

Научная статья

УДК 535.37, 628.9.037, 548.4, 544.778.4, 539.2, 620.3, 535.375.54  
doi: 10.17223/29491665/9/4

## Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов

Анна Анатольевна Чеботова<sup>1</sup>, Захар Игоревич Бородулин<sup>2</sup>, Илья Сергеевич Петров<sup>3</sup>,  
Евгения Сергеевна Шеремет<sup>4</sup>, Иван Николаевич Лапин<sup>5</sup>, Евгений Игоревич Липатов<sup>6</sup>,  
Александр Борисович Ворожцов<sup>7</sup>

<sup>1, 2, 5, 6, 7</sup> Томский государственный университет, Томск, Россия

<sup>3, 4</sup> Томский политехнический университет, Томск, Россия

<sup>6</sup> evlip@mail2000.ru

**Аннотация.** В данной работе были исследованы свойства поверхности образцов супензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск. Образцы супензии детонационных наноалмазов были подвергнуты очистке от неалмазной фазы углерода термическим отжигом при температуре 500 °C, что привело к исчезновению в спектрах комбинационного рассеяния полос  $sp^2$ -гибридизированного углерода (графена) на 1 362 и 1 586  $cm^{-1}$ , увеличению полосы  $sp^3$ -гибридизированного углерода (наноалмаза) на 1 320  $cm^{-1}$ , появлению полос  $sp^3$ -гибридизированного аморфного углерода на 1 265 и 1 552  $cm^{-1}$  и полосы кислородосодержащих функциональных групп на 1 065  $cm^{-1}$ . Образцы супензии детонационных наноалмазов были разделены на фракции методами седиментации и центрифугирования. Методом центрифугирования удалось выделить фракции детонационных наноалмазов с размерами до 20 и до 60 нм.

**Ключевые слова:** детонационные наноалмазы, центрифугирование, атомно-силовая микроскопия, комбинационное рассеяние, фотолюминесценция, аллотропы углерода

**Благодарности:** исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет 2030), проект № 2.4.4.23 ИГ « $N_2V^0$ -центры окраски алмаза для квантовой магнитометрии».

**Для цитирования:** Чеботова А.А., Бородулин З.И., Петров И.С., Шеремет Е.С., Лапин И.Н., Липатов Е.И., Ворожцов А.Б. Оптические свойства поверхности детонационных наноалмазов // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2025. № 9. С. 36–43. doi: 10.17223/29491665/9/4

Original article

doi: 10.17223/29491665/9/4

## Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds

Anna A. Chebotova<sup>1</sup>, Zakhar I. Borodulin<sup>2</sup>, Ilya S. Petrov<sup>3</sup>, Evgeniya S. Sheremet<sup>4</sup>,  
Ivan N. Lapin<sup>5</sup>, Evgeniy I. Lipatov<sup>6</sup>, Alexander B. Vorozhtsov<sup>7</sup>

<sup>1, 2, 5, 6, 7</sup> Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

<sup>3, 4</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

<sup>6</sup> evlip@mail2000.ru

**Abstract.** In this work, the surface properties of samples of a detonation nanodiamond suspension produced by JSC Federal Research and Production Center “Altai”, Biysk, Russia, were investigated. The samples of the detonation nanodiamond suspension were purified from the non-diamond carbon phase by thermal annealing at 500 °C, which led to the disappearance of the bands of  $sp^2$ -hybridized carbon (graphene) at 1362 and 1586  $cm^{-1}$ , an increase in the band of  $sp^3$ -hybridized carbon (nanodiamond) at 1320  $cm^{-1}$ , and the appearance of bands of  $sp^3$ -hybridized amorphous carbon at 1265 and 1552  $cm^{-1}$ , as well as a band of oxygen-containing functional groups at 1065  $cm^{-1}$  in the Raman spectra. The samples of the detonation nanodiamond suspension were fractionated by sedimentation and centrifugation. Using centrifugation, it was possible to isolate fractions of detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm and up to 60 nm. It should be noted that detonation nanodiamonds with sizes up to 20 nm have a high potential for use in biomedical technologies as carriers of functional groups and as photoluminescent nanoparticles. At the same time, it is necessary to be able to perform not only fractionation by nanoparticle size, but also fractionation by photoluminescence properties and by the content of specific diamond color centers ( $NV^-$ ,  $N_2V^0$ , etc.), including at the single-particle level. Based on such diamond nanoparticles, elements for photonic integrated circuits, contrast agents for magnetic resonance imaging, probes for atomic force microscopy, single-photon sources, and three-dimensional photonic crystals (diamond opals) are being developed.

**Key words:** detonation nanodiamonds, centrifugation, atomic force microscopy, Raman scattering, photoluminescence, carbon allotropes

**Acknowledgments:** The research was carried out with the support of the Tomsk State University Development Program (Priority 2030), project №2.4.4.23 IG «N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> diamond color centers for quantum magnetometry».

