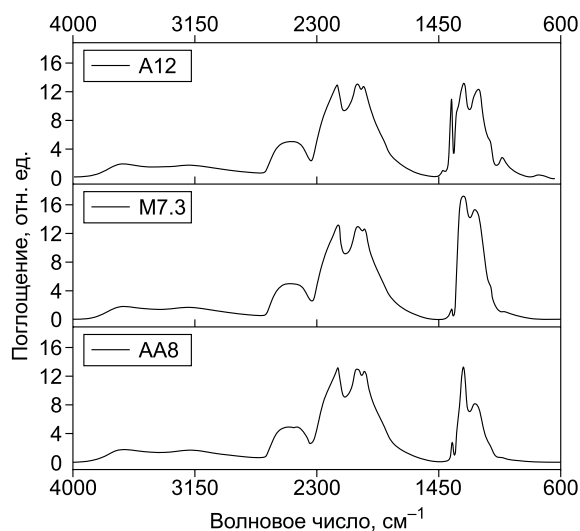


Рис. 2. Характерные ИК-спектры поглощения образцов из трех месторождений: А12 – трубки Юбилейная, М7.3 – трубки Интернациональная, АА8 – россыпного месторождения Молодо

Fig. 2. Characteristic IR absorption spectra of samples from three deposits: A12 – Yubileynaya pipe, M7.3 – Internatsionalnaya pipe, AA8 – Molodo placer deposit

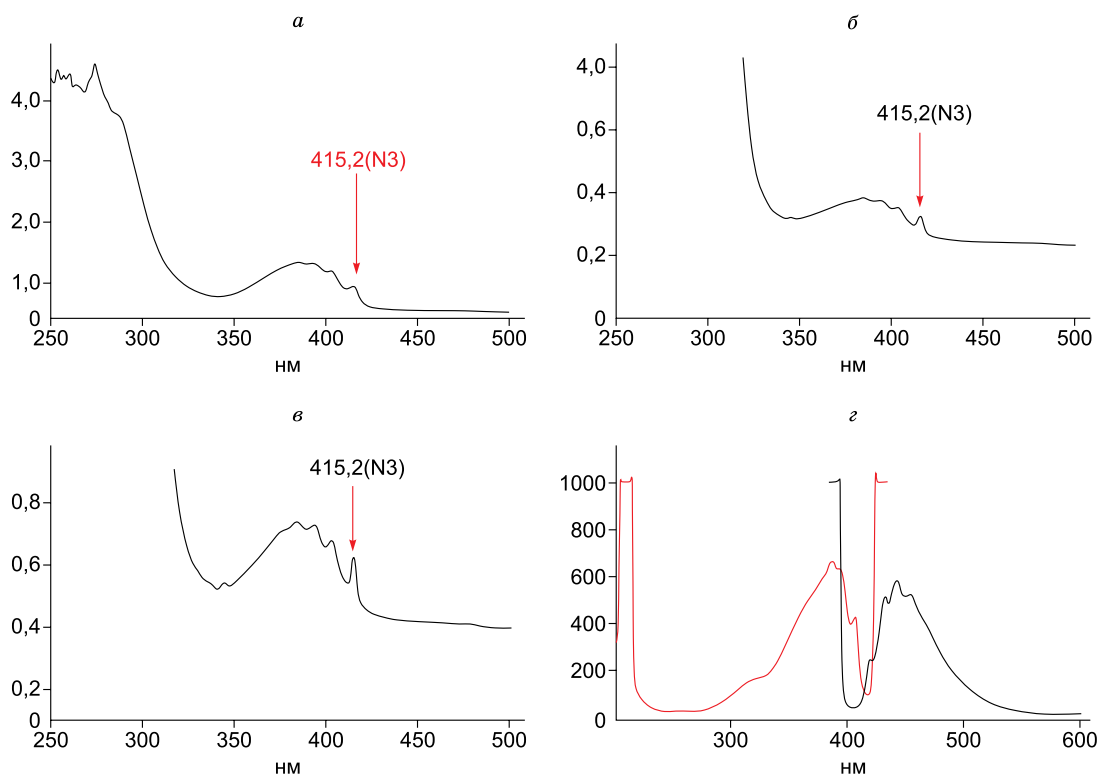


Рис. 3. Спектры оптической плотности кристалла алмаза: а – А10.2; б – М12; в – кристалла алмаза АА12; г – возбуждения (красная) и фотолюминесценции (черная) кристалла алмаза А10.2

