



© CC BY Коллектив авторов, 2026  
УДК [661.8.044.3 + 621.762]-004.57  
<https://doi.org/10.24884/1607-4181-2026-33-1-126-132>

О. С. Шемчук<sup>1,3</sup>, В. Э. Булаков<sup>1,3</sup>, О. В. Миколайчук<sup>2</sup>, О. Е. Молчанов<sup>2</sup>,  
Д. Н. Майстренко<sup>2</sup>, К. Н. Семенов<sup>1,3</sup>, В. В. Шаройко<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup> Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова  
197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8

<sup>2</sup> Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова  
197758, Россия, Санкт-Петербург, поселок Песочный, ул. Ленинградская, д. 70

<sup>3</sup> Институт экспериментальной медицины  
197022, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 12

## СИНТЕЗ И ХАРАКТЕРИСТИКА БИОСОВМЕСТИМОЙ АЗИД-СОДЕРЖАЩЕЙ ПЛАТФОРМЫ НА ОСНОВЕ НАНОАЛМАЗОВ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИИ С ПОМОЩЬЮ КЛИК-ХИМИИ

Поступила в редакцию 27.12.2025 г.; принята к печати 04.03.2026 г.

### Резюме

**Введение.** В работе представлена стратегия создания модульной наноплатформы для таргетной терапии на основе химически модифицированных нанодIAMONDS. Рассматривается подход, позволяющий конструировать биосовместимые носители с возможностью селективной доставки терапевтических агентов.

**Цель.** Синтез и изучение модифицированного нанодIAMONDA ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>, содержащего реакционноспособную азидную группу (–N<sub>3</sub>), для последующего использования в качестве основы таргетной терапии.

**Методы и материалы.** Для ковалентного присоединения лиганда использовали реакцию этерификации Штеглица. Успешная функционализация поверхности подтверждена методами ЯМР СР/MAS, ИК-Фурье спектроскопии и РФЭС. Цитотоксичность индивидуальных нанодIAMONDS и ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> исследована на клеточной линии НЕК293.

**Результаты.** Наличие азидной группы обеспечивает возможность последующего селективного конъюгирования с лигандами-мишенями через реакцию азид-алкинового циклоприсоединения. Полученные данные подтверждают успешную химическую модификацию поверхности нанодIAMONDS.

**Заключение.** Результаты работы подтверждают, что ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> является перспективной и биосовместимой основой для разработки биомедицинских материалов, обладающей необходимым функциональным потенциалом для создания систем таргетной терапии.

**Ключевые слова:** нанодIAMONDS детонационного синтеза, конъюгат, цитотоксичность, клик-химия

**Для цитирования:** Шемчук О. С., Булаков В. Э., Миколайчук О. В., Молчанов О. Е., Майстренко Д. Н., Семенов К. Н., Шаройко В. В. Синтез и характеристика биосовместимой азид-содержащей платформы на основе нанодIAMONDS для функционализации с помощью клик-химии. *Ученые записки ПСПБГМУ им. акад. И. П. Павлова*. 2026; 33(1):126 – 132. <https://doi.org/10.24884/1607-4181-2026-33-1-126-132>.

\* Автор для связи: Владимир Владимирович Шаройко, ФГБОУ ВО ПСПБГМУ им. акад. И. П. Павлова Минздрава России, 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, д. 6-8. E-mail: [sharoyko@gmail.com](mailto:sharoyko@gmail.com).

Olga S. Shemchuk<sup>1,3</sup>, V. E. Bulakov<sup>1,3</sup>, Olga V. Mikolaichuk<sup>2</sup>, Oleg E. Molchanov<sup>2</sup>,  
Dmitrii N. Maistrenko<sup>2</sup>, Konstantin N. Semenov<sup>1,3</sup>, Vladimir V. Sharoyko<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup> Pavlov University  
6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, Russia, 197022

<sup>2</sup> Russian Scientific Center Radiology and Surgical Technologies named after Academician A. M. Granov  
70, Leningradskaya str., Pesochny settlement, Saint Petersburg, Russia, 197758

<sup>3</sup> Institute of Experimental Medicine  
12, Akademika Pavlova str., Saint Petersburg, Russian Federation, 197022

## SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF A BIOCOMPATIBLE AZIDE-CONTAINING PLATFORM BASED ON NANODIAMONDS FOR CLICK CHEMISTRY FUNCTIONALIZATION

Received 27.12.2025; accepted 04.03.2026

### Summary

**Introduction.** This work presents a strategy for creating a modular nanoplatform for targeted therapy based on chemically modified nanodiamonds.

**The objective** was to synthesize and investigate a modified nanodiamond, ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>, containing a reactive azide group (–N<sub>3</sub>) for subsequent use as the basis of targeted therapy.

**Methods and materials.** The Steglich esterification was used for the covalent attachment of the ligand. Successful surface functionalization was confirmed by CP/MAS NMR, Fourier-transform infrared spectroscopy, and XPS. Furthermore, the cytotoxicity of both plain nanodiamonds and ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> was investigated using the HEK293 cell line.