**For citation:** Chebotova, A.A., Borodulin, Z.I., Petrov, I.S., Sheremet, E.S., Lapin, I.N., Lipatov, E.I. & Vorozhtsov, A.B. (2025) Optical properties of the surface of detonation nanodiamonds. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 9. pp. 36–43. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/9/4

## Введение

Детонационные наноалмазы (ДНА) – это продукт взрывного разложения углеродсодержащих взрывчатых веществ в условиях недостатка кислорода. При подрыве смеси тротила и гексогена во взрывной камере в течение 10<sup>-7</sup>–10<sup>-6</sup> с при давлении от 17 до 30 ГПа и температуре свыше 3 000 К происходит синтез ДНА [1]. Чтобы предотвратить окисление и графитизацию алмаза, необходимо охлаждать продукты взрыва. В качестве охлаждающей среды используются вода, инертный газ или продукты предыдущего подрыва. Из образовавшейся шихты механической и химической очистками выделяются наноразмерные углеродные наночастицы – ДНА [2, 3].

Работы по детонационному синтезу наноалмазов ведутся с начала 1960-х гг. в нескольких научных центрах России: РФЯЦ ВНИИТФ им. академика Е.И. Забабахина (г. Снежинск), Филиал ФИЦ ХФ РАН им. Н.Н. Семёнова (г. Черноголовка), ИГиЛ СО РАН им. М.А. Лаврентьева (г. Новосибирск), АО ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск) и др. [4, 5].

ДНА отличаются от природных импактных наноалмазов и наноалмазов, синтезированных при высоких статических давлениях и температурах, своим сложным строением и физико-химическими свойствами. Углеродная часть ДНА представлена алмазным ядром (алмазным кристаллитом), окруженным нарушенной углеродной оболочкой, содержащей наночастицы графита, скрученный слой графена и другие углеродные аллотропы. На поверхности нарушенной углеродной оболочки на нескомпенсированных валентных атомах углерода хемосорбируются функциональные группы, включая различные соли, карбиды, оксиды металлов [6].

Ввиду наноразмеров ДНА в углеродном ядре может существовать единственный люминесцирующий центр окраски. По этой причине центры окраски в ДНА рассматриваются как кандидаты в кубиты для квантовых вычислений и в высокоскоростные источники одиночных фотонов, не подверженных фотодеградации и эффектам мерцания [6, 7].

Центры окраски NV<sup>-</sup> и N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> в ДНА обладают двумя локализованными электронами, расщеплением электронных уровней на спиновые подуровни, синглетными и триплетными системами и, как следствие, интеркомбинационной конверсией. Воздействие ВЧ, СВЧ, электрического или магнитного по-

лей могут изменять интенсивность фотолюминесценции данных центров. Способность NV<sup>-</sup> и N<sub>2</sub>V<sup>0</sup> центров проявлять высокую чувствительность фотолюминесценции используется для создания сверхточных сенсоров магнитного и электрического полей, температуры и других физических величин [8].

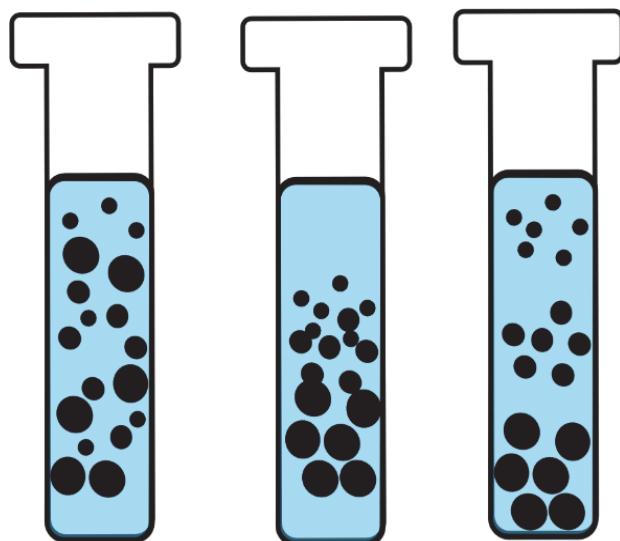
Однако не каждая наночастица ДНА проявляет фотолюминесценцию, что объясняется как химическим составом оболочки, так и дефектностью алмазного ядра. В данной работе мы провели предварительные исследования ДНА производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, на предмет влияния размера наночастиц на их оптические свойства.

## Материалы и методы исследований

**Эксперимент № 1.** Известно свойство водной суспензии ДНА с течением времени коагулировать, т.е. формировать агрегаты и коагуляционные структуры. Необработанная водная суспензия ДНА была помещена в ультразвуковую ванну для равномерного распределения частиц по объему и частичной дефрагментации агрегатов. После ультразвуковой обработки в течение 30 мин из суспензии ДНА было отобрано 5 мл раствора. Отобранный объем был смешан с 1 л дистиллированной ионизированной воды в колбе.

Далее методом седиментации было произведено разделение разбавленной суспензии на 5 фракций – от самой крупной (фракция 1) до самой мелкой (фракция 5). Для этого разбавленная суспензия отстаивалась в течение 15 мин в отсутствие перемешивания и заметных вибраций. Предполагается, что в течение этого времени самые крупные ДНА и их агрегаты под действием гравитации опускались на дно колбы быстрее, чем ДНА меньшего размера. По истечении 15 мин производился отбор 5 мл суспензии со дна колбы, которые смешивались с 1 л дистиллированной воды. Затем процедура повторялась; таким образом были получены 5 фракций водяной суспензии ДНА (рис. 1).