Fig. 3. Optical density Spectra of diamond crystal: а – А10.2; б – М12; в – АА12; г – excitation (red) and photoluminescence (black) of diamond crystal А10.2

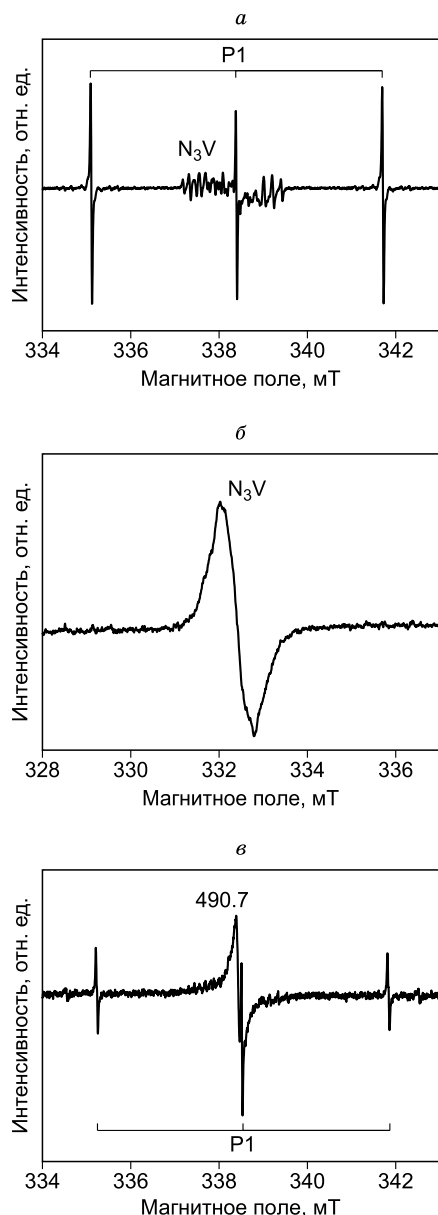


Рис. 4. Спектры ЭПР кристаллов алмаза, записанные при комнатной температуре в X-диапазоне частот: *a* – образец AA12; *б* – A8; *в* – AA15

Fig. 4. EPR spectra of diamond crystals recorded at room temperature in the X-frequency range: *a* – sample AA12; *б* – A8; *в* – AA15

дит удаление большого объема кристалла, что приводит к изменению средней концентрации азотных центров в объеме полученного бриллианта. Кроме того, кристаллы с одинаковым содержанием азотсодержащих дефектов могут находиться в разных месторождениях. Это видно из данных ЭПР по содержанию парамагнитных центров, а также по интенсивности поглощения

собственных дефектов (плейтлетс) в ИК-спектрах для всех исследованных кристаллов. Например, кристаллы из разных источников близки по дефектно-примесному составу. Полученные данные показывают, что по единичным кристаллам невозможно идентифицировать месторождение, из которого был получен конкретный алмаз, из которого изготовлен данный бриллиант.

Корреляционно-регрессионный анализ полученных экспериментальных данных

Методом корреляционного анализа выявлена теснота связи, которая количественно выражается величиной коэффициента корреляции. В нашем случае именно теснота связи описывает наследственность между примесно-дефектным составом образцов исходного алмазного сырья и изготовленных из них бриллиантов. После этого проведен регрессионный анализ полученных данных для каждого вида примесного дефекта, определенного с использованием вышеописанных методов в образцах алмазного сырья и бриллиантах. Величина коэффициента корреляции служит оценкой соответствия уравнения регрессии выявленным причинно-следственным связям.

Данные полученной корреляционной матрицы (табл. 1) показали, что значимая корреляция между концентрациями Н-центра имеется для образцов из россыпи Молодо. Значимая на уровне 0,01 корреляция, равная $r = 0,981$, имеется между содержанием Н в алмазах и бриллиантах из россыпи Молодо. Между концентрациями В2 значимая корреляция во всех исследованных образцах отсутствует.