**Results.** The presence of the azide group enables the subsequent selective conjugation with target ligands via the azide-alkyne cycloaddition reaction. The data obtained confirm the successful chemical modification of the surface of nanodiamonds.

**Conclusion.** The results confirm that ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> is a promising and biocompatible foundation for the development of biomedical materials with the necessary functional potential to create targeted therapy systems.

**Keywords:** detonation-synthesis nanodiamonds, conjugate, cytotoxicity, click chemistry

**For citation:** Shemchuk O. S., Bulakov V. E., Mikolaichuk O. V., Molchanov O. E., Maistrenko D. N., Semenov K. N., Sharoyko V. V. Synthesis and characterization of a biocompatible azide-containing platform based on nanodiamonds for click chemistry functionalization. *The Scientific Notes of Pavlov University*. 2026;33(1):126–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.24884/1607-4181-2026-33-1-126-132>.

\* **Corresponding author:** Vladimir V. Sharoyko, Pavlov University, 6-8, L'va Tolstogo str., Saint Petersburg, Russia, 197022. E-mail: sharoyko@gmail.com.

## ВВЕДЕНИЕ

Наноалмаз — это аллотропная модификация углерода, состоящая из атомов углерода, находящихся в sp<sup>3</sup>-гибридном состоянии. В их основе лежит алмазный кор (ядро) [1], поверхность которого содержит эпоксидные, карбоксильные, гидроксильные группы [2]. В зависимости от методов синтеза существует два основных класса наноалмазов для биомедицинских приложений: детонационные наноалмазы и высокотемпературные наноалмазы высокого давления. Метод высокого давления обычно используется для введения азотно-вакансионных (NV<sup>−</sup>) центров в частицы наноалмазов [3]. В основе лежит преобразование углеродосодержащих материалов, чаще всего графита или сажи, в алмазную фазу под воздействием экстремальных давлений и высоких температур. Ключевая сложность заключается не столько в самой фазовой трансформации, сколько в контроле над размером частиц. Для этого в исходный углеродный материал могут вводить специальные добавки-катализаторы, например, металлы группы железа или никеля, которые ускоряют процесс перестройки кристаллической решетки, но также могут ограничивать рост кристаллов [3]. Детонационный метод позволяет проводить крупномасштабный синтез с относительно низкой себестоимостью производства. Наиболее часто используются взрывчатыми веществами являются смеси тринитротолуола и гексогена или октогена. Детонация выполняется в герметичной, бескислородной камере из нержавеющей стали при давлении более 15 ГПа и температуре более 3000 К в отсутствие кислорода для предотвращения окисления наночастиц алмаза. Наночастицы детонационных наноалмазов, химически стабильны, размер частиц составляет от 5 до 10 нм [4]. При диспергировании в водном растворе наноалмазы имеют тенденцию образовывать ассоциаты [5].

Первичные частицы детонационного наноалмаза обычно имеют сферическую форму. Данная форма и размеры делают их перспективными для применения в областях, где требуется высокая удельная поверхность (от 300 до 400 м<sup>2</sup>г<sup>−1</sup>),

например, при загрузке лекарств [6], биологически активных молекул [7].

Инертная и биосовместимая углеродная основа наноалмаза, хотя и обладает низкой токсичностью, сама по себе лишена терапевтической активности и биологической специфичности. Создание ковалентных модификаций ND решает эту проблему, наделяя частицы заданными функциями через ковалентное присоединение или физическую иммобилизацию биологических лигандов, фармакологических агентов и диагностических меток. Ключевая цель такой модификации — разработка высокоэффективных платформ для целевой доставки лекарств [8]. Поверхность наноалмазов может быть функционализирована полимерами, малыми терапевтическими молекулами и даже биомолекулами (биотин, пептиды, нуклеиновые кислоты и др.) для дальнейшего биомедицинского применения.

S. C. Hens et al. (2008) использовали алюмогидрид лития для восстановления детонационных наноалмазов с получением аддукта ND-NH<sub>2</sub>. Модифицированные аминированные наноалмазы в дальнейшем использовались для получения конъюгатов с биотином для захвата стрептавидина в присутствии N-гидроксисукцинимиды (NHS) [9]. D. Xu et al. (2018) синтезировали конъюгат наноалмаза, функционализированный полиаминокислотами, посредством полимеризации с раскрытием цикла N-карбоксиингидридов α-аминокислот с использованием гидрофильного этиленгликоля с глутаминовой кислотой, что привело к получению конъюгата ND-GluEG, который показал лучшую диспергируемость в воде и низкую токсичность и, таким образом, может использоваться в качестве возможного наноматериала для биомедицинского применения [10].

