

## НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 54.057

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНЫЕ СВОЙСТВА  
ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОЧАСТИЦ, ПОЛУЧЕННЫХ  
ПРИ ЭЛЕКТРОЛИЗЕ СПИРТОВОГО РАСТВОРА NaOH****Даниил Александрович Гвоздев<sup>1</sup>, Георгий Витальевич Цораев<sup>2</sup>,  
Евгений Павлович Лукашев<sup>3</sup>, Евгений Георгиевич Максимов<sup>4</sup>**<sup>1-4</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, биологический факультет, кафедра биофизики, Москва, Россия**Автор, ответственный за переписку:** Даниил Александрович Гвоздев,  
danil131054@mail.ru

**Аннотация.** При электролизе раствора едкого натра в 94%-м этаноле на платиновых электродах были получены наночастицы углеродной природы. Для выделения и очистки наночастиц от побочных продуктов синтеза использовали центрифугирование, колоночную хроматографию и диализ. Наночастицы имели гидродинамический диаметр порядка 14 нм, потенциал поверхности составил –20 мВ. Частицы растворимы в воде за счет гидроксильных и карбоксильных групп на поверхности, а также обладают люминесценцией в синей и оранжевой областях видимого спектра. В работе обсуждаются детали электрохимического синтеза наночастиц этого типа.

**Ключевые слова:** углеродные наночастицы, электрохимический синтез, люминесценция

**Финансирование:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-34-70042).

**Для цитирования:** Гвоздев Д.А., Цораев Г.В., Лукашев Е.П., Максимов Е.Г. Спектральные и структурные свойства люминесцентных углеродных наночастиц, полученных при электролизе спиртового раствора NaOH // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 1. С. 64–70.

## ORIGINAL ARTICLE

**SPECTRAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF LUMINESCENT  
CARBON NANOPARTICLES OBTAINED BY ELECTROLYSIS  
OF AN ALCOHOL SOLUTION OF NaOH****Daniil A. Gvozdev<sup>1</sup>, Georgii V. Tsoraev<sup>2</sup>, Evgenii P. Lukashev<sup>3</sup>,  
Evgenii G. Maksimov<sup>4</sup>**<sup>1-4</sup> Department of Biophysics, Faculty of Biology, Lomonosov Moscow State University, Leninskiye gory, 1–24, Moscow, 119234, Russia**Corresponding author:** Daniil A. Gvozdev, danil131054@mail.ru

**Abstract.** Carbon nanoparticles were obtained as a result of electrolysis of sodium hydroxide solution in 94% ethanol on platinum electrodes. Centrifugation, column chromatography, and dialysis were used to isolate and purify nanoparticles from synthesis by-products. The nanoparticles had a hydrodynamic diameter of about 14 nm, and the surface potential was –20 mV. The particles are soluble in water due to hydroxyl

and carboxyl groups on the surface, and also exhibit luminescence in the blue and orange regions of the visible spectrum. The paper discusses the details of the electrochemical synthesis of nanoparticles of this type.

**Keywords:** carbon nanoparticles, electrochemical synthesis, luminescence

**Financial Support:** The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research (project No. 20-34-70042).

**For citation:** Gvozdev D.A., Tsoraev G.V., Lukashev E.P., Maksimov E.G. Spectral and structural properties of luminescent carbon nanoparticles obtained by electrolysis of an alcohol solution of NaOH // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. T. 63. N 1. P. 64–70.

Углеродные наночастицы (уНЧ) представляют собой обширный класс наноразмерных материалов. В силу своих уникальных структурных и оптических свойств уНЧ нашли применение в различных областях науки и промышленности, в частности, как биосенсоры, компоненты светодиодной техники и фотоэлектрохимических ячеек, фотокатализаторы и др. [1]. Особый интерес вызывают углеродные наночастицы, обладающие способностью к люминесценции (далее – уЛНЧ). В литературе имеются сведения о нескольких типах таких частиц. К первой группе можно отнести уЛНЧ, синтезируемые путем измельчения объемного материала, например графена (графеновые квантовые точки [2]) или аморфного углерода (наноалмазы, содержащие азот в качестве примеси [3]). Ко второй группе относятся уЛНЧ, сборка которых осуществляется за счет конденсации относительно простых органических молекул. Такие наночастицы (в литературе – C-dots) можно получить гидротермальным, микроволновым, электрохимическим и другими видами синтеза [4].

