Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 102–105.

УДК 523.98
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-102

ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК В НАНОБИОТЕХНОЛОГИЯХ

Марчук В.И.[1], Тютрин А.А.[1, 2]

1Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия, marchuk.lera04@list.ru
1, 2Институт лазерной физики СО РАН, Иркутск, Россия

APPLICATION OF CARBON QUANTUM DOTS TO NANOBIOTECHNOLOGIES

Marchuk V.I. [1], Tyutrin A.A. [1, 2]

[1]Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, marchuk.lera04@list.ru
[2]Institute of Laser Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Аннотация. Углеродные квантовые точки (УКТ) — перспективные наноматериалы с низкой токсичностью, высокой биосовместимостью, фотостабильностью и настраиваемой люминесценцией. Проведен синтез УКТ микроволновым методом из лимонной кислоты и карбамида. Исследованы спектральные свойства наночастиц (фотолюминесценция при 405 нм, влияние pH). Образцы МС-4 и МС-5 показали максимальную интенсивность люминесценции (550 нм). Изучено влияние УКТ на рост шпината и салата при поливе, фолиарной обработке и нанопрайминге. Нанопрайминг семян (3:7) обеспечил ускоренное прорастание и увеличение биомассы. Люминесцентная визуализация показала локализацию УКТ в проводящих пучках ксилемы. Спектральный анализ с помощью MicroTime 200 выявил два пика хлорофилла (685 и 740 нм); в группе УКТ интенсивность выше. Кинетика затухания показала близость времен жизни во всех группах, что свидетельствует об отсутствии тушения хлорофилла и сохранении фотосинтетической активности. Результаты демонстрируют потенциал УКТ как стимуляторов роста и флуоресцентных зондов.

Ключевые слова: углеродные квантовые точки, нанопрайминг, фотолюминесценция, биовизуализация растений, спектральный анализ.

Abstract. Carbon quantum dots (CQDs) are promising nanomaterials with low toxicity, high biocompatibility, photostability and tunable luminescence. CQDs were synthesized by the microwave-assisted method using citric acid and carbamide. Spectral properties (photoluminescence at 405 nm, pH effect) were investigated. Samples MC-4 and MC-5 showed maximum luminescence (550 nm). The effect of CQDs on spinach and lettuce growth under watering, foliar treatment and nanopriming was studied. Seed nanopriming (3:7) accelerated germination and increased biomass. Luminescence imaging revealed CQD localization in xylem vascular bundles. Spectral analysis on MicroTime 200 revealed two chlorophyll peaks (685 and 740 nm); the CQD group showed higher intensity. Decay kinetics showed similar lifetime values in all groups, indicating no chlorophyll quenching and preserved photosynthetic activity. The results demonstrate the potential of CQDs as growth stimulators and fluorescent probes.

Keywords: carbon quantum dots, nanopriming, photoluminescence, plant bioimaging, spectral analysis.

ВВЕДЕНИЕ

Современные нанобиотехнологии позволяют разрабатывать материалы с уникальными свойствами. Углеродные квантовые точки (УКТ) — наночастицы менее 10 нм — привлекают внимание исследователей благодаря яркой фотолюминесценции, растворимости в воде, низкой токсичности и биосовместимости [Кокорина и др., 2017; Baker, Baker, 2010]. В отличие от полупроводниковых квантовых точек с тяжелыми металлами, УКТ безопасны для живых организмов [Wang, Hu, 2014]. Имеющиеся данные свидетельствуют о способности УКТ проникать в растительные ткани и влиять на физиологические процессы [Li et al., 2022; Ali et al., 2024].

Целями данной работы являются: синтез УКТ с высокой яркостью люминесценции, изучение их оптических свойств и оценка влияния на рост растений (шпинат и парниковый салат) при различных способах введения: полив, фолиарная обработка и нанопрайминг семян, а также люминесцентная визуализация распределения УКТ в тканях растений и спектрально-кинетический анализ их взаимодействия с фотосинтетическим процессом.

2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Синтез углеродных квантовых точек

Синтез УКТ проводили микроволновым методом при мощности 900 Вт. В табл. 1 представлены условия синтеза шести образцов (МС-1 – МС-6). В качестве прекурсоров использовали лимонную кислоту и карбамид в различных соотношениях, в качестве растворителей — воду и муравьиный спирт. Добавка 2-аминофенола использовалась в образцах МС-3 и МС-5 для легирования азотом.