Для придания наночастицам «стелс-свойств» и минимизации захвата клетками иммунной системы широко применяется пэгилирование. Для получения модификаций на основе PEG можно использовать карбодиимидный синтез, проводимый на поверхности ND. Такая модификация приводит к резкому повышению гидрофильности, подавлению

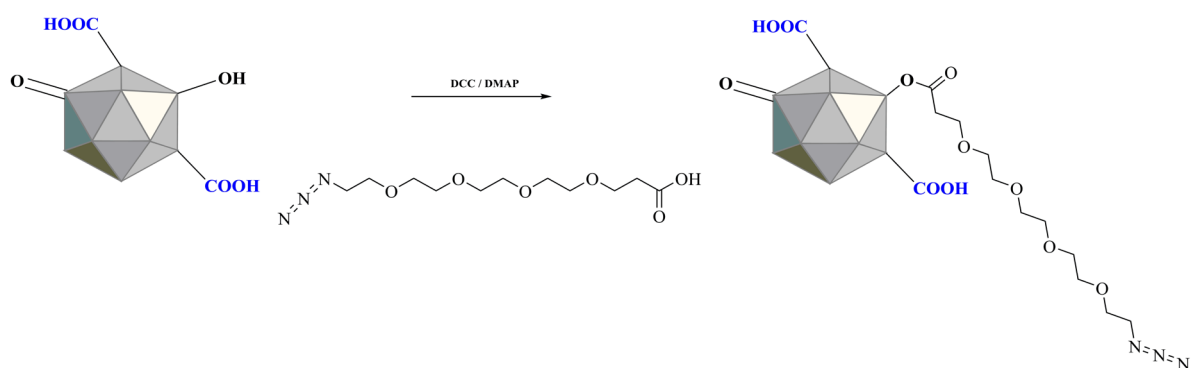


Рис. 1. Получение аддукта ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>  
Fig. 1. Preparation of the ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> adduct

опсонизации и снижению фагоцитоза [11]. Альтернативой PEG может служить гиперразветвленный полиглицерол (PG), формируемый на поверхности ND путем полимеризации глицидола. Получаемая плотная гидрофильная оболочка обеспечивает долговременную стабильность дисперсий и значительное снижение поглощения макрофагами, что было продемонстрировано в работе [12].

**Целью** данной работы являлось получение новой модификации на основе ND, предназначенной для использования в качестве универсальной платформы для адресной доставки лекарственных средств. Для этого была осуществлена химическая модификация поверхности наноалмаза путем ковалентного присоединения азид-PEG<sub>4</sub>-карбоновой кислоты, терминальная группа которой представлена реакционноспособным азидным фрагментом (-N<sub>3</sub>). Введение азидной группы предоставляет возможность последующего селективного конъюгирования с биологическими векторами (например, антителами, пептидами) через реакцию «клик-химии» азид-алкинового циклоприсоединения. В рамках работы была проведена комплексная идентификация полученного конъюгата ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> с использованием набора физико-химических методов анализа (твердотельная ЯМР-спектроскопия, ИК-Фурье спектроскопия и рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия). Размер наночастиц был исследован методом динамического светорассеяния. В опыте по изучению электрофоретической подвижности был рассчитан ζ-потенциал дисперсий. Важнейшей частью исследования являлась оценка *in vitro* биосовместимости синтезированного аддукта на культуре клеток почек эмбриона человека (НЕК293) с использованием МТТ-теста.

## МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Предварительно очищенные ND [12] диспергировали в 20 мл безводного дихлорметана (ДХМ) в концентрации 5 мг·мл<sup>-1</sup> с помощью ультразвуковой обработки (500 Вт, 20 кГц, 5 мин, 0 °С). В полученную суспензию последовательно добавляли молекулу линкера – азид-PEG<sub>4</sub>-карбоновую кислоту

(1,5 ммоль, 10-кратный молярный избыток относительно расчетного содержания поверхностных гидроксильных групп ND) и 4-диметиламинопиридин (ДМАП, каталитическое количество, 0,1 эквивалента). Смесь перемешивали на магнитной мешалке в течение 15 мин при 0 °С. Затем небольшими порциями при постоянном перемешивании добавляли N<sub>1</sub>N'-дициклогексилкарбодимид (1,2 эквивалента относительно линкера). Реакционную смесь переносили в пробирки для центрифугирования. Осаждение наноалмазов (ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>) проводили в высокоскоростной центрифуге при 10 000 об./мин в течение 30–60 мин. Для эффективного удаления побочных продуктов и исходных реагентов продукт промывали этанолом. Процедуру центрифугирования и ресуспендирования в свежем растворителе повторяли не менее 3–5 раз до тех пор, пока супернатант не становился прозрачным и не показывал поглощения в УФ-спектре. Конечный продукт сушили при 39 °С в течение 24 часов. Выход продукта составил 85%. Схема реакции представлена на рис. 1.

Спектры ЯМР <sup>13</sup>C конъюгата ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> регистрировали на спектрометре Bruker Avance III 400 WB (США). Изучение элементного состава проводили на интегрированном фотоэлектронном и оже-сканирующем спектрометре Thermo Fisher Scientific Escalab 250Xi (США). В образце определяли содержание азота, углерода и кислорода. ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Nicolet 8700 (США).