Гидротермальный синтез уЛНЧ в настоящее время считается наиболее изученным, однако он обладает достаточно низкой воспроизводимостью, что затрудняет получение уЛНЧ с заданными свойствами. Более широкой перспективой обладает электрохимический метод синтеза наночастиц. При протекании тока через электрохимическую ячейку органические молекулы, выступающие как источник углерода, подвергаются окислительно-восстановительной реакции на электродах с образованием органических интермедиатов. В свою очередь, интермедиаты взаимодействуют между собой, что приводит к образованию и росту наночастиц [5]. При использовании источников углерода, имеющих в составе атомы азота, фосфора, серы и т.д., можно получить уЛНЧ с различными спектральными характеристиками [6].

В данной работе мы синтезировали углеродные наночастицы, подвергнув электролизу спиртовой раствор едкого натра. Из литературы известно, что основным продуктом электролиза этанола является ацетальдегид [7], который может вступать в реакции поликонденсации. Полученные уЛНЧ охарактеризованы разными спектральными методами, исследованы также их гидродинамические свойства. Установлено, что уЛНЧ обладают люминесценцией в синей и оранжевой областях спектра, в перспективе это позволит применять их в качестве флуоресцентных маркеров и доноров/акцепторов энергии электронного возбуждения.

### Экспериментальная часть

**Синтез и очистка уЛНЧ.** К 49 мл этанола добавляли 1 мл 3,75 М водного раствора NaOH. Сосуд герметично закрывали силиконовой крышкой с отверстиями для платиновых электродов (расстояние между ближайшими стенками электродов 15 мм). Электролиз проводили в течение 24 ч при постоянном напряжении 15 В (регулируемый источник питания QJ3005T, «Ningbo JiuYuan Electronic», Китай). По окончании электролиза полученный раствор уЛНЧ подвергали очистке на силикагеле Woelm (Германия). К 7,5 г сухого силикагеля добавляли 15 мл диэтилового эфира, а затем 10 мл петролейного эфира и дегазировали в ультразвуковой ванне (20 кГц, 60 Вт) в течение 1 мин. Полученную смесь заливали в колонку, затем стабилизировали этанолом. Далее на колонку наносили раствор уЛНЧ. Наночастицы, осевшие на силикагель, элюировали дистиллированной водой; полученный раствор использовали для дальнейших экспериментов.

Гидродинамический размер и  $\zeta$ -потенциал частиц определяли методами динамического светорассеяния и электрофореза на приборе «ZetaSizer Nano ZS» («Malvern Instruments»,

Великобритания). ИК-спектры регистрировали на приборе «Perkin-Elmer Spectrum Two» (США) с приставкой полного внутреннего отражения (ATR) «MIRacle» («Pike Technologies», США).

Спектры поглощения регистрировали с помощью спектрофотометра «MayaPro» («Ocean Optics», США) и стабилизированного источника белого света с вольфрамовой лампой «SLS201L» («Thorlabs», США). Спектрофотометрические измерения проводили в термостатируемой ячейке «Qpod 2e» («Quantum Northwest», США) при температуре 25 °С. Относительный квантовый выход люминесценции уЛНЧ измеряли в дистиллированной воде относительно родамина В ( $\phi_{aq} = 0,31$  [8]).

Спектры люминесценции и возбуждения люминесценции уЛНЧ измеряли при комнатной температуре с помощью флуориметра «Fluorolog 3» («Horiba Jobin Yvon», Франция). Кинетику затухания люминесценции уЛНЧ с пикосекундным временным разрешением регистрировали методом счета фотонов на установке «SimpleTau-140» («Becker & Hickl», Германия). Для возбуждения люминесценции наночастиц использовали светодиодные лазеры «PLS-450/660» и «PLS-510» («InTop», Россия): длительность импульса 25 пс, частота следования импульсов 25 МГц, длина волны возбуждения люминесценции 455 и 510 нм соответственно. Сигнал люминесценции, прошедший монохроматор «ML 44» («Solar laser systems», Белоруссия), регистрировали с помощью гибридного детектора «НРМ-100-07С» («Becker & Hickl», Германия). Все вычисления проводили с помощью пакета программ «OriginPro 9.1» («OriginLab Corporation», США).