Полученные фракции были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в закрытом помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата. Полученные конгломераты были исследованы на конфокальном флуоресцентном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO (Carl Zeiss Group, Германия).



**Рис. 1.** Процесс седиментации – разделение водяной суспензии по размеру наночастиц ДНК под действием гравитации

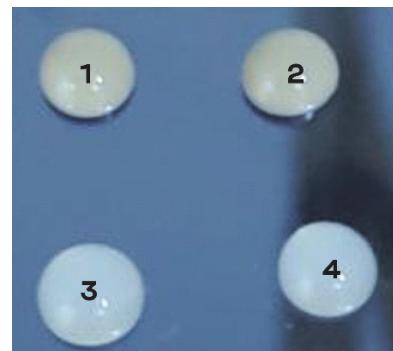
**Fig. 1.** The sedimentation process – the separation of a water suspension by the size of detonation nanodiamonds under the action of gravity

**Эксперимент № 2.** Четыре образца суспензии ДНК массой по 2 г каждый были помещены в чашки Петри и подвергнуты сушке на открытом воздухе в помещении для испарения воды и образования сухого конгломерата.

Образцы 1 и 2 использовались как контрольные и не подвергались очистке. Образцы 3 и 4 были подвергнуты очистке нагревом до 500 °C в воздушной среде в течение 4 ч в муфельной печи SX-2-12D (Shanghai Shiyan Electric Furnace Co., Ltd., Китай). Полученные сухие конгломераты были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния при возбуждении непрерывным лазерным излучением на 457 нм (см. рис. 5–7).

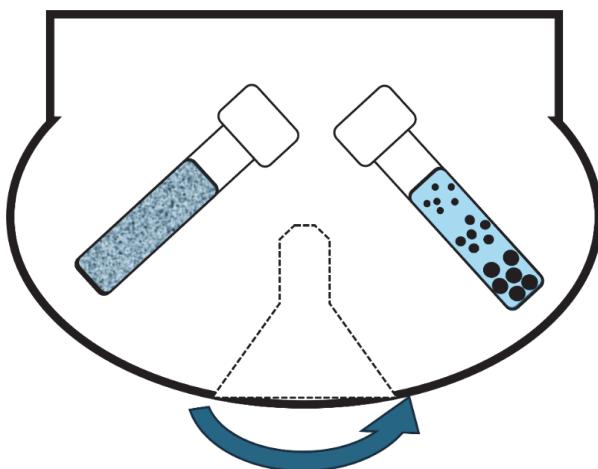
Затем все образцы были растворены в смеси этилового спирта-ректификата массой 200 г и поливенилпиралидона массой  $3 \times 10^{-3}$  г, и в виде капель суспензии помещены на оптическое стекло (рис. 2).

Далее образцы были помещены в центрифугу LC-8C (JoanLab, Китай), где в течение 30 мин при 3 000 об./мин производилось разделение суспензии на фракции (рис. 3). В центрифуге под действием центробежной силы суспензия, содержащая наночастицы ДНК и их агрегаты различной формы, разделилась на фракции. С разной глубины пробирки собирались фракции образца с различными размерами наночастиц.



**Рис. 2.** Фотография образцов ДНК, растворенных в смеси этилового спирта и поливенилпиралидона в пропорции 666667:1, на оптическом стекле: 1 – образец, не подвергнутый термической очистке, 2 – контрольный образец, не подвергнутый термической очистке, 3 – образец подвергнутый термической очистке, 4 – контрольный образец, подвергнутый термической очистке

**Fig. 2.** Photo of samples of detonation nanodiamonds dissolved in a mixture of ethyl alcohol and polyvenylpiralidone in a ratio of 666667:1 on optical glass. 1 is a sample that has not been thermally cleaned, 2 is a control sample that has not been thermally cleaned, 3 is a sample that has been thermally cleaned, 4 is a control sample that has been thermally cleaned