Распределение частиц ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> по размерам в воде получали с использованием анализатора Malvern Zetasizer 3000 (Великобритания) при T = 298,15 К. Значение индекса полидисперсности составляло 0,24–0,27.

Цитотоксичность конъюгата ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> (C = 2–200 мг/л) изучали с помощью МТТ-теста на клеточных НЕК293. Методика подробно описана в [14]. Оптические плотности продукта восстановления МТТ измеряли на планшетном ридере Allsheng AMR-100 (Китай) на длинах волн 540 нм и 690 нм. Данные нормировали в процентах по отношению к необработанным клеткам.

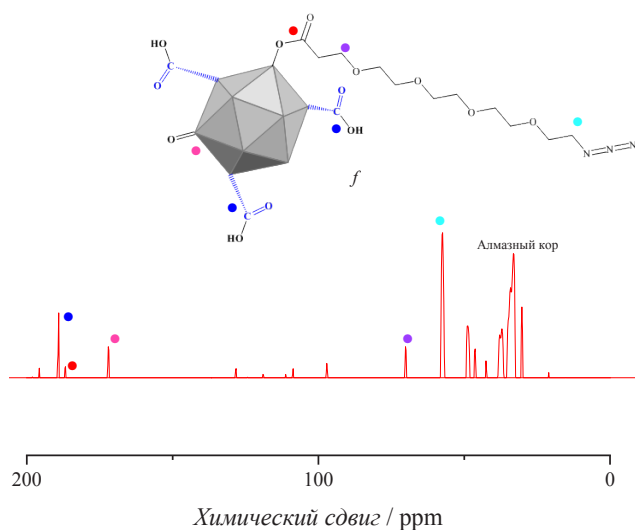


Рис. 2. Твердотельный ЯМР спектр  $^{13}\text{C}$  ND-PEG $_4$ -N $_3$   
 Fig. 2. Solid-state NMR spectrum of  $^{13}\text{C}$  ND-PEG $_4$ -N $_3$

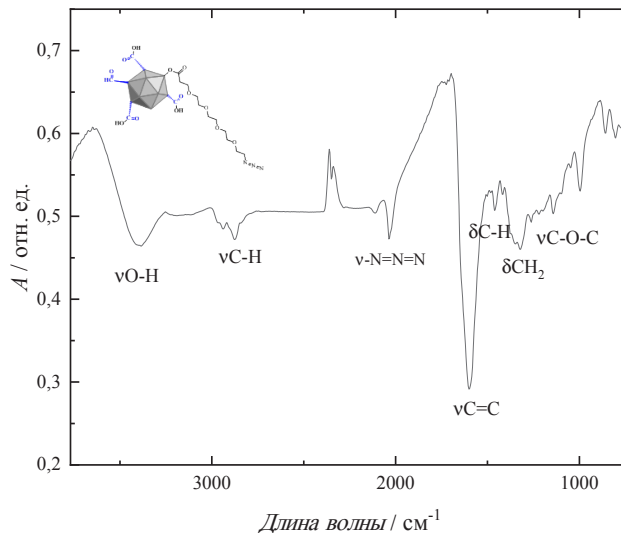
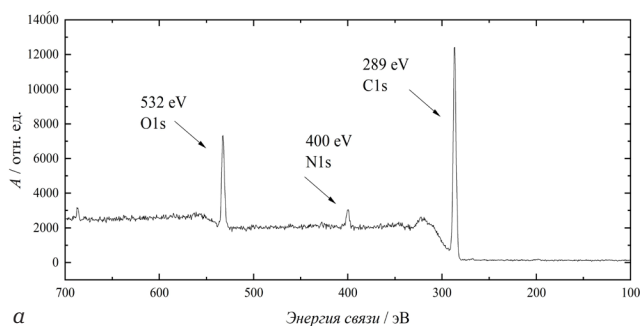
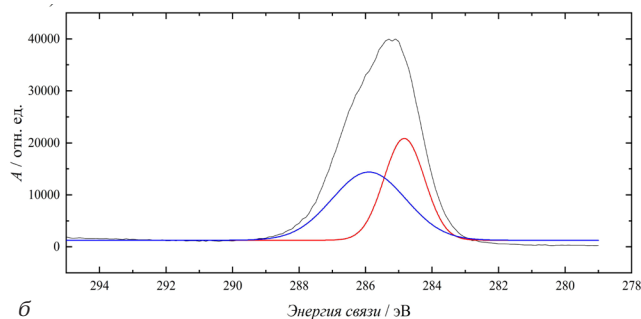


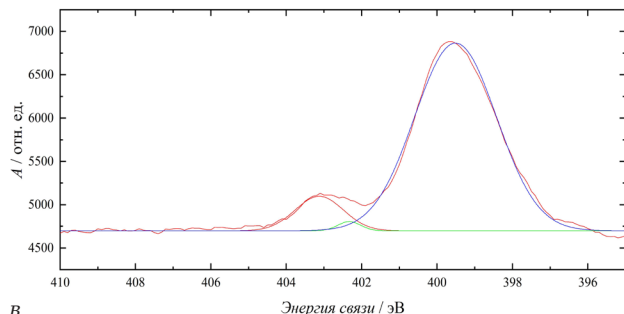
Рис. 3. ИК-спектр ND-PEG $_4$ -N $_3$   
 Fig. 3. IR spectrum of ND-PEG $_4$ -N $_3$