После синтеза все растворы очищали через мембранный фильтр (0.22 мкм). Люминесценцию возбуждали УФ-лазером (405 нм) и регистрировали с помощью спектрофлуориметра. Для образца МС-6 проводили корректировку pH добавлением раствора $NaHCO_3$ до значений 5, 6 и 7.

2.2. Биологические эксперименты

В работе использовали семена шпината (*Spinacia oleracea*) и парникового салата. Эксперименты включали:

1. Полив растений растворами УКТ, несинтезированным раствором и водой (контрольная группа).
2. Фолиарная обработка (опрыскивание листьев) раствором УКТ МС-6 (разведение 1:15).
3. Нанопрайминг — предпосевное замачивание семян в растворах УКТ (соотношения 1:9, 2:8, 3:7) в течение 12 ч с последующей высадкой в грунт.

Таблица 1. Условия синтеза углеродных квантовых точек

Образец	**Прекурсоры**	**Растворитель**	**Добавка**	**Длительность синтеза**
МС-1	Лимонная кислота (2 г) карбамид (4 г)	H_2O (20 мл)	-	5 циклов кипячения (доведение до кипения ×5)
МС-2	Лимонная кислота (1 г) карбамид (2 г)	Муравьиный спирт (10 мл)	-	5 циклов кипячения (доведение до кипения ×5)
МС-3	Лимонная кислота (1 г) карбамид (2 г)	H_2O (15 мл)	Аминофенол (кончик лезвия)	5 циклов кипячения (доведение до кипения ×5)
МС-4	Лимонная кислота (1 г) карбамид (2 г)	H_2O (20 мл)	-	2 минуты, однократно
МС-5	Лимонная кислота (1 г) карбамид (2 г)	H_2O (20 мл)	аминофенол (3 кончика лезвия)	2 минуты, однократно
МС-6	Лимонная кислота (1.5 г) карбамид (1.5 г)	H_2O (20 мл)	-	2 минуты, однократно

4. Фолиарная обработка с дополнительным облучением фитолампой: растения салата разделяли на три группы (контроль, прекурсоры, УКТ, 5 мл/0.5 л), обработку проводили на 4-е сутки после всходов в течение 12 дней. Ростовые параметры фиксировали на 4, 7, 10, 12 и 14-е сутки.

2.3. Люминесцентная микроскопия и спектральный анализ

Для визуализации распределения УКТ в растительных тканях использовали люминесцентный микроскоп «Микромед 3 Люм» (возбуждение УФ и синим светом). Спектры флуоресценции и кинетику затухания измеряли с помощью конфокального микроскопа PicoQuant MicroTime 200. Спектры регистрировали в диапазоне 500–850 нм, кривые затухания аппроксимировали трехэкспоненциальной моделью. Для фолиарной обработки с фитолампой спектры и кинетику измеряли на 12-й день после начала обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Спектральные свойства УКТ

Наибольшую интенсивность люминесценции имеют образцы МС-4 и МС-5 с максимумом эмиссии в области 550 нм (рис. 1). Добавление 2-аминофенола в МС-5 усилило свечение за счет легирования азотом, что согласуется с литературными данными [Magdy et al., 2023]. Образец МС-3 показал сдвиг максимума в длинноволновую область (580–600 нм). Образцы МС-1, МС-2 и МС-6 обладают умеренной интенсивностью люминесценции.

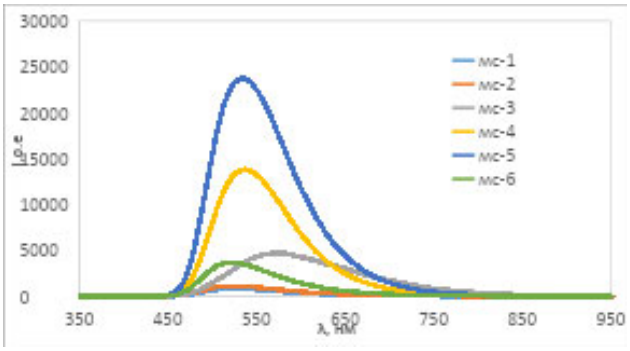

Рис. 1. Спектры люминесценции МС-1–МС-6, возбужденной излучением с длиной волны 405 нм