**Рис. 3.** Схема центрифугирования суспензии ДНК в смеси этилового спирта и поливенилпиралидона

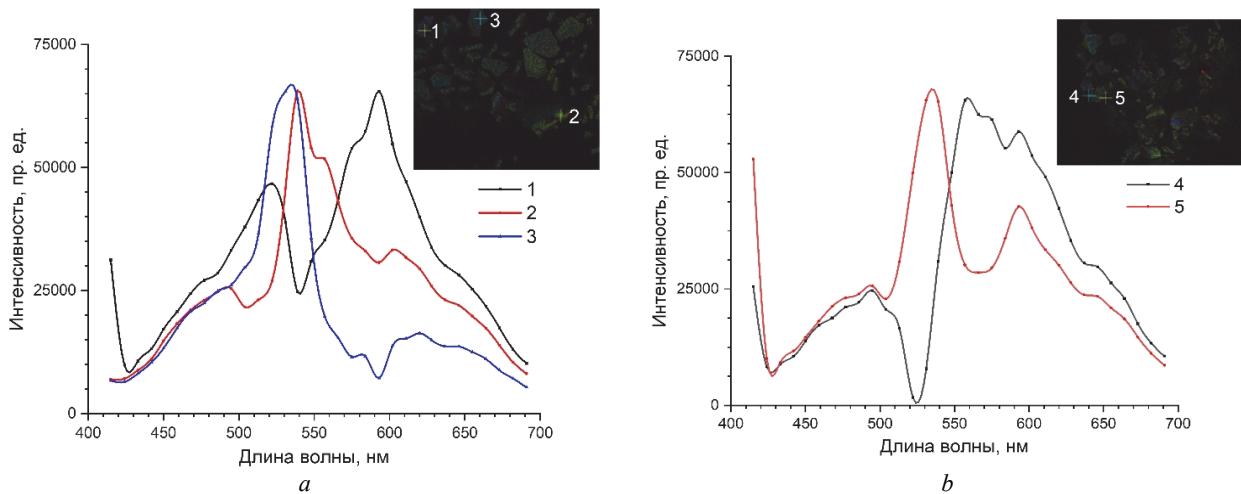
**Fig. 3.** Scheme of centrifugation of bottom suspension in a mixture of ethyl alcohol and polyvenylpiralidone

После центрифугирования были отобраны 2 образца – с наибольшими и наименьшими фракциями ДНК. Образцы были помещены на высокоориентированный лабораторно-произведенный графит и исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (ACM) Ntegra (NT-MDT, Россия). ACM исследование поверхности образцов позволило оценить максимальный размер ДНК в каждой из двух фракций.

## Результаты

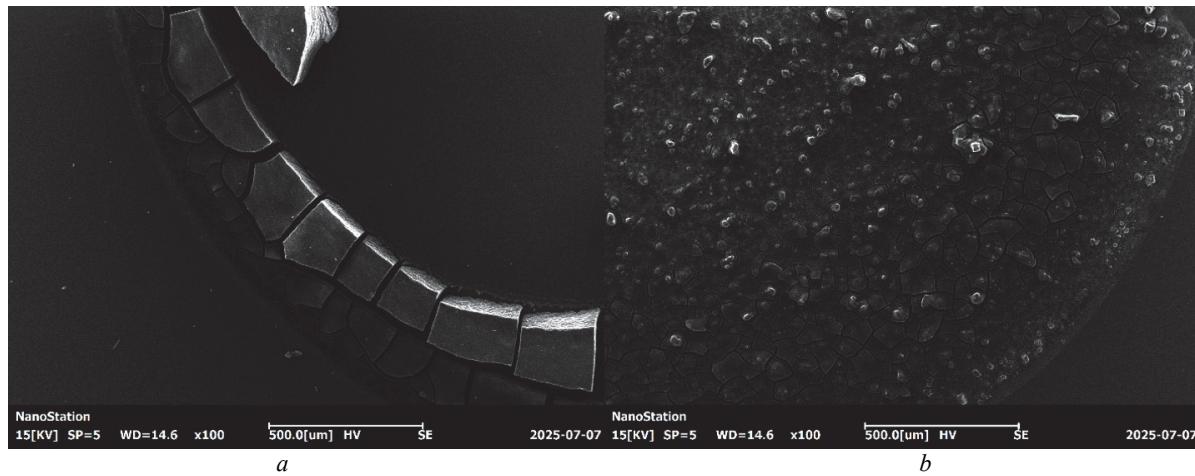
**Эксперимент № 1.** На конфокальном микроскопе ZEISS LSM 780 NLO были получены спектры фотолюминесценции сухих фракций ДНК 1 и 5 (рис. 4, a и b, соответственно). На вставках приведены фотографии исследуемых образцов и крестами отмечены точки измерения спектров фотолюминесценции. Очевидно, что принципиальных отличий в образцах не

наблюдаются как на фотографиях, так и в спектрах фотолюминесценции. Полученные спектры фотолюминесценции содержат различные полосы, которые затруднительно идентифицировать при данном спектральном разрешении. В любом случае остаётся непонятным, является наблюдавшаяся фотолюминесценция свечением алмазного ядра либо данное свечение есть проявление нарушенной углеродной оболочки или хемосорбированных функциональных групп.



**Рис. 4.** Спектры фотолюминесценции 1-й фракции (a) и 5-й фракции (b) ДНК под воздействием лазерного излучения 405 нм. На вставках приведены фотографии с отмеченными участками, в которых измерены спектры фотолюминесценции

**Fig. 4.** Photoluminescence spectra of fraction 1 (a) and fraction 5 (b) of detonation nanodiamonds under the action of 405 nm laser radiation. The inserts show photographs with marked areas in which photoluminescence spectra are measured



**Рис. 5.** СЭМ изображения образцов ДНК: a – до очистки (образец 1) и b – после очистки (образец 3)

**Fig. 5.** SEM images of samples of detonation nanodiamonds a) before cleaning (sample 1) and b) after cleaning (sample 3)