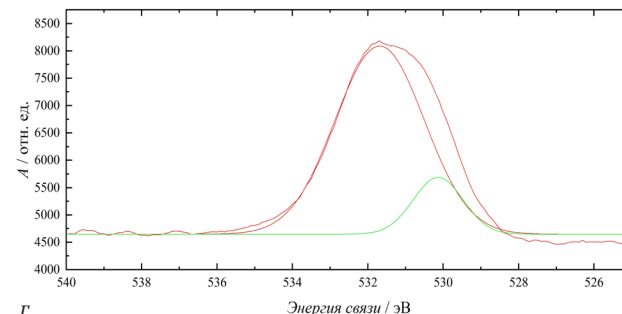
а



б



в



г

Рис. 4. Спектр РФЭС образца ND-PEG $_4$ -N $_3$  (а), а также C 1s (б), N 1s (в), O 1s (г) после деконволюции  
 Fig. 4. XPS spectrum of the ND-PEG $_4$ -N $_3$  sample (а), as well as C 1s (б), N 1s (в), O 1s (г) after deconvolution

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Твердотельный спектр ЯМР  $^{13}\text{C}$  конъюгата ND-PEG $_4$ -N $_3$  представлен на рис. 2. Сигналы в области высоких значений химического сдвига (188,1 и 186,0 м. д.) соответствуют  $sp^2$ -гибридизованным атомам углерода карбоксильных и сложноэфирных групп. Сигналы в области 96,7–97,1 м. д. характерны для С-ОН групп алмазного ядра. Химический сдвиг 36 м. д. относится к  $sp^3$ -гибридизованным атомам углерода. Сигналы 33–45 м. д. принадлежат частично разупорядоченной  $sp^3$ -углеродной оболочке и  $sp^2$ -атомам углерода в составе алмазного ядра соответственно [15]. Наличие сигналов при 56 м. д. и 49 м. д. хорошо относятся к фрагменту линкера, содержащего терминальную

азидогруппу. Сигнал при 56 м. д. характерен для атомов углерода в метиленовых группах, связанных с атомом кислорода ( $\text{CH}_2-\text{O}$ ) в составе PEG-фрагмента. Сигнал при ~49 м. д. соответствует атому углерода, непосредственно связанному с азидогруппой ( $\text{CH}_2-\text{N}_3$ ). Азидогруппа, выступая как электроноакцептор, вызывает смещение сигнала в более слабое поле по сравнению с углеродами основной цепи ПЭГ.

ИК-спектр ND-PEG $_4$ -N $_3$  демонстрирует характерные полосы поглощения, соответствующие функциональным группам в молекуле (рис. 3). Основной особенностью спектра является интенсивная полоса при 2094  $\text{cm}^{-1}$ , относящаяся к валентным колебаниям азидной группы ( $-\text{N}_3$ ). В области 2500–3500  $\text{cm}^{-1}$  наблюдается широкая

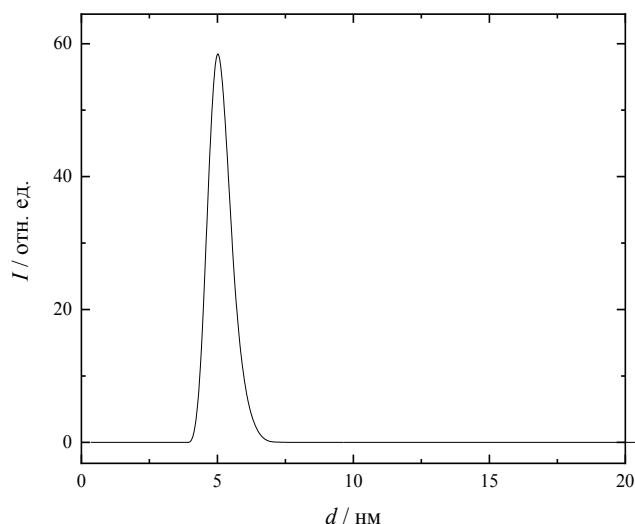


Рис. 5. Распределение наночастиц ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> по размерам  
Fig. 5. Size distribution of ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> nanoparticles

полоса, связанная с валентными колебаниями O–H карбоксильных групп (HOOC). Сигнал спектра в области 1700 см<sup>-1</sup> соответствует колебаниям карбонильной группы C=O. Кроме того, наблюдаются валентные колебания C=C связи в области 1590 см<sup>-1</sup> и деформационные колебания C–H группы вблизи 1460 см<sup>-1</sup>. Пик при 1140 см<sup>-1</sup> можно описать как валентные колебания C–O–C в структуре ND (эфирные, сложноэфирные и кислотно-ангидридные группы) [15].