3.2. Влияние pH на люминесценцию УКТ

Для образца МС-6 исследовали влияние pH на интенсивность фотолюминесценции (рис. 2). Наибольшая интенсивность зафиксирована для исходного кислого раствора (без добавления соды). При нейтрализации до pH 5, 6 и 7 наблюдалось последовательное снижение интенсивности свечения. Положение максимума (520–530 нм) при этом сохранялось. Этот результат согласуется с данными [Хмелёва и др., 2022] о чувствительности люминесценции УКТ к протонированию/депротонированию поверхностных функциональных групп. Так же были измерены спектры поглощения (результат представлен на рис. 2) для полученных образцов. Пик в области 275 нм постепенно снижается за счет разрушения карбонильных групп УКТ, однако сами частицы не разрушаются [Liu et al., 2021].

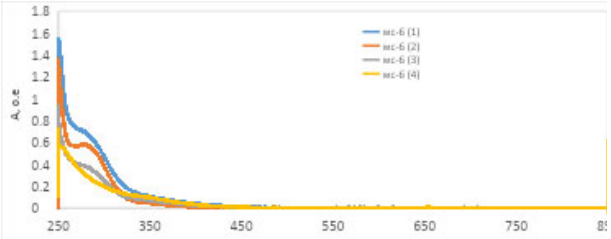

Рис. 2. Спектры поглощения УФ-видимого диапазона образцов УКТ МС-6 с разной степенью нейтрализации содой

3.3. Влияние УКТ на рост растений

Полив салата раствором УКТ (5 мл/1 л) обеспечил более раннюю всхожесть (со вторых суток) и интенсивный начальный рост побегов. Фолиарная обработка шпината (разведение 1:15) без нейтрализации pH привела к негативному эффекту (увядание). Во втором эксперименте с фолиарной обработкой под фитолампой группа УКТ превосходила контроль уже на 6-й день, что связано с преобразованием УФ-света в синий диапазон и активацией антиоксидантной системы [Chandra et al., 2014; Liang et al., 2025; Jangir et al., 2025].

Наиболее выраженный положительный эффект получен при нанопрайминге —предпосевном замачивании семян на 12 ч в растворах УКТ. Образцы, замоченные в концентрации 3 мл УКТ + 7 мл воды, превосходили контроль по всхожести, длине побега и площади листьев. Несинтезированный раствор прекурсоров значимого эффекта не дал.

3.4. Люминесцентная визуализация и спектральный анализ

Для подтверждения проникновения УКТ в ткани проведена люминесцентная микроскопия листьев салата после фолиарной обработки (рис. 3). В контроле видно только красное свечение хлорофилла. В группе УКТ интенсивность красной флуоресценции визуально выше, что согласуется с данными об усилении свечения хлоропластов [Щербёнок и др., 2025; Liang et al., 2025].

Спектральный анализ с помощью MicroTime 200 выявил во всех группах два основных пика флуоресценции хлорофилла — в областях 685 и 740 нм (рис. 4), что соответствует литературным данным [Peterson et al., 2001; Buschmann, 2007]. Первый пик (685 нм) связан с фотосистемой II, второй (740 нм) — с фотосистемой I. В группе УКТ общая интенсивность флуоресценции выше, что может свидетельствовать об увеличении содержания хлорофилла [Chandra et al., 2014; Chowmasundaram et al., 2023]. Отсутствие дополнительных пиков указывает на отсутствие нарушений фотосинтетического процесса.