### Результаты и их обсуждение

В результате обработки электрическим током в течение 24 ч спиртовой раствор щелочи мутнеет, при этом цвет его становится желтым, затем оранжевым и бурым. Мы обнаружили, что помутнение раствора не связано с протеканием тока. Вещество, представляющее собой источник светорассеяния, образуется при отстаивании спиртового раствора щелочи без каких-либо дополнительных воздействий; его выход увеличивается при использовании магнитной мешалки. Оно легко отделяется от остального раствора путем центрифугирования (10 тыс. об/мин, 10 мин), а кроме того, в предварительно высушенном виде растворяется в воде. Мы зарегистрировали спектр инфракрасного поглощения высушенной

взвеси и показали, что данное вещество состоит преимущественно из карбоната натрия. Карбонат образуется, вероятно, в результате реакции щелочи с растворенным в спирте углекислым газом. Данный продукт инертен по отношению к уЛНЧ, образующимся при электролизе спирта, однако связывание ионов натрия в нерастворимый в спирте карбонат снижает электропроводность раствора. В нашем случае (при использовании открытого сосуда с автоматическим перемешиванием) в течение суток сила тока снижалась с 22 до 0 мА и реакция останавливалась. В дальнейших экспериментах мы использовали герметичную электрохимическую ячейку без проведения перемешивания, что позволило значительно снизить количество образующейся взвеси и замедлить снижение силы тока (с 22 до 13 мА в течение суток).

Пожелтение раствора визуально наблюдается уже на втором часу проведения электролиза вследствие образования окрашенных соединений – продуктов электролиза спирта. Далее мы будем называть их прекурсором, так как, вероятно, именно из них образуются уЛНЧ. Молекулы прекурсора не являются наночастицами, так как мы не обнаружили частиц в этом образце методами динамического светорассеяния и электронной микроскопии. Наличие полос инфракрасного пропускания прекурсора в области 1300–1600  $\text{см}^{-1}$  (рис. 1, А) позволяет предположить ароматическую природу этих соединений [9]. Известно, что ацетальдегид и другие продукты щелочного электролиза этанола способны вступать в многоступенчатые реакции поликонденсации [10] (в том числе с образованием ароматических кластеров), причем размер таких кластеров растет с увеличением напряжения при электролизе [5]. Возможно образование графеноподобных структур из малых органических молекул разной природы, как описано в [11, 12]. Кроме того, в спектре ИК-пропускания прекурсора имеется интенсивная полоса с максимумом при 1075  $\text{см}^{-1}$ , характерная для колебаний одинарной связи С–О, и широкая полоса в области 3000–3600  $\text{см}^{-1}$ , свидетельствующая о наличии водородных связей, связанных с гидроксильной группой. Этот набор полос (вместе с группой в области 2800–3000  $\text{см}^{-1}$ ) характерен также для этанола, если предположить, что при подготовке образца к измерению ИК-спектров часть молекул спирта не испарилась и осталась в связанном состоянии. Однако мы считаем, что полосы в спектре ИК-пропускания отражают