На рис. 4 представлен спектр РФЭС конъюгата ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>. Основной вклад в спектр вносит углеродная основа наноалмаза, что проявляется в виде интенсивного пика C 1s при 284–285 эВ, соответствующего sp<sup>3</sup>-гибридизованному углероду. Дополнительные пики в области 286–288 эВ обусловлены наличием углерода в составе фрагментов C–O и C–N в PEG части. Азидная группа (–N<sub>3</sub>) линкера проявляется в виде пика N 400 эВ. Сигналы в области 531–533 эВ на спектре O 1s были отнесены к кислороду простых эфирных связей PEG и карбонильным группам (C=O) в составе ND.

Анализ распределения по размерам полученных наночастиц ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> (C = 10 мг·л<sup>-1</sup>) в водной дисперсии (рис. 5) показывает, что средний размер ассоциатов составляет 4–6 нм. При этом значение ζ-потенциала (–32 мВ) указывает на то, что полученные дисперсии обладают агрегативной устойчивостью.

Данные исследования цитотоксичности ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> и индивидуального ND показали, что ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> и ND практически не влияют на пролиферативную активность клеточной линии HEK293 в диапазоне концентраций 2–75 мг·л<sup>-1</sup> (рис. 6).

На основании данных МТТ-теста можно заключить, что ND, как в исходной форме, так и после модификации ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub>, не снижают мета-

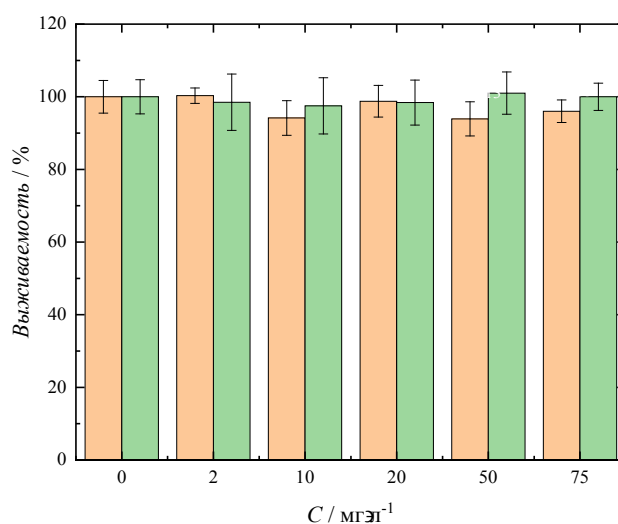


Рис. 6. Влияние ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> (оранжевый) и ND (зеленый) на выживаемость клеточной линии HEK293

Fig. 6. Effect of ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> (orange) and ND (green) on the survival of the HEK293 cell line

болическую активность и, следовательно, жизнеспособность клеток. Отсутствие достоверных различий между опытными группами и контрольной группой в течение всего времени инкубации указывает на отсутствие острой цитотоксичности данных материалов.

## ВЫВОДЫ

В статье представлен новый метод синтеза ковалентного наноконъюгата на основе ND и бифункционального линкера — азид-PEG<sub>4</sub>-карбоновой кислоты для адресной доставки лекарств. Наноконъюгат был охарактеризован с помощью комплекса физико-химических методов анализа. Наличие терминальной азидной группы (–N<sub>3</sub>) обеспечивает возможность последующей селективной функционализации системы через высокоэффективную реакцию азид-алкинового циклоприсоединения. Размер наночастиц в водной дисперсии составляет ~4–6 нм, при этом дисперсии являются агрегативно устойчивыми с высоким отрицательным значением ζ-потенциала (менее –30 мВ). ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> и ND практически не влияют на пролиферативную активность клеточной линии HEK293 в диапазоне концентраций 2–75 мг·л<sup>-1</sup>. Таким образом, разработанная модификация ND-PEG<sub>4</sub>-N<sub>3</sub> соответствует всем ключевым критериям, предъявляемым к универсальной платформе для доставки лекарств: она обладает стабильной и хорошо воспроизводимой структурой, позволяющей проводить дальнейшую модификацию, имеет агрегативную устойчивость в водных дисперсиях и демонстрирует низкую цитотоксичность. Полученные результаты создают основу для последующего присоединения к платформе различных терапевтических агентов и лигандов таргетинга с целью создания нового поколения селективных противоопухолевых препаратов.

### Конфликт интересов

Автор заявил об отсутствии конфликта интересов.

### Conflict of interest

Author declares no conflict of interest.

### Соответствие нормам этики

Автор подтверждает, что соблюдены права людей, принимавших участие в исследовании, включая получение информированного согласия в тех случаях, когда оно необходимо, и правила обращения с животными в случаях их использования в работе. Подробная информация содержится в Правилах для авторов.

### Compliance with ethical principles

The author confirms that they respect the rights of the people participated in the study, including obtaining informed consent when it is necessary, and the rules of treatment of animals when they are used in the study. Author Guidelines contains the detailed information.

### Вклад авторов

Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработке концепции статьи, получении и анализе фактических данных, написании и редактировании текста статьи, проверке и утверждении текста статьи.