Для трубки Юбилейная и россыпного месторождения Молодо наблюдается очень высокая корреляция (на уровне 0,01) 490.7-центра, $r = 0,988$ и $r = 1,000$ соответственно. Значимая корреляция между концентрациями N3V в алмазах и изготовленных из них бриллиантах имеется для исследованных образцов всех трех месторождений. Установлена высокая значимая корреляция на уровне 0,01 – для алмазов месторождения трубки Интернациональная ($r = 0,772$) и россыпного месторождения Молодо ($r = 0,642$); на уровне 0,05 – для алмазов из месторождения трубки Юбилейная наблюдается слабая корреляция ($r = 0,455$).

Корреляционная зависимость дефекта N3V, значимая, на уровне $r = 0,01$, существует для образцов из трубки Интернациональная и россыпного месторождения Молодо, высокая – для алмазов трубки Интернациональная ($r = 0,825$)

Таблица 1

Корреляционные зависимости в дефектно-примесном составе исследованных образцов

Table 1

Correlation dependencies in the defect-impurity composition of the studied samples

N3		P1		N3V		H		490,7
Связь	г	Связь	R	Связь	г	Связь	г	Связь
N3aal-N3abr	0,45* Слабая n = 20	P1aal-P1abr	0,792** Высокая n = 10	—	—	—	—	490aEPRal- 490aEPRbr
N3mal-N3mbr	0,642** Средняя n = 20	P1mal-P1mbr	0,776** Высокая n = 10	N3Vmal-N3Vmbr	0,825** Высокая n = 10	—	—	—
N3aaal-N3aabr	0,772** Высокая n = 20	P1aaal-P1aabr	0,730* Высокая n = 10	N3Vaaal-N3Vaabr	0,941** очень высокая n = 10	HaalKal-HaalKbr	0,981** очень высокая n=20	490aaEPRal- 490aaEPRbr

Примечание. n – количество пар алмаз-бриллиант; * – корреляция значима на уровне 0,05; ** – корреляция значима на уровне 0,01.

Note. n is the number of roughpolished diamond pairs; *correlation is significant at the 0.05 level; **correlation is significant at the 0.01 level.

и очень высокая – для алмазов из россыпи Молодо ($r = 0,941$).

Здесь использованы следующие обозначения: a, m, aa – обозначения серий образцов, соответствующих месторождениям; al – алмаз; br – бриллиант.

Далее построены линейные регрессионные модели зависимости концентрации дефектов в бриллиантах от их концентрации в алмазах указанных месторождений. Вычислены коэффициенты регрессии для каждого вида определенного в ходе работы примесного дефекта. В результате анализа нескольких регрессионных моделей выявлено, что наилучшим вариантом регрессии является линейная регрессионная модель без свободного члена, имеющая вид

$$y = b \cdot x, \quad (1)$$

где x – концентрация определяемого в алмазе дефекта; y – концентрация определенного вида дефекта в бриллианте, изготовленном из данного алмаза.

Другие методы не могли быть применены в данной работе с учетом специфики экспериментальных данных. Например, модель множественной регрессии не подходила по двум причинам: во-первых, требовалось учитывать два состояния (x и y) каждого образца – начальное x (алмазное сырье) и конечное y (бриллиант), во-вторых, с каждого месторождения имелось по 20 образцов, что недостаточно для модели множественной регрессии.

В результате корреляционно-регрессионного анализа по формуле (1) вычислены коэффициенты регрессии b для линейных регрессионных уравнений для каждого вида примесного дефекта. Величина коэффициента b показывает среднее изменение результата с изменением фактора на единицу. В данном случае этот параметр показывает, что с увеличением концентрации определенных примесных и структурных дефектов на 1 ppm или 1 усл. ед. доля концентрации дефектов увеличивается в среднем на b процентных пунктов. Вычисленные коэффициенты b приведены в табл. 2.