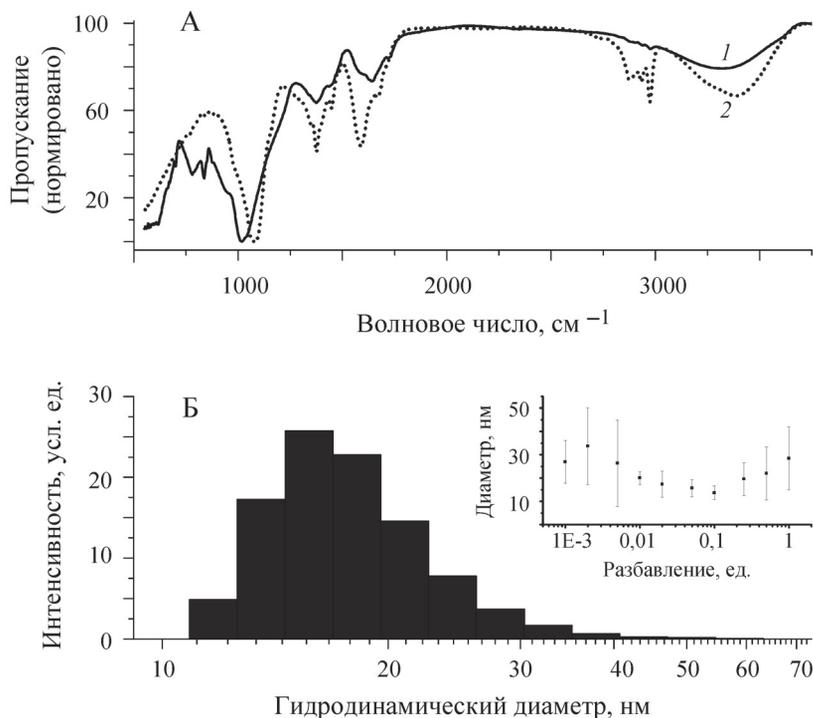


Рис. 1. А – инфракрасные спектры пропускания уЛНЧ (1) и прекурсора (2); Б – гистограмма распределения гидродинамических диаметров уЛНЧ в воде после диализа. На вставке представлена зависимость измеряемого значения размера частиц от величины разбавления исходного раствора образца. Приведено стандартное отклонение по 20 измерениям

структурные свойства прекурсора, поскольку прекурсор растворяется в этаноле и дистиллированной воде; при отсутствии гидроксильных групп молекулы прекурсора обладали бы низкой растворимостью в полярных растворителях.

Параллельно с процессом образования прекурсора в растворе происходит образование уЛНЧ. Отделить уЛНЧ от прекурсора можно с помощью колоночной хроматографии. При нанесении на колонку свежего образца после процедуры электролиза прекурсор сразу начинает движение по колонке (этанол выступает в качестве элюента), в то время как уЛНЧ прочно связываются с силикагелем в верхней части колонки в виде узкой коричневой полосы, над которой расположен бесцветный слой нерастворимого в спирте карбоната. Таким образом, прекурсор отделяется от уЛНЧ благодаря более высокому сродству уЛНЧ к сорбенту. С сорбента уЛНЧ вымываются дистиллированной водой, при этом в воде растворяется карбонат натрия, так что конечный раствор уЛНЧ имеет высокую ионную силу. Гидродинамические параметры уЛНЧ в та-

ком растворе свидетельствуют о частичной агрегации частиц (до 100 нм диаметром) вследствие низкого потенциала на их поверхности (значение  $\xi$ -потенциала составляет  $-8,0 \pm 0,8$  мВ). Соль из раствора удаляли с помощью диализа при двукратной смене дистиллированной воды в течение суток (4 мл образца по отношению к 1,8 л дистиллированной воды). В результате  $\xi$ -потенциал стал более отрицательным ( $-20,2 \pm 0,9$  мВ), а гидродинамический размер частиц уменьшился до  $14,6 \pm 3,2$  нм (распределение уЛНЧ по размерам представлено на рис. 1, Б). Последнее значение было установлено путем исследования влияния концентрации уЛНЧ на величину гидродинамического диаметра частиц, измеряемую методом динамического светорассеяния, в котором при слишком высокой или низкой концентрации частиц могут наблюдаться отклонения от стационарного значения (рис. 1, Б, вставка).

В отличие от прекурсора, при высушивании водного раствора уЛНЧ образуется вещество в твердом агрегатном состоянии. Инфракрасный спектр пропускания уЛНЧ (рис. 1, А) качествен-

но отличается от такового у прекурсора менее выраженным вкладом колебаний С–Н-связей (область 2800–3000 см<sup>-1</sup>) и появлением полос в области 720–860 см<sup>-1</sup>. Уменьшается также относительная интенсивность полос 1300–1600 см<sup>-1</sup> и широкой полосы колебаний О–Н в составе водородных связей. Таким образом, по своей структуре уЛНЧ мало отличаются от молекул прекурсора. Действительно, согласно современным представлениям [2], углеродные люминесцентные наночастицы в общем случае представляют собой отдельные sp<sup>2</sup>-домены в углеродной матрице с гибридизацией sp<sup>3</sup>; источником sp<sup>2</sup>-доменов являются молекулы прекурсора. Уширение и смещение интенсивной полосы в области 1000–1100 см<sup>-1</sup> может быть связано с увеличением вклада колебаний эпоксидных групп С–О–С, которые могут соединять отдельные sp<sup>2</sup>-домены внутри наночастицы.