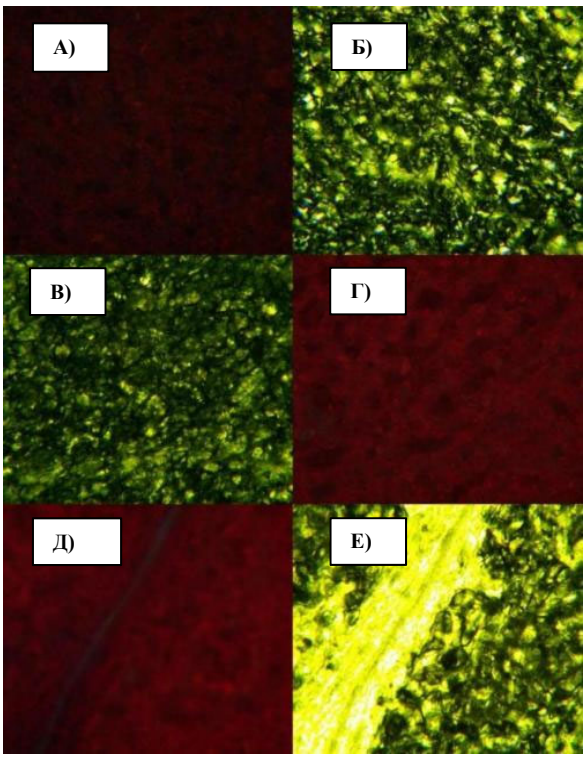

Рис. 3. Микрофотографии (с 10-кратным увеличением) листа парникового салат после фолиарной обработки и воздействия фитолампы на 12-й день после обработки: А) люминесценция — флуоресценция хлорофилла (контрольная группа); Б) световое поле — общее очертание ткани (контрольная группа); В) световое поле — общее очертание ткани (раствор прекурсоров); Г) люминесценция — флуоресценция хлорофилла (раствор прекурсоров); Д) световое поле — общее очертание ткани (УКТ); Е) люминесценция — флуоресценция хлорофилла (УКТ)

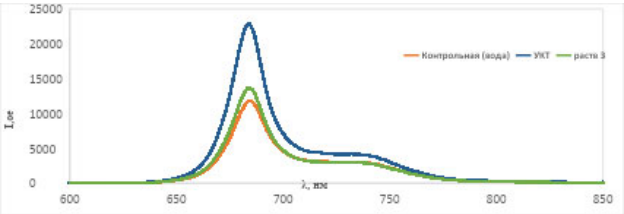

Рис. 4. Спектры флуоресценции листа парникового салата

Анализ кинетики затухания (рис. 5) показал близость времен жизни во всех группах: $\tau_1 \approx 1.8–2.0$ нс, $\tau_2 \approx 0.86–0.94$ нс, $\tau_3 \approx 0.39–0.40$ нс. Трехэкспоненциальная аппроксимация стандартна для хлорофилла in vivo [Schmuck, Moya, 1994]. Близость значений свидетельствует об отсутствии тушения, сохранении активности фотосинтеза и подтверждает, что УКТ не агрегируют и остаются фотостабильными [Liang et al., 2025; Chowmasundaram et al., 2023].