Поскольку по единичным бриллиантам невозможно определить месторождение, то необходимо вычислить количество бриллиантов в партии для обеспечения заданной точности результатов. Для определения численности бриллиантов в статистически значимой выборке была применена

Таблица 2

Коэффициенты b
в линейных уравнениях регрессии

Table 2

Coefficients b in linear regression equations

Объект	H	B2	N3	P1	490,7	N3V
Юбилейная	1,873	0,962	0,835	0,794	1,400	—
Интернациональная	0,166	0,626	2,548	0,874	—	0,603
Молодо	2,268	1,367	1,961	0,500	0,750	0,902

формула простой случайной выборки для доли единиц, обладающих данным признаком в выборочной совокупности [23]:

$$n = \frac{z^2 p(1-p)}{e^2},$$

где n – объем выборки; z – нормированное отклонение, определяемое исходя из выбранного уровня доверительности; p – найденная вариация для выборки, где в расчет ввели максимальную величину дисперсии, равную 0,25; e – допустимая ошибка.

В результате установлено, что только при условии наличия статистически значимой выборки (не менее 400 бриллиантов, изготовленных из алмазов с одного месторождения) возможно определение их происхождения. Для этого требуется еще одно условие: должны быть известны коэффициенты регрессии b (1), определяющие наследственность типоморфных свойств – примесных дефектов, которые единственные из всех типоморфных свойств сохраняются из алмаза при его обработке в бриллиант. В данной работе коэффициенты регрессии b вычислены для примесных дефектов Н, В2, N3, P1, 490.7, N3V (см. табл. 1), используя которые можно установить происхождение бриллиантов из месторождений трубок Юбилейная, Интернациональная и россыпи Молодо. Очевидно, что эти два условия предполагают наличие представительной базы данных по дефектно-примесному составу алмазов из различных месторождений.

Обсуждение результатов

Типоморфизм минералов является теоретической основой поисковой минералогии, а также имеет огромное значение для прикладной минералогии, поскольку совокупность характерных свойств и признаков дает возможность непосредственно описать условия образования минералов [24].

В работах [25–28] происхождение природных алмазов определяется по сочетанию типоморфных признаков, являющихся свидетелями их генетической общности и, следовательно, происхождения. К ним относятся кристалломорфология, внутренняя морфология, цвет, фотолюминесценция, включения и примеси. К примеру, если алмазы добыты из одной трубки, эти типоморфные признаки дифференцируются в соответствии с жизнью минеральных индивидов, конкретными элементами анатомии минералов,

формирующимися в определенной среде их образования. В указанных работах [25–28] показано, что определение происхождения возможно только при наличии статистически значимой выборки алмазов из определенного месторождения.

Как показало проведенное исследование, ситуация усложняется, если речь идет о бриллиантах. После обработки алмаза в бриллиант кристалломорфология, как один из важнейших типоморфных признаков полностью исчезает. Включения являются ненадежным признаком, поскольку в алмазах различных месторождений могут встречаться идентичные включения. Минеральные включения состоят в основном из различных пропорций четырех минералов: оливина, ортопироксена, клинопироксена и граната, так как существует три основных типа вмещающих пород – перидотит, эклогит и вебстерит, где образуется алмаз [29, 30]. Также следует принимать во внимание тот факт, что специалисты при огранке стараются «выводить» включения, улучшая этим качество бриллианта.

Внутренняя морфология, цвет, фотолюминесценция также становятся незначительными факторами, поскольку в процессе огранки их характеристики нередко изменяются, а кристаллы в процессе обработки на всех производственных этапах, за исключением разметки, подвергаются механической обработке, которая по сути является комбинированной с термическим воздействием. В свою очередь, возникающее температурное воздействие повышает химическую активность углерода, превращая алмаз в графит. В [31] указывается, что на этапе распиливания температура в зоне резания алмаза может достигать 600–700 К, при огранке – 700–900 К.

Регистрация спектров целых кристаллов алмаза имела некоторые ограничения, связанные с тем, что следовало располагать целые кристаллы алмаза и бриллианты определенным образом. Предположительно, это зависит от расположения кристаллографических плоскостей и отражения лучей. При детерминированной ориентации образцов данная проблема устраняется.