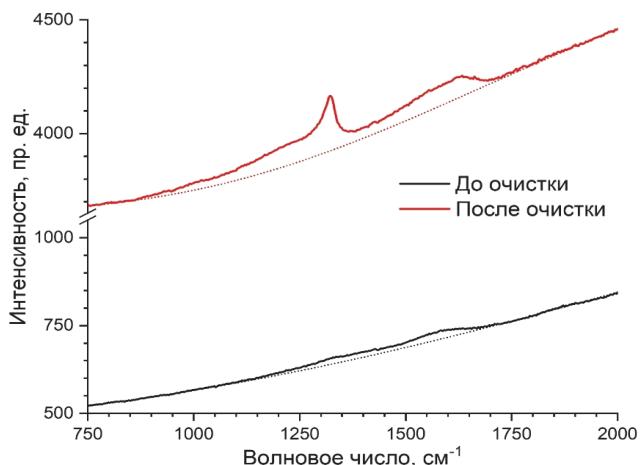
**Эксперимент № 2.** На рис. 5 приведены СЭМ изображения, полученные на сканирующем электронном микроскопе Сохем EM-30+ (Сохем, Южная Корея), образцов ДНК до и после очистки, т.е. образца 1 (рис. 4, a) и образца 3, при увеличении 100x и ускоряющем напряжении 10 кВ (рис. 4, b).

Как следует из рис. 5, отжиг образцов суспензии ДНК привёл к дроблению агрегатов и коагуляционных структур.

На рис. 6 приведены спектры комбинационного рассеяния образцов ДНК до очистки и после очистки (образцы 1 и 3, соответственно), полученные на КР-спектрометре Ntegra (NT-MDT SI, Россия). Очистка

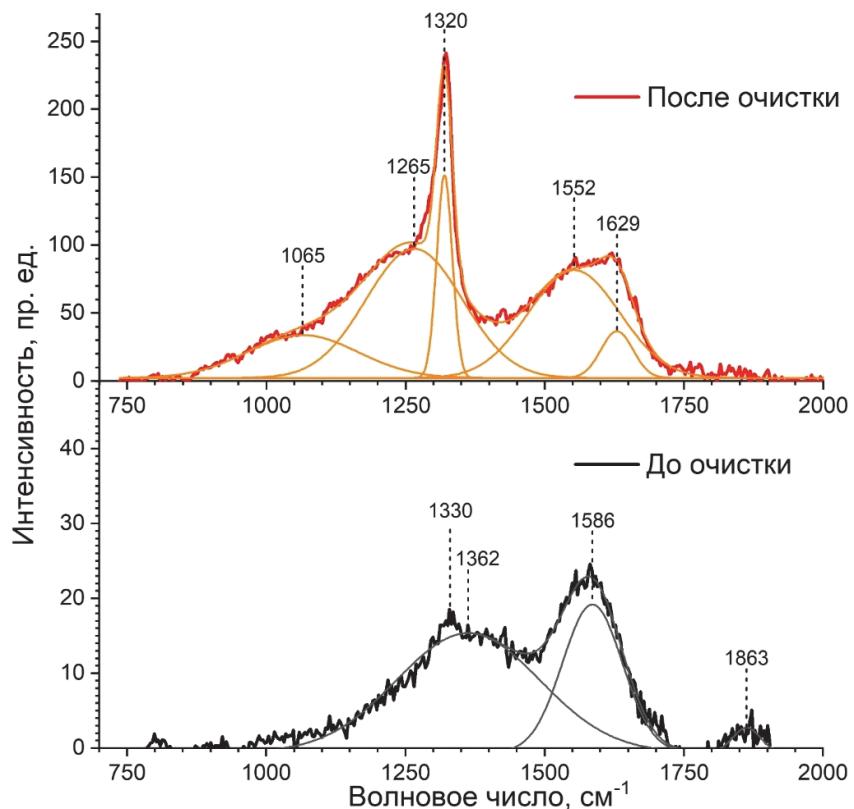
образцов отжигом привела к многократному увеличению уровня сигнала в спектре комбинационного рассеяния, что говорит об усилении вклада фотолюминесценции в КР-сигнал. При этом наблюдалось усиление собственно полос комбинационного рассеяния.

Вычитание фона фотолюминесценции (рис. 7) позволило провести первичный анализ наблюдавшихся полос комбинационного рассеяния образцов ДНД до и после очистки. Положение и ширина на полуысоте полос комбинационного рассеяния (см. рис. 7) приведены в таблице.



**Рис. 6.** Спектры комбинационного рассеяния ДНД до и после очистки (образец 1, нижний спектр. и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм

**Fig. 6.** Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and after purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm