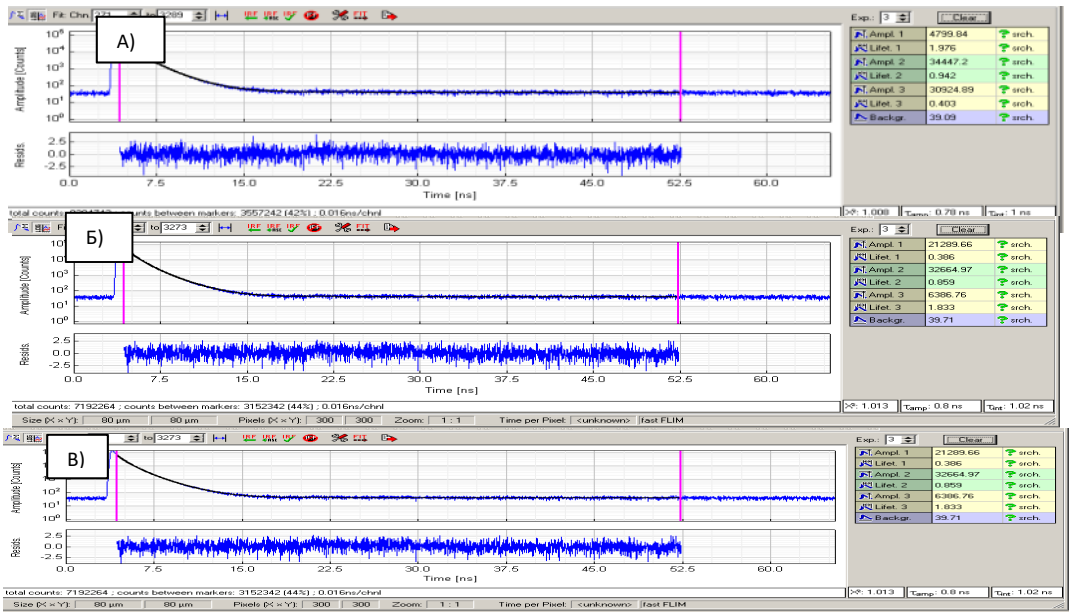

Рис. 5. Кинетика затухания флуоресценции листа парникового салата: А) контроль; Б) прекурсоры; В) УКТ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптические свойства. Образцы МС-4 и МС-5 обладают наибольшей интенсивностью люминесценции (максимум 550 нм). Добавление 2-аминофенола усиливает свечение. Люминесценция чувствительна к pH: нейтрализация снижает интенсивность, но повышает биосовместимость.

Влияние на рост растений. Нанопрайминг семян (особенно 3:7) обеспечивает ускоренное прорастание и увеличение биомассы. Полив (5 мл/1 л) дает раннюю всхожесть. Фолиарная обработка без нейтрализации неэффективна, но с фитолампой стимулирует рост.

Люминесцентная визуализация и спектральный анализ. Подтверждено проникновение УКТ в проводящие пучки листа и стебля. Спектральный анализ и кинетика затухания показали, что УКТ не вредят фотосинтетическому процессу, не агрегируют в тканях и остаются фотостабильными.

Перспективы: оптимизация pH и концентрации, время-разрешенная микроскопия in vivo, апробация на других культурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кокорина А.А., Приходченко Е.С., Сухоруков Г.Б. и др. Люминесцентные углеродные наночастицы: синтез, методы исследования, применение // Успехи химии. 2017. Т. 86, № 11. С. 1157–1171.

Хмелёва М.Ю., Степанов П.Ю., Павлов А.А. Влияние pH на свойства углеродных точек с различной поверхностной функционализацией: размер и квантовый выход фотолюминесценции // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128, № 3. С. 412–418.

Baker S.N., Baker G.A. Luminescent Carbon Nanodots: Emergent Nanolights // Angewandte Chemie International Edition. 2010. V. 49, N 38. P. 6726–6744.

Buschmann C. Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves // Photosynthesis Research. 2007. V. 92, N 2. P. 261–271.

Chandra S., Pradhan S., Mitra S., et al. High throughput electron transfer from carbon dots to chloroplast: a rationale of enhanced photosynthesis // Nanoscale. 2014. V. 6, N 7. P. 3647–3655.

Chowmasundaram Y.A.P., Tan T.L., Nulit R., et al. Recent developments, applications and challenges for carbon quantum dots as a photosynthesis enhancer in agriculture // RSC Advances. 2023. V. 13, N 36. P. 25093–25117.

Jangir M.M., et al. Foliar application of nano Urea enhances vegetative growth of Arabidopsis thaliana over equimolar bulk urea // Plant Growth Regulation. 2025. V. 105. P. 833–859.

Liang F.W., Chen J.Y., He J.L., et al. Facilely prepared N-modified carbon quantum dots as microalgal photosynthesis promoters for wastewater treatment // Journal of Environmental Management. 2025. V. 390. P. 126404.

Magdy G., Belal F., Elmansi H. Rapid microwave-assisted synthesis of nitrogen-doped carbon quantum dots as fluorescent nanosensors // RSC Advances. 2023. V. 13. P. 4156–4167.

Peterson R.B., Oja V., Laisk A. Chlorophyll fluorescence at 680 and 730 nm and leaf photosynthesis // Photosynthesis Research. 2001. V. 70, N 2. P. 185–196.

Wang Y., Hu A. Carbon quantum dots: synthesis, properties and application // Journal of Materials Chemistry C. 2014. V. 2, N 34. P. 6921–6939.

Щербёнок С.В., Лисина Т.Н., Елисеев С.Л., Каракайтис Д.Ю. Влияние дополнительного УФ-А-облучения на некоторые биохимические и морфометрические показатели картофеля // Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции. 2025. Т. 186, № 3. С. 150–162.

Schmuck G., Moya I. Time-resolved chlorophyll fluorescence spectra of intact leaves // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 47, N 1. P. 72–76. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90130-9.