Примеси различных элементов, имеющиеся в природных кристаллах алмаза, после его огранки все остаются в бриллианте, хотя температурное воздействие может частично изменить в некоторой степени примесно-дефектный состав. Учитывая, что все этапы обработки алмаза и исследования проводились в одних и тех же условиях, такие изменения будут происходить

во всех кристаллах в одинаковой степени. При этом следует отметить, что концентрации примесей в разных частях алмаза различные и, соответственно, после механической обработки концентрации в дефектно-примесном составе камня изменяются при том же составе. Поэтому для определения места добычи будущих бриллиантов необходимо установить существование связи между концентрациями в исходном кристалле алмаза и в конечном бриллианте, т. е. возможности «наследования» комплекса примесных центров. Факторами «наследования» являются коэффициенты регрессии b , вычисляемые для каждого дефектного центра по формуле (1).

Таким образом, остается единственный фактор, дающий возможность определить месторождение алмазов, из которых изготовлены бриллианты, – это дефектно-примесный состав камня, который можно определить неразрушающим способом комплексом физических методов. В рамках данной работы были определены условия, при которых это возможно сделать на текущем уровне развития науки и техники.

Заключение

Проведен анализ дефектно-примесных центров в алмазах из трех месторождений и изготовленных из них бриллиантов. Установлено, что полученные данные по содержанию дефектно-примесных центров H, B2, N3, P1, 490.7, N3V в исследованных алмазах из трех различных месторождений Якутской алмазоносной провинции соответствуют данным, приведенным в [22, 26, 27].

Впервые показано, что существует корреляция между концентрациями выявленных дефектно-примесных центров в исходном алмазном сырье и изготовленных из него бриллиантах. Используя корреляционно-регрессионный анализ, по измеренным концентрациям дефектно-примесных центров в бриллиантах становится возможным с большой долей вероятности вычислить концентрации набора определенных дефектов в исходном алмазном сырье. Это, в свою очередь, позволяет при соотнесении их с типоморфными признаками (с концентрациями примесных дефектов) алмазов соответствующего месторождения определить источник происхождения алмазов, из которых изготовлены бриллианты.

Поскольку по единичным бриллиантам невозможно определить месторождение, то требуется выполнение двух условий. Во-первых, необходимо наличие достоверной базы данных

по дефектно-примесному составу алмазов по месторождениям. Во-вторых, необходимо наличие представительной партии бриллиантов для обеспечения заданной точности результатов. Результат корреляционно-регрессионного анализа данных показал, что для обеспечения статистической точности измерений требуется не менее 400 бриллиантов из одного месторождения.

Алмазы, добытые из различных месторождений, различаются по типоморфным признакам, что и является причиной выбора объектов исследования для наиболее наглядного представления их различия при определении количества выборки. Возможно предположить, что для выявления статистически значимой выборки для определения происхождения алмазов из разных месторождений одного кимберлитового поля потребуется большее количество бриллиантов.

В ныне действующих промышленных условиях, когда все алмазы из различных месторождений смешиваются, соблюдение указанных выше условий вычисления коэффициентов регрессии b (1), являющихся признаками «наследования» комплекса дефектно-примесного состава в бриллиантах от исходного алмаза, – практически невыполнимая задача.

Список литературы / References

1. Smith E.M., Smit K.V., Shirey S.B. Methods and challenges of establishing the geographic origin of diamonds. *Gems & Gemology*. 2022;58(3):270–288. <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.58.3.270> EDN: YOSSRW
2. Cartier L.E., Ali S.H., Krzemnicki M.S. Blockchain, chain of custody and trace elements: An overview of tracking and traceability opportunities in the gem industry. *Journal of Gemmology*. 2018;36(3):212–227. <http://doi.org/10.15506/JoG.2018.36.3.212>
3. Ученые ФИАИ поняли, как улучшить защиту алмазов от подделки [процитировано 28 мая 2026]. Доступно: <https://scientificrussia.ru/articles/ucenye-fian-opredelili-kak-povrezdautsa-almazы-pri-nanesenii-lazernogo-qr-koda> (дата обращения: 28.05.2026)
4. Lebedev Physical Institute scientists have discovered how to improve diamond protection against counterfeiting. Available at: <https://scientificrussia.ru/articles/ucenye-fian-opredelili-kak-povrezdautsa-almazы-pri-nanesenii-lazernogo-qr-koda> (accessed: 28.05.2026)
5. Krebs M.Y., Pearson D.G., Stachel T., et al. A common parentage-low abundance trace element data of gem diamonds reveals similar fluids to fibrous diamonds. *Lithos*. 2019;324–325:356–370. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2018.11.025>
5. McNeill J.C.R., Pearson D.G., Klein-BenDavid O., et al. Quantitative analysis of trace element concentrations in some gem-quality diamonds. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2009;21(36):364207–364220. <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/21/36/364207> EDN: PAHUFU
6. Melton G.L., McNeill J., Stachel T., et al. Trace elements in gem diamond from Akwatia, Ghana and DeBeers Pool,