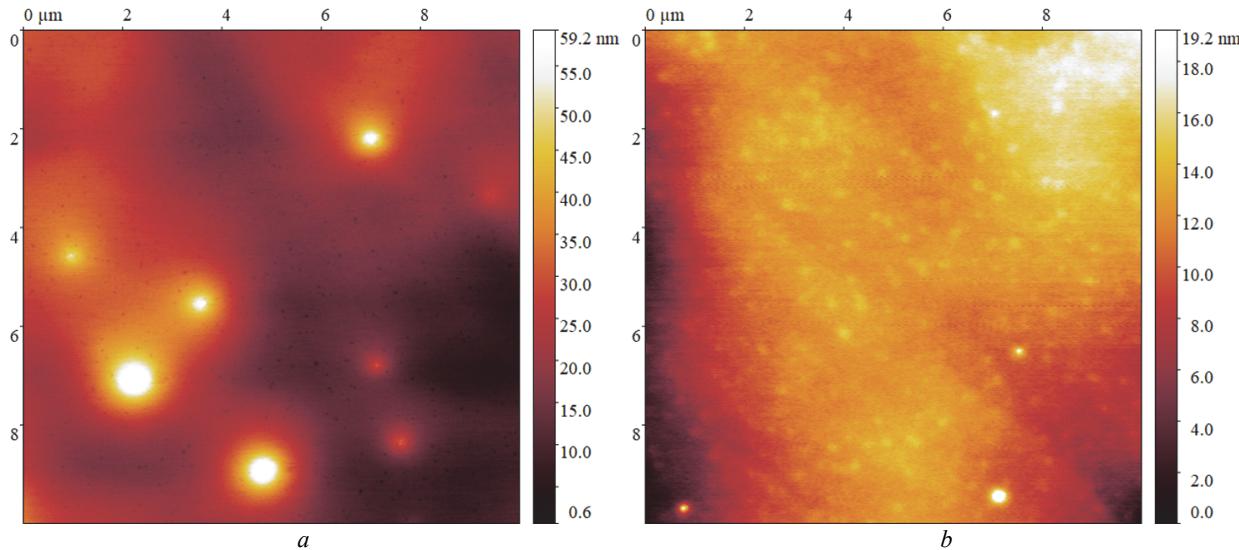


**Рис. 7.** Спектры комбинационного рассеяния образцов ДНД до и после очистки (образец 1, нижний спектр, и образец 3, верхний спектр) при возбуждении непрерывным лазером на длине волны 457 нм после вычитания фона фотолюминесценции

**Fig. 7.** Raman spectra of samples of detonation nanodiamonds before and purification (sample 1, lower spectrum and sample 3, upper spectrum) when excited by a continuous laser at a wavelength of 457 nm after subtracting the photoluminescence background

**Положение в спектре и ширина на полувысоте полос комбинационного рассеяния образцов ДНК до и после очистки (образцы 1 и 3 соответственно)**

| Номер полосы | До очистки (образец 1)     |  | После очистки (образец 3)  |  |
|--------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
|              | КР-сдвиг, $\text{см}^{-1}$ | Ширина на полувысоте, $\text{см}^{-1}$ | КР-сдвиг, $\text{см}^{-1}$ | Ширина на полувысоте, $\text{см}^{-1}$ |
| 1            | 1 330                      | 33,3                                   | 1 065                      | 199,1                                  |
| 2            | 1 362                      | 257,6                                  | 1 265                      | 173,8                                  |
| 3            | 1 586                      | 107,6                                  | 1 320                      | 28,1                                   |
| 4            | 1 863                      | 49,0                                   | 1 552                      | 163,9                                  |
| 5            | —                          | —                                      | 1 629                      | 57,7                                   |



**Рис. 8.** ACM-изображения образца ДНК после очистки отжигом (образец 3) и центрифугирования на 6 фракций: *a* – фракция 1 с наибольшим размером ДНК; *b* – фракция 6 с наименьшим размером ДНК

**Fig. 8.** AFM images of sample of detonation nanodiamonds after annealing purification (sample 3) and centrifugation into 6 fractions: *a*) the fraction 1 with the largest size of detonation nanodiamonds; *b*) the fraction 6 with the smallest size of detonation nanodiamonds

Анализ положений и полуширины полос комбинационного рассеяния позволяет предположить, что до очистки поверхность ДНК покрыта  $\text{sp}^2$ -гибридизированным углеродом, ввиду этого полоса алмазного ядра на  $1\ 330\ \text{см}^{-1}$  ослаблена и уширена. В КР-спектре доминируют D- и G-полосы графита на  $1\ 362$  и  $1\ 586\ \text{см}^{-1}$ , соответственно. Возможно, низкоинтенсивная полоса с максимумом  $1\ 863\ \text{см}^{-1}$  связана с аморфными углеродными слоями [9–10].

Очистка отжигом приводит к сужению на полувысоте и смещению полосы  $\text{sp}^3$ -гибридизированного углерода (наноалмаза) в область меньших волновых чисел – на  $1\ 320\ \text{см}^{-1}$ . По-видимому, окисление поверхности ДНК привело к удалению графита, поэтому в КР-спектрах начала доминировать алмазная полоса с характерным смещением в область меньших волновых чисел, что наблюдалось и ранее для наноалмазов [11], а также проявились полосы  $\text{sp}^3$ -гибридизированного аморфного углерода на  $1\ 265$  и  $1\ 552\ \text{см}^{-1}$ , в то время как D- и G-полосы графита в КР-спектре не наблюдались. Окисление поверхности ДНК привело

к появлению в КР-спектре полосы  $1\ 065\ \text{см}^{-1}$ , отсутствующий до очистки. Данную полосу связывают с кислородосодержащими группами [11–13].