### Authors' contribution

All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность кафедре общей и биоорганической химии Первого Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова за предоставленную возможность использования оборудования и проведения исследований на линиях клеток человека. Использовано оборудование следующих ресурсных центров Научного парка СПбГУ: магнитно-резонансные методы исследования, методы анализа состава вещества.

### Thanks

The authors express their gratitude to the Department of General and Bioorganic Chemistry of the First St. Petersburg State Medical University. Academician I. P. Pavlova for the opportunity to use the equipment and conduct research on human cell lines. The equipment of the following resource centers of the St. Petersburg State University Science Park was used: magnetic resonance research methods, methods for analyzing the composition of matter.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства здравоохранения Российской Федерации (государственное задание «Разработка молекулярного дизайна и создание препаратов на основе конъюгатов углеродных наноструктур, векторов адресной доставки и цитотоксических агентов для инактивации стволовых опухолевых клеток и компонентов микроокружения опухоли» ЕГИСУ: 123021300231-8).

### Financing

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Health of the Russian Federation (state assignment

“Development of molecular design and creation of drugs based on carbon nanostructure conjugates, targeted delivery vectors and cytotoxic agents for inactivation of tumor stem cells and components of the tumor microenvironment” of the Unified State Automated Information System of Accounting: 123021300231-8).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Shenderova O. A., McGuire G. E. Science and engineering of nanodiamond particle surfaces for biological applications (Review) // *Biointerphases*. – 2015. – Vol. 10, № 3. – 030802.
2. Paci J. T., Man H. B., Saha B. et al. Understanding the surfaces of nanodiamonds // *Journal of Physical Chemistry C. American Chemical Society*. – 2013. – Vol. 117, № 33. – P. 17256–17267.
3. Xu J., Chow E. K.-H. Biomedical applications of nanodiamonds: From drug-delivery to diagnostics // *SLAS Technol.* – 2023.
4. Dolmatov V. Y. Detonation synthesis ultradispersed diamonds: properties and applications // *Russian Chemical Reviews*. – 2001. – Vol. 70, № 7. – P. 607–626.
5. Holt K. B. Diamond at the nanoscale: applications of diamond nanoparticles from cellular biomarkers to quantum computing // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. – 2007. – Vol. 365, № 1861. – P. 2845–2861.
6. Chow E. K., Zhang X. Q., Chen M. et al. Nanodiamond therapeutic delivery agents mediate enhanced chemoresistant tumor treatment // *Sci Transl Med*. – 2011. – Vol. 3, № 73. – 73ra21.
7. Neitzel I., Mochalin V., Knoke I. et al. Mechanical properties of epoxy composites with high contents of nanodiamond // *Compos Sci Technol.* – 2011. – Vol. 71, № 5. – P. 710–716.
8. Qin J. X., Yang X. G., Lv C. F. et al. Nanodiamonds: Synthesis, properties, and applications in nanomedicine // *Mater Des.* – 2021. – Vol. 210. – P. 110091.
9. Hens S. C., Cunningham G., Tyler T. et al. Nanodiamond bioconjugate probes and their collection by electrophoresis // *Diam Relat Mater.* – 2008. – Vol. 17, № 11. – P. 1858–1866.
10. Xu D., Liu M., Zhang Q. et al. Preparation of water dispersible and biocompatible nanodiamond-poly(amino acid) composites through the ring-opening polymerization // *Materials Science and Engineering: C*. – 2018. – Vol. 91. – P. 496–501.
11. Jung H. S., Neuman K. C. Surface Modification of Fluorescent Nanodiamonds for Biological Applications // *Nanomaterials*. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 153.
12. Zhao L., Xu Y. H., Akasaka T. et al. Polyglycerol-coated nanodiamond as a macrophage-evading platform for selective drug delivery in cancer cells // *Biomaterials*. – 2014. – Vol. 35, № 20. – P. 5393–5406.
13. Berdichevskiy G. M., Vasina L. V., Ageev S. V. et al. A comprehensive study of biocompatibility of detonation nanodiamonds // *J Mol Liq.* – 2021. – Vol. 332. – 115763.
14. Panich A. M. Nuclear magnetic resonance studies of nanodiamond surface modification // *Diam Relat Mater.* – 2017. – Vol. 79. – P. 21–31.
15. Petit T., Puskar L. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation // *Diam Relat Mater.* – 2018. – Vol. 89. – P. 52–66.

### REFERENCES

1. Shenderova O. A., McGuire G. E. Science and engineering of nanodiamond particle surfaces for biological applications (Review) // *Biointerphases*. 2015;10(3). 030802.