- South Africa. *Chemical Geology*. 2012;314-317:1–8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.04.025> EDN: PHBCMR
7. Cartigny P. Stable isotopes and the origin of diamond. *Elements*. 2005;1(2):79–84. <https://doi.org/10.2113/gselements.1.2.79>
8. Simakov S.K. On the origin of large type IIa gem diamonds. *Ore Geology Reviews*. 2018; 102:195–203. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.08.02> EDN: YBITFJ
9. Jablon B.M., Navon O. Most diamonds were created equal. *Earth and Planetary Science Letters*. 2016;443:41–47. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.epsl.2016.03.013> EDN: WRPNV
10. Kaminsky F.V., Voropaev S.A. Modern concepts on diamond genesis. *Geochemistry International*. 2021;59(11):1038–1051. <https://doi.org/10.1134/S0016702921110033>
11. Kudryashov S.I., Levchenko A.O., Danilov P.A., et al. Direct femtosecond-laser writing of optical-range nanoscale metagratings/metacouplers on diamond surfaces. *Appl. Phys. Lett.* 2019;(115):073102. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2019ApPhL.115g3102K/doi:10.1063/1.5114630
12. Карточка проекта фундаментальных и поисковых научных исследований, поддержанного Российским научным фондом. Квантовые технологии лазерного формирования и широкополосной спектральной идентификации оптически-активных комплексов точечных дефектов в природных алмазах для промышленного трейсинга. Российский научный фонд, 2024. Режим доступа: https://grant.rscf.ru/prjcard_int?21-79-30063&ysclid=mnmohqccxs414042238 (дата обращения: 28.05.2026)
- Project card of fundamental and exploratory research supported by the Russian Science Foundation. Quantum technologies for laser formation and broadband spectral identification of optically active point defect complexes in natural diamonds for industrial tracing. Russian Science Foundation, 2024. Available at: https://grant.rscf.ru/prjcard_int?21-7930063&ysclid=mnmohqccxs414042238 (accessed: 28.05.2026)
13. Breeding C.M., Eaton-Magaña S., Shigley J.E. Naturally colored yellow and orange gem diamonds: the nitrogen factor. *Gems & Gemology*. 2020;56(2):194–219. <http://dx.doi.org/10.5741/GEMS.56.2.194> EDN: KECFNN
14. Fedorova E.N., Logvinova A.M., Luk'yanova L.I., Sobolev N.V. Typomorphic characteristics of the Ural diamonds (from FTIR spectroscopy data). *Russian Geology and Geophysics*. 2013;54(12):1458–1470. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.10.013> EDN: SLBEZF
15. Howell D., Griffin W.I., Piazzolo S., et al. A spectroscopic and carbon-isotope study of mixed-habit diamonds: Impurity characteristics and growth environment. *American Mineralogist*. 2013;98:66–77. <https://doi.org/10.2138/am.2013.4179>
16. Zaitsev A.M. Optical properties of diamond: A data handbook. Berlin: Springer Heidelberg; 2001. 502 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04548-0>
17. ГОСТ Р 51519.1-99 «Алмазы природные необработанные. Классификация. Основные признаки». М.: Госстандарт России, 2000. 15 с.
- GOST R 51519.1-99 “Natural rough diamonds. Classification. Main features.” Moscow: Gosstandart of Russia, 2000. 15 p.
18. ГОСТ Р 52913-2008 «Бриллианты. Классификация. Технические требования». М.: Стандартинформ, 2008. 40 с.
- GOST R 52913-2008 “Polished diamonds. Classification. Technical requirements”. Moscow: Standartinform, 2008. 40 p.