На рис. 8 приведены ACM изображения, полученные после центрифугирования образца 3 и разделения его на фракции от 1 до 6 (1-я фракция – наибольший размер ДНК, 6-я фракция – наименьший размер ДНК). ACM изображения получены с помощью атомного силового микроскопа Ntegra при размещении и сушке капель фракций 1 и 6 образца 3 на поверхности высокоориентированного графита созданного в Школе химических и биомедицинских технологий TERS-team.

Атомная силовая микроскопия позволила оценить максимальный размер ДНК во фракциях с наибольшим и наименьшим размером наночастиц в образце 3. Для фракции 1 с наибольшим размером наночастиц максимальный размер ДНК составил до 60 нм, в то время как для фракции 6 с наименьшим размером наночастиц максимальный размер ДНК составил до 20 нм.

В дальнейшем мы предполагаем провести исследование статистического распределения размеров отожжённых наночастиц, разделяемых на фракции с помощью центрифугирования, и установить связь среднего размера ДНК с составом их поверхности и спектрами их фотолюминесценции.

### Заключение

В данной работе были исследованы образцы суспензии детонационных наноалмазов производства АО ФНПЦ «Алтай», г. Бийск, разделенные на фракции методами седиментации и центрифугирования, в том числе очищенные от неалмазной фазы методом термического отжига. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии наблюдалось дефрагментация и дробление агрегатов ДНК и коагуляционных структур после термической обработки при 500 °С. С помощью метода атомно-силовой микроскопии наблюдалось разделение центрифугированием отожженного образца ДНК на фракции с размерами наночастиц до 20 и до 60 нм. С помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния наблюдалось удаление и окисление

нарушенной углеродной оболочки ДНК в процессе отжига. При этом КР полосы  $sp^2$ -гибридизированного углерода (1 362 и 1 586  $cm^{-1}$ ) исчезали из спектра, но усиливались и смещались в сторону меньших волновых чисел полоса  $sp^3$ -гибридизированного алмазного ядра (с 1 330 до 1 320  $cm^{-1}$ ), а также проявлялись полосы  $sp^3$ -гибридизированного аморфного углерода (1 265 и 1 552  $cm^{-1}$ ) и полоса кислородосодержащих функциональных групп (1 065  $cm^{-1}$ ).

Отметим, что ДНК с размерами до 20 нм имеют высокий потенциал для применения в биомедицинских технологиях как средства доставки функциональных групп и фотолюминесцирующих объектов. В то же время необходимо иметь возможность производить разделение на фракции ДНК не только по размеру наночастиц, но и по способности фотолюминесцировать, а также по содержанию конкретных центров окраски алмаза ( $NV^-$ ,  $N_2V^0$  и др.), в том числе в единичном количестве. На основе подобных алмазных наночастиц разрабатываются элементы для фотонных интегральных схем, контрасты для магнитно-резонансной томографии, зонды для атомно-силовой микроскопии, однофотонные источники и трехмерные фотонные кристаллы (алмазные опалы).

### Список источников

1. Кулакова И.И., Лисичкин Г.В., Яковлев Р.Ю. Химическое модифицирование поверхности детонационного наноалмаза. М. : Техносфера, 2020.
2. Decarly P.S., Jamison T.S. Detonation nanodiamonds // Science. 1961. Vol. 133 (3466). P. 1821–1823.
3. Ставер А.М., Лямин А.И. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывчатых веществ // Ультрадисперсные алмазы: получение и свойства. Красноярск, 1990. 188 с.
4. Долматов В.Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. СПб. : Профессионал, 2011. 536 с.
5. Даниленко В.В. Из истории открытия синтеза наноалмазов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, № 4. С. 581–584.
6. Кулакова И.И. Химия поверхности наноалмаза // Физика твердого тела. 2004. Т. 46, № 4. С. 621–628.
7. Хмельницкий Р.А., Талипов Н.Х., Чучева Г.В. Синтетический алмаз для электроники и оптики. М. : ИКАР, 2017.
8. Чашин В.В., Лыга О.И., Шулепов М.А. Магниточувствительность фотолюминесценции  $N2V^0$ -центров в алмазе при различных температурах // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2024. № 8. С. 22–27. doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux M., Chang L.-Y. Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond // Diamond and Related Materials. Vol. 87. P. 248–260.
10. Штехлин С., Мерму М. Влияние размера на химию поверхности и спектры комбинационного рассеяния наноалмазов размером менее 5 нм, окисленных под высоким давлением, при высокой температуре и детонации // Журнал физической химии. 2020. С. 125.
11. Korepanov V.I., Hiro-o Hamaguchi, Eiji Osawa, Ermolenkov V., Lednev I.K., Etzold B.J.M., Levinson O., Zousman B. и др. Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy // Carbon. 2017. Vol. 121. P. 322–329.
12. Knapinska A.M., Tokmina-Roszyk D., Amar S., Tokmina-Roszyk M., Mochalin V.N., Gogotsi Yu., Cosme P., Terentis A.C., Fields G.B. // Biopolymers. 2015. Vol. 104(3). P. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev A.M. Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg, 2001. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