2. Paci J. T., Man H. B., Saha B. et al. Understanding the surfaces of nanodiamonds // *Journal of Physical Chemistry C. American Chemical Society*. 2013;117(33):17256–17267.
3. Xu J., Chow E. K.-H. Biomedical applications of nanodiamonds: From drug-delivery to diagnostics // *SLAS Technol.* 2023.
4. Dolmatov V. Y. Detonation synthesis ultradispersed diamonds: properties and applications // *Russian Chemical Reviews*. 2001;70(7):607–626.
5. Holt K. B. Diamond at the nanoscale: applications of diamond nanoparticles from cellular biomarkers to quantum computing // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007;365(1861):2845–2861.
6. Chow E. K., Zhang X. Q., Chen M. et al. Nanodiamond therapeutic delivery agents mediate enhanced chemoresistant tumor treatment // *Sci Transl Med*. 2011;3(73):73ra21.
7. Neitzel I., Mochalin V., Knoke I. et al. Mechanical properties of epoxy composites with high contents of nanodiamond // *Compos Sci Technol*. 2011;71(5):710–716.
8. Qin J. X., Yang X. G., Lv C. F. et al. Nanodiamonds: Synthesis, properties, and applications in nanomedicine // *Mater Des*. 2021;210:110091.
9. Hens S. C., Cunningham G., Tyler T. et al. Nanodiamond bioconjugate probes and their collection by electrophoresis // *Diam Relat Mater*. 2008;17(11):1858–1866.
10. Xu D., Liu M., Zhang Q. et al. Preparation of water dispersible and biocompatible nanodiamond-poly(amino acid) composites through the ring-opening polymerization // *Materials Science and Engineering: C*. 2018;91:496–501.
11. Jung H. S., Neuman K. C. Surface Modification of Fluorescent Nanodiamonds for Biological Applications // *Nanomaterials*. 2021;11(1):153.
12. Zhao L., Xu Y. H., Akasaka T. et al. Polyglycerol-coated nanodiamond as a macrophage-evading platform for selective drug delivery in cancer cells // *Biomaterials*. 2014;35(20):5393–5406.
13. Berdichevskiy G. M., Vasina L. V., Ageev S. V. et al. A comprehensive study of biocompatibility of detonation nanodiamonds // *J Mol Liq*. 2021;332:115763.
14. Panich A. M. Nuclear magnetic resonance studies of nanodiamond surface modification // *Diam Relat Mater*. 2017;79:21–31.
15. Petit T., Puskar L. FTIR spectroscopy of nanodiamonds: Methods and interpretation // *Diam Relat Mater*. 2018;89:52–66.

### Информация об авторах

**Шемчук Ольга Сергеевна**, аспирант, специалист по учебно-методической работе кафедры общей и биоорганической химии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), научный сотрудник отдела фундаментальных исследований, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова (Санкт-Петербург, Россия) ORCID: 0000-0003-3060-2232; **Булаков Вячеслав Эдуардович**, аспирант, специалист по учебно-методической работе кафедры общей и биоорганической химии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0009-0003-4854-017X; **Молчанов Олег Евгеньевич**, доктор медицинских наук, руководитель отдела фундаментальных исследований, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0003-3330-6324; **Миколайчук Ольга Владиславовна**, кандидат химических наук, старший научный сотрудник отдела фундаментальных исследований, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-0463-7725; **Майстренко Дмитрий Николаевич**, доктор медицинских наук, Директор, Российский научный центр радиологии и хирургических технологий имени академика А. М. Гранова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0001-8174-7461; **Шаройко Владимир Владимирович**, доктор биологических наук, профессор кафедры общей и биоорганической химии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0002-3717-0471; **Семенов Константин Николаевич**, доктор химических наук, профессор кафедры общей и биоорганической химии, Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, Россия), ORCID: 0000-0003-2239-2044.

### Information about authors

**Shemchuk Olga S.**, Postgraduate Student, Specialist in Educational and Methodological Work of the Department of General and Bioorganic Chemistry, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), Research Fellow of the Department of Fundamental Researches, Russian Scientific Center Radiology and Surgical Technologies named after Academician A. M. Granov (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0003-3060-2232; **Bulakov Vyacheslav E.**, Postgraduate Student, Specialist in Educational and Methodological Work of the Department of General and Bioorganic Chemistry, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0009-0003-4854-017X; **Mikolaichuk Olga V.**, Cand. of Sci. (Chem.), Senior Research Fellow of the Department of Fundamental Researches, Russian Scientific Center Radiology and Surgical Technologies named after Academician A. M. Granov (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-0463-7725; **Molchanov Oleg E.**, Dr. of Sci. (Med.), Head of the Department of Fundamental Researches, Russian Scientific Center Radiology and Surgical Technologies named after Academician A. M. Granov (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0003-3330-6324; **Maistrenko Dmitrii N.**, Dr. of Sci. (Med.), Director, Russian Scientific Center Radiology and Surgical Technologies named after Academician A. M. Granov (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0001-8174-7461; **Semenov Konstantin N.**, Dr. of Sci. (Chem.), Professor of the Department of General and Bioorganic Chemistry, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0003-2239-2044; **Sharoyko Vladimir V.**, Dr. of Sci. (Biol.), Professor of the Department of General and Bioorganic Chemistry, Pavlov University (Saint Petersburg, Russia), ORCID: 0000-0002-3717-0471.