19. Патент № 213486 Российская Федерация, МПК G01N 21/03 (2006.01), B01L 9/00 (2006.01). Держатель твердых прозрачных образцов для сканирующего спектрофотометра: 2022117986, заявл. 01.07.2022; опубл. 13.09.2022 / Протопопов Ф.Ф., Алексеев А.А., Федотова М.А.
- Patent No. 213486, Russian Federation, IPC G01N 21/03 (2006.01), B01L 9/00 (2006.01). Holder of solid transparent samples for a scanning spectrophotometer: 2022117986, registered 01.07.2022; published 13.09.2022 / Protopopov F.F., Alekseev A.A., Fedotova M.A.
20. Nadolnny V.A., Yurjeva O.P., Rakhmanova M. I., et al. Features of the defect-impurity composition of diamonds from the northern Istok and Mayat placers (Yakutia) according to EPR, IR, and luminescence data. *Phys. Chem. Minerals*. 2023;50(3). <https://doi.org/10.1007/s00269-022-01227-0>
21. Наследов А.Д. *IBM SPSS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных*. СПб.: Питер; 2013. 413 с.
- Nasledov A. *IBM SPSS Statistics 20 и AMOS: professional statistical data analysis*. Saint Petersburg: Peter Publ.; 2013. 413 p. (In Russ.)
22. Хачатрян Г.К. Азот и водород в алмазах мира как индикаторы их генезиса и критерии прогноза и поисков коренных алмазных месторождений. Дис. ... докт. г.-м. н. М.; 2016. 254 с.
- Hachatryan G.K. Nitrogen and hydrogen in the world's diamonds as indicators of their genesis and criteria for forecasting and searching for primary diamond deposits. Diss. ... Doct. Sci., Moscow. 2016. 254 p. (In Russ.)
23. Ефимова М.Р., Ганченко О.И., Петрова Е.В. *Практикум по общей теории статистики*. М.: Финансы и статистика; 2000. 278 с.
- Efimova M.R., Ganchenko O.I., Petrova E.V. *Practical training in the general theory of statistics*. Moscow: Finansy i Statistika Publ.; 2000. 278 p. (In Russ.)
24. Павлишин В.И. А.Е. Ферсман и учение о типоморфизме минералов. В кн.: *Ферсмановские чтения. Международная научная конференция, посвященная 125-летию со дня рождения академика А.Е. Ферсмана 10–12 ноября 2008 года*. М.: Российское минералогическое общество; 2008. С. 41–43.
- Pavlishin V.I. A.E. Fersman and the doctrine of mineral typomorphism. In: *Fersman Readings. International scientific conference dedicated to the 125th anniversary of the birth of Academician A.E. Fersman, November 10–12, 2008*. Moscow: Russian Mineralogical Society, pp. 41–43. (In Russ.)
25. Солодова Ю.П., Коток А.Д., Кулаков В.М. и др. Типоморфные особенности одной из разновидностей кристаллов алмаза. *Труды минералогического музея им. А.Е. Ферсмана*, 1974;(22):104–112.
- Solodova Yu.P., Kotok A.D., Kulakov V.M., et al. Typomorphic features of one of the varieties of diamond crystals. In: Barsanov G.P. (ed.) *Proceedings of the A.E. Fersman Mineralogical Museum*. 1974;(22):104–112. (In Russ.)
26. Самосоров Г.Г. Типоморфные особенности алмазов из кимберлитовых трубок Комсомольская и Удачная Якутской алмазоносной провинции. Дис. ... канд. г.-м. наук. М.; 2007. 151 с.
- Samosorov G.G. Typomorphic features of diamonds from the kimberlite pipes Komsomolskaya and Udachnaya of the Yakutia diamondiferous province. Diss. ... Cand. Sci. Moscow; 2007. 151 p. (In Russ.)
27. Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. *Типоморфизм алмазов Сибирской платформы*. М.: Недра-Бизнесцентр; 2003. 603 с.
- Zinchuk N.N., Koptil' V.I. *Typomorphism of diamonds of the Siberian platform*. Moscow: Nedra-Business Center; 2003. 603 p. (In Russ.)