Потенциал поверхности уЛНЧ в –20 мВ может создаваться карбоксильными группами, однако мы не видим характерной полосы колебания группы С=О в области 1700 см<sup>-1</sup>. Вероятно, это можно объяснить тем, что в при-

сутствии щелочи образуется натриевая соль карбоксильной группы. Известно, что для солевой формы полоса колебаний карбонильной группы в составе СООН может сдвигаться до 1600 см<sup>-1</sup>, что и наблюдается в ИК-спектре уЛНЧ.

Полученные уЛНЧ обладают интенсивным поглощением в УФ-области спектра; с увеличением длины волны коэффициент молярной экстинкции наночастиц снижается (рис. 2, А). Наночастицы способны к люминесценции – при сканировании в диапазоне длин волн возбуждения 300–600 нм выявляются две полосы люминесценции в синей и оранжевой областях спектра (рис. 2, Б). Для этих полос были получены спектры возбуждения люминесценции (рис. 2, А), которые свидетельствуют о двух независимых переходах. В литературе синяя люминесценция наночастиц (с максимумом возбуждения в области 330 нм, как и в нашем случае) связывают с *n*-π\* электронным переходом, который возникает с участием окисленных групп на поверхности уЛНЧ [11, 13–15]. Люминесценция за счет электронных переходов π-π\*

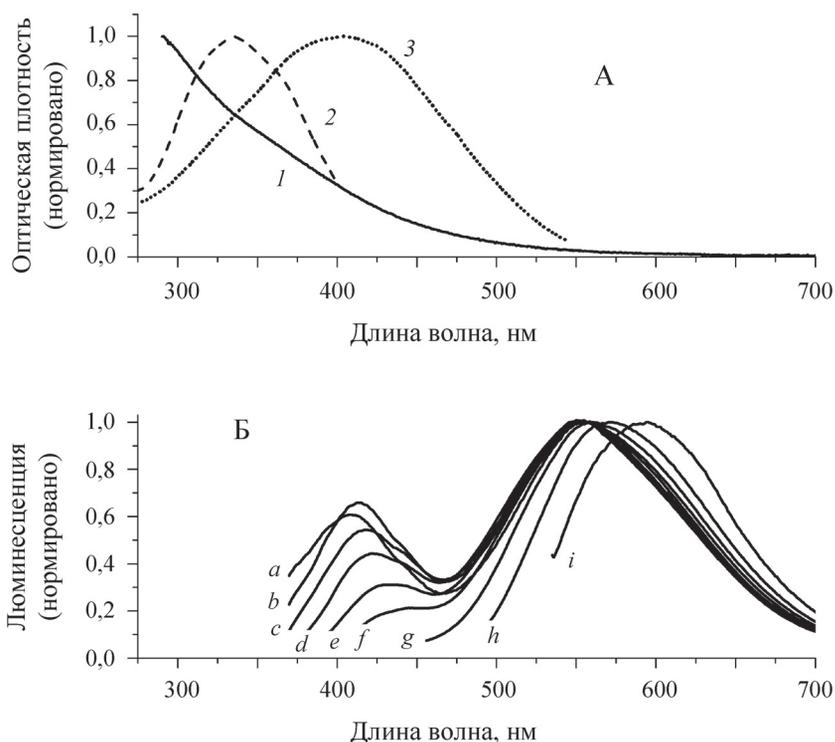


Рис. 2. А – нормированный спектр поглощения уЛНЧ в водном растворе (1), а также нормированные спектры возбуждения люминесценции уЛНЧ, полученные при регистрации люминесценции на длинах волн 430 (2) и 560 (3) нм; Б – спектры люминесценции уЛНЧ при возбуждении на длинах волн, нм: 300 (а), 320 (б), 340 (в), 360 (г), 380 (д), 400 (е), 440 (ж), 480 (з) и 520 (и). Спектры нормированы на максимум длинноволновой полосы люминесценции

во внутренних  $sp^2$ -доменах обычно наблюдается в более коротковолновой области, так что происхождение полос люминесценции уЛНЧ в видимой области и их положение, вероятно, определяются конкретными функциональными группами на поверхности частиц (есть предположение, что синяя полоса люминесценции связана с гидроксильными группами [16]).