### References

1. Kulakova, I.I., Lisichkin, G.V. & Yakovlev, R.Y. (2020) *Himicheskoe modificirovaniye poverhnosty nanoalmaza* [Chemical modification of the detonation nanodiamond surface]. M: Tehnosfera (in Russian)
2. Decarly, P.S. & Jamison, T.S. (1961) Detonation nanodiamonds *Science*. 133 (3466). p. 1821–1823.
3. Staver, A.M. & Lyamkin, A.I. (1990) *Poluchenie ultradispersnyh almazov iz vzryvchatykh veshestv* [Production of ultrafine diamonds from explosives]. Ultrafine diamonds: production and properties KR: p. 188 (in Russian)
4. Dolmatov, V.Y. (2011) *Detonatsionnye nanoalmazy. Poluchenie, svoystva, primenenie* [Detonation nanodiamonds. Getting, properties, and application]. SPB: NPO PROFESIONAL p. 536 (in Russian)
5. Danilenko, V.V. (2004) *Is istorii otkritiya sintesa nanoalmazov* [From the history of the discovery of nanodiamond synthesis]. Fisica tverdogo tela. pp. 581–584 (in Russian)
6. Kulakova, I.I. (2004) *Himiya poverhnosty nanoalmaza* [Chemistry of the nanodiamond surface]. Fisica tverdogo tela. pp. 621–628. (in Russian)

7. Khmelnitsky, R.A., Talipov, N.H. & Chucheva, G.V. (2017) *Sinteticheskiy almaz dlya elektroniki i optiki* [Synthetic diamond for electronics and optics] M: IKAR (in Russian)
8. Chashchin, V.V., Lyga, O.I. & Shulepov, M.A. (2024) Magnetosensitivity of N2V0-photoluminescence centers in diamond at different temperatures. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 8. pp. 2227. (In Russian). doi: 10.17223/29491665/8/3
9. Mermoux, M. & Chang L.-Y. (2020) Raman spectroscopy study of detonation nanodiamond. *Diamond and Related Materials*. 87. pp. 248–260.
10. Shtechlin, S. & Mermu, M. (2020) Effect of size on surface chemistry and RAMAN spectra of nanodiamonds smaller than 5 nm oxidized under high pressure, at high temperature and detonation *Jurnal fizicheskoy himii*. p. 125.
11. Korepanov, V.I. Hiro-o, Hamaguchi, Eiji, Osawa, Ermolenkov, V., Lednev, I.K., Etzold, B.J.M., Levinson, O., Zousman, B. et al. (2017) Carbon structure in nanodiamonds elucidated from Raman spectroscopy. *Carbon*. 121. pp. 322–329.
12. Knapinska, A.M., Tokmina-Roszyk, D., Amar, S., Tokmina-Roszyk, M., Mochalin, V.N., Gogotsi, Yu., Cosme, P., Terentis, A.C. & Fields, G.B. (2015) *Biopolymers*. 104 (3). pp. 186–195. doi:10.1002/bip.22636
13. Zaitsev, A.M. (2001) Optical Properties of Diamond, Data Handbook. B: Springer Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-662-04548-0Z

**Информация об авторах:**

**Чеботова Анна Анатольевна** – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия)

**Бородулин Захар Игоревич** – студент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

**Петров Илья Сергеевич** – инженер-исследователь исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 5485-9132, 1248594

**Шеремет Евгения Сергеевна** – доктор философии, профессор исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Томского политехнического университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4712-8877, 551328

**Лапин Иван Николаевич** – заведующий испытательной лабораторией технических систем и средств досмотра Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 9760-7400, 136651

**Липатов Евгений Игоревич** – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовых информационных технологий, доцент кафедры квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: evlip@mail2000.ru. ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-код: 8550-5968

**Ворожцов Александр Борисович** – доктор физико-математических наук, профессор, директор центра управления научно-технологическими и инновационными проектами Томского государственного университета (Томск, Россия). SPIN-код: 4764-7869, 44794

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

**Information about the authors:**

**Anna A. Chebotova**, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation)

**Zakhar I. Borodulin**, student at the Department of Quantum Electronics and Photonics, Faculty of Radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zahar.borodulin12@gmail.com

**Ilya S. Petrov**, research engineer at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 5485-9132, 1248594

**Evgeniya S. Sheremet**, Philosophy Doctor, Professor at the Research School of Chemical and Biomedical Technologies, Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4712-8877, 551328

**Ivan N. Lapin**, Head of the Testing Laboratory of Technical Systems and Inspection Facilities, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 9760-7400, 136651

**Evgeny I. Lipatov**, Cand.Sc. (Physics and Mathematics), Head of the laboratory of quantum information technologies, associate professor of the department of quantum electronics and photonics, faculty of radiophysics, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evlip@mail2000.ru, ORCID ID: 0000-0002-9665-9373, SPIN-code: 8550-5968

**Alexander B. Vorozhtsov**, Doctor.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Center for Management of Scientific, Technological and Innovative Projects, Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). SPIN-code: 4764-7869, 44794

*The authors declare no conflicts of interests.*

*Статья поступила в редакцию 07.11.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 04.12.2025*

*The article was submitted 07.11.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 04.12.2025*