28. Гаранин В.К., Криюлина Г.Ю., Гаранин К.В., Самосоров Г.Г. *Архангельские алмазы. Новые данные*. М.: ИП Скорородов; 2018. 232 с.

Garanin V.K., Kriulina G.Yu., Garanin K.V., Samosorov G.G. *Arkhangelsk diamonds. New data*. Moscow: Skorohodov Publ.; 2018. 232 p. (In Russ.)

29. Афанасьев В.П., Лобанов С.С., Похиленко Н.П. и др. Полигенез алмазов Сибирской платформы. *Геология и геофизика*. 2011;52(3):335–353. EDN: NEAZVL

Afanas'ev V.P., Lobanov S.S., Pohilenko N.P., et al. Polygenesis of diamonds in the Siberian platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2011;52(3):335–353. (In Russ.) EDN: OHQBUV

30. Stachel T., Aulbach S., Harris J.W. Mineral inclusions in lithospheric diamonds. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*. 2022;88:307–392. <https://doi.org/10.2138/rmg.2022.88.06> EDN: VAHNUF

31. Теплова Т.Б., Сильченко О.Б., Коньшин А.С. Анализ путей повышения эффективности обработки алмазов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(9): 184–187. EDN MUXETB.

Teplova T.B., Silchenko O.B., Konshin A.S. Analysis of ways to improve the efficiency of diamond processing. *Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten=Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000;(9):184–187. (In Russ.) EDN MUXETB

Об авторах

ФЕДОТОВА Марина Алексеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология обработки драгоценных камней и металлов», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, <https://orcid.org/0000-0003-2226-9791>, SPIN: 6626-4191, e-mail: fedmar_fti@mail.ru

ИВАНОВ Михаил Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры «Технология обработки драгоценных камней и металлов», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, e-mail: mixail.Ivanow@mail.ru

ЛЕОНТЬЕВ Семен Павлович, старший преподаватель кафедры «Математическая экономика и прикладная информатика», Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, <https://orcid.org/0000-0003-1011-4872>, SPIN: 8763-8295, e-mail: spleontiev@mail.ru

ЭВЕРСТОВА Дайаана Григорьевна, аспирант, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, <https://orcid.org/0009-0009-9080-4742>, SPIN: 8414-5050, e-mail: everstova_d@mail.ru

Вклад авторов

Федотова М.А. – руководство исследованием, проведение исследования, верификация данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация; **Иванов М.А.** – разработка концепции, методология, редактирование рукописи, администрирование проекта, получение финансирования; **Леонтьев С.П.** – проведение статистического анализа, администрирование данных; **Эверстова Д.Г.** – проведение исследования, администрирование данных

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

FEDOTOVA, Marina Alekseevna, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Department of “Technology of processing of precious stones and metals”, Ammosov North-Eastern Federal University, <https://orcid.org/0000-0003-2226-9791>, SPIN: 6626-4191, e-mail: fedmar_fti@mail.ru

IVANOV, Mikhail Alekseevich, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Researcher, Department of “Technology of processing of precious stones and metals”, Ammosov North-Eastern Federal University, e-mail: mixail.Ivanow@mail.ru

LEONTYEV, Semyon Pavlovich, Senior Lecturer, Department of Mathematical Economics and Applied Informatics, Ammosov North-Eastern Federal University, <https://orcid.org/0000-0003-1011-4872>, SPIN: 8763-8295, e-mail: spleontiev@mail.ru

EVERSTOVA, Daiaana Grigorievna, Postgraduate Student, Department of “Technology of processing of precious stones and metals”, Ammosov North-Eastern Federal University, <https://orcid.org/0009-0009-9080-4742>, e-mail: everstova_d@mail.ru

Authors' contribution

Fedotova M.A. – supervision, investigation, data verification, writing – original draft, writing – review & editing, visualization; **Ivanov M.A.** – conceptualization, methodology, writing – review & editing, data curation, funding acquisition; **Leontyev S.P.** – formal analysis, data curation; **Everstova D.G.** – investigation, data curation

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 21.10.2025

Поступила после рецензирования / Revised 12.03.2026

Принята к публикации / Accepted 15.04.2026