С увеличением длины волны возбуждения обе полосы люминесценции уЛНЧ испытывают батохромный сдвиг, причем положение синей полосы люминесценции более чувствительно к изменению длины волны возбуждения. Зависимость положения полосы люминесценции от длины волны возбуждения обычна для углеродных наночастиц [12, 13]. Кинетика затухания люминесценции уЛНЧ, полученная в максимуме длинноволновой полосы при возбуждении на длине волны 510 нм, раскладывается на три временные компоненты (0,2; 1,5; 4,6 нс) с вкладом 68, 24 и 8% соответственно. Интересно, что люминесцентные свойства уЛНЧ и прекурсора практически совпадают, что также свидетельствует об изолированности  $sp^2$ -доменов в составе наночастиц.

Квантовый выход, измеренный при возбуждении люминесценции уЛНЧ на длине волны 455 нм относительно родамина В в дистиллированной воде, составил  $0,20 \pm 0,02\%$ . Низкое значение квантового выхода люминесценции может быть связано с состоянием функциональных групп на поверхности уЛНЧ и их количеством [16]. Известно, что модификация

поверхности нелюминесцирующих углеродных наночастиц полимером приводит к появлению яркой люминесценции в видимой области [17].

### Выводы

В настоящей работе синтезированы углеродные люминесцентные наночастицы из низкомолекулярных органических предшественников, образующихся при электролизе спиртового раствора щелочи. Наночастицы имеют две полосы люминесценции в синей и оранжевой областях спектра, а также обладают хорошей коллоидной стабильностью в воде. Частицы представляют собой совокупность люминесцирующих кластеров, сходных по спектральным характеристикам с органическим предшественником и, вероятно, изолированных друг от друга одинарными ковалентными связями. Следовательно, для объяснения происхождения двух полос люминесценции полученных уЛНЧ нельзя использовать модель «люминесцентные кластеры ядра частицы + люминесцентные центры на поверхности частицы». Мы считаем, что в данном случае более уместна модель двух типов кластеров, параметры люминесценции которых определяются их различным строением.

Низкий квантовый выход люминесценции уЛНЧ может быть связан с тушением люминесцентных кластеров растворителем. На следующем этапе работы мы планируем модифицировать наночастицы с помощью биосовместимых полимеров для биологических приложений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Molaei M.J. A review on nanostructured carbon quantum dots and their applications in biotechnology, sensors, and chemiluminescence // *Talanta*. 2019. Vol. 196. P. 456–478.
2. Tan Xiaoyun, Li Yunchao, Li Xiaohong, Zhou Shixin, Fan Louzhen, Yang Shihe. Electrochemical synthesis of small-sized red fluorescent graphene quantum dots as a bioimaging platform // *Chem. Commun. Royal Society of Chemistry*. 2015. Vol. 51. N 13. P. 2544–2546.
3. Yu Shu Jung, Kang Ming Wei, Chang Huan Cheng, Chen Kuan Ming, Yu Yueh Chung. Bright fluorescent nanodiamonds: No photobleaching and low cytotoxicity // *J. Am. Chem. Soc.* 2005. Vol. 127. N 50. P. 17604–17605.
4. Baker Sheila N., Baker Gary A. Luminescent carbon nanodots: Emergent nanolights // *Angew. Chemie – Int. Ed.* 2010. Vol. 49. N 38. P. 6726–6744.
5. Deng Jianhui, Lu Qiujun, Mi Naxiu, Li Haitao, Liu Meiling, Xu Mancai, Tan Liang, Xie Qingji, Zhang Youyu, Yao Shouzhuo. Electrochemical synthesis of carbon nanodots directly from alcohols // *Chem. A Eur. J.* 2014. Vol. 20. N 17. P. 4993–4999.
6. Li Yan, Li Sen, Wang Yingmin, Wang Jun, Liu Hui, Liu Xinqian, Wang Lifeng, Liu Xiaoguang, Xue Wendong, Ma Ning. Electrochemical synthesis of phosphorus-doped graphene quantum dots for free radical scavenging // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. Vol. 19. N 18. P. 11631–11638.
7. Sundholm G. The anodic oxidation of absolute methanol and ethanol // *Electroanal. Chem. Interfacial Electrochem.* 1971. Vol. 31. N 1. P. 265–267.
8. Magde Douglas, Rojas Gail E., Seybold Paul G. Solvent dependence of the fluorescence lifetimes of xanthene dyes // *Photochem. Photobiol.* 1999. Vol. 70. N 5. P. 737–744.
9. Ming Hai, Ma Zheng, Liu Yang, Pan Keming, Yu Hang, Wang Fang, Kang Zhenhui. Large scale electrochemical synthesis of high quality carbon nanodots and their photocatalytic property // *Dalt. Trans.* 2012. Vol. 41. N 31. P. 9526–9531.
10. Stegner G., Balandin A.A., Rudenko A.P. Effect of separate stages of the polycondensation of products from catalytic decomposition of ethyl alcohol on the carbon formation rate // *Izv. Akad. Nauk SSSR.* 1960. Vol. 1. P. 19–24.

11. Wang Chen I., Wu Wei Cheng, Periasamy Arun Prakash, Chang Huan Tsung. Electrochemical synthesis of photoluminescent carbon nanodots from glycine for highly sensitive detection of hemoglobin // *Green Chem.* 2014. Vol. 16. N 5. P. 2509–2514.
12. Bao Lei, Zhang Zhi Ling, Tian Zhi Quan, Zhang Li, Liu Cui, Lin Yi, Qi Baoping, Pang Dai Wen. Electrochemical tuning of luminescent carbon nanodots: From preparation to luminescence mechanism // *Adv. Mater.* 2011. Vol. 23. N 48. P. 5801–5806.
13. Li Yan, Hu Yue, Zhao Yang, Shi Gaoquan, Deng Lier, Hou Yanbing, Qu Liangti. An electrochemical avenue to green-luminescent graphene quantum dots as potential electron-acceptors for photovoltaics // *Adv. Mater.* 2011. Vol. 23. N 6. P. 776–780.
14. Zheng Liyan, Chi Yuwu, Dong Yongqing, Lin Jianpeng, Wang Binbin. Electrochemiluminescence of water-soluble carbon nanocrystals released electrochemically from graphite // *J. Am. Chem. Soc.* 2009. Vol. 131. N 13. P. 4564–4565.
15. Zhu Shoujun, Song Yubin, Wang Joy, Wan Hao, Zhang Yuan, Ning Yang, Yang Bai. Photoluminescence mechanism in graphene quantum dots: Quantum confinement effect and surface/edge state // *Nano Today.* Elsevier Ltd, 2017. Vol. 13. P. 10–14.
16. Kong Wenhui, Wang Yingmin, Wang Lifeng, Li Yan, Li Yong, Xue Wendong. Investigation of photoluminescence behavior of reduced graphene quantum dots // *Inorg. Chem. Commun.* 2019. Vol. 99. P. 199–205.
17. Sun Y.P., Zhou B., Lin Y., Wang W., Fernando K.A.S., Pathak P., Meziani M.J., Harruff B.A., Wang X., Wang H., Luo P.G., Yang H., Kose M.E., Chen B., Veca L.M., et al. Quantum-sized carbon dots for bright and colorful photoluminescence // *J. Am. Chem. Soc.* 2006. Vol. 128. N 24. P. 7756–7757.

### **Информация об авторах**

Гвоздев Даниил Александрович – науч. сотр. кафедры биофизики биологического факультета МГУ, канд. биол. наук, danil131054@mail.ru;

Цораев Георгий Витальевич – науч. сотр. кафедры биофизики биологического факультета МГУ, gtsoraev@gmail.com;

Лукашев Евгений Павлович – вед. науч. сотр. кафедры биофизики биологического факультета МГУ, канд. биол. наук, lukashev@biophys.msu.ru;

Максимов Евгений Георгиевич – вед. науч. сотр. кафедры биофизики биологического факультета МГУ, канд. биол. наук, emaksimoff@yandex.ru.

### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021;  
одобрена после рецензирования 12.10.2021;  
принята к публикации 14.10.2021.