

Полная исследовательская публикация Тематический раздел: Физико-химические исследования.
Утверждённая научная специальность ВАК: 1.4.4. Физическая химия; 1.4.14. Кинетика и катализ;
2.6.10. Технология органических веществ
Идентификатор ссылки на объект – ROI: jbc-01/26-86-6-14
Цифровой идентификатор объекта – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14
УДК 533.34; 535.372; 620.3. Поступила в редакцию 15 мая 2026 г.

Фотодеградация гибридной селенсодержащей наносистемы на основе фотосенсибилизатора хлоринового ряда

© Валуева Светлана Валерьевна,*[†] Морозова Полина Юрьевна,
Чернова Людмила Михайловна, Осипенко Александра Александровна,
Боровикова Людмила Николаевна, Жукова Елена Валерьевна

Филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» – Институт высокомолекулярных соединений. г. Санкт-Петербург, 199004. Россия.
Тел.: +7 (812) 328-85-03. E-mail: svalu67@mail.ru

*Ведущий направление; [†]Поддерживающий переписку

Ключевые слова: селенсодержащая наносистема, Радахлорин[®], константа фотодеградации, время полужизни, диаметр наночастицы селена, ширина запрещенной зоны.

Аннотация

Фотодинамическая терапия представляет собой перспективный и минимально инвазивный подход к лечению как доброкачественных, так и злокачественных опухолей. Механизм действия фотодинамической терапии основан на селективном накоплении фотосенсибилизатора в опухолевой ткани после его введения. При облучении фотосенсибилизатор поглощает световую энергию, запуская образование активных форм кислорода, которые целенаправленно уничтожают раковые клетки. В России для фотодинамической терапии и флуоресцентной диагностики в качестве фотосенсибилизатора часто используют Радахлорин[®]. Однако в растворах Радахлорина[®] обнаруживается деградация под действием света, что можно регистрировать по снижению начального оптического поглощения и интенсивности люминесценции. В настоящей работе методами УФ/видимой спектроскопии и люминесценции была изучена фотодеградация многокомпонентного фотосенсибилизатора (ФС-Se⁰) – селенсодержащей наносистемы на основе Радахлорина[®]. Установлено влияние длительности облучения на оптическую плотность и интенсивность люминесценции. Показано, что в отличие от свободного фотосенсибилизатора, фотосенсибилизатор в составе наносистемы не демонстрирует полной фотодеградации в течение всего времени эксперимента. Данное различие может быть объяснено стабилизирующим эффектом наночастиц селена порфиринового кольца Радахлорина[®]. На основании спектральных данных для фотосенсибилизатора в свободном и связанном состоянии были рассчитаны значения констант фотодеградации, времена полужизни, величины ширины запрещенной зоны (минимальной энергии, необходимой для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости) и диаметра наночастиц селена. Анализ данных по параметрам ширины запрещенной зоны и диаметра наночастиц селена показал, что эти параметры остаются неизменными вне зависимости от продолжительности облучения. Это наблюдение позволяет предположить эффективную экранировку селенового ядра полимером, что указывает на отсутствие влияния фотодеградации на внутреннюю структуру гибридной наносистемы ФС-Se⁰. Обнаружено, что свободный Радахлорин[®] демонстрирует большее время полужизни по сравнению со связанным фотосенсибилизатором, что обусловлено «эффектом тяжелого атома» селена, входящего в состав наносистемы ФС-Se⁰.

Выходные данные для цитирования русскоязычной печатной версии статьи:

Валуева С.В., Морозова П.Ю., Чернова Л.М., Осипенко А.А., Боровикова Л.Н., Жукова Е.В. Фотодеградация гибридной селенсодержащей наносистемы на основе фотосенсибилизатора хлоринового ряда. *Бутлеровские сообщения*. 2026. Т.86. №6. С.14-24. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14

Выходные данные для цитирования русскоязычной электронной версии статьи:

Валуева С.В., Морозова П.Ю., Чернова Л.М., Осипенко А.А., Боровикова Л.Н., Жукова Е.В. Фотодеградация гибридной селенсодержащей наносистемы на основе фотосенсибилизатора хлоринового ряда. *Бутлеровские сообщения* А. 2026. Т.13. №2. Id.14. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14/ROI-jbc-A/26-13-2-14 (Russian)

The output for citing the English online version of the article:

Svetlana V. Valueva, Polina Yu. Morozova, Lyudmila M. Chernova, Alexandra A. Osipenko, Lyudmila N. Borovikova, Elena V. Zhukova. Photodegradation of the hybrid selenium-containing nanosystem based on the chloride series photosensitizer. *Butlerov Communications A*. 2026. Vol.13. No.2. Id.14. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14/ROI-jbc-A/26-13-2-14

Литература

- [1] S.B. Brown, E.A. Brown, I. Walker. The present and future role of photodynamic therapy in cancer treatment. *The Lancet Oncology*. **2004**. Vol.5. No.8. P.497-508. DOI:10.1016/S1470-2045(04)01529-3
- [2] J.H. Correia, J.A.Rodrigues, S. Pimenta, T. Dong, Zh. Yang. Photodynamic therapy review: Principles, photosensitizers, applications, and future directions. *Pharmaceutics*. **2021**. Vol.13. No.9. P.1332. DOI:10.3390/pharmaceutics13091332
- [3] W. Jiang, M. Liang, Q. Lei, G. Li, S. Wu. The current status of photodynamic therapy in cancer treatment. *Cancers (Basel)*. **2023**. Vol.15. No.3. P.585. DOI: 10.3390/cancers15030585
- [4] D. Aebisher, S. Czech, K. Dynarowicz, M.K. Misiólek Komosińska-Vassev, A. Kawczyk-Krupka, D. Bartusik-Aebisher. Photodynamic therapy: Past, current, and future. *International Journal of Molecular Sciences*. **2024**. Vol.25. No.20. P.11325. DOI: 10.3390/ijms252011325
- [5] AV. Dadeko, L. Lilge, P. Kaspler, T.D. Murav'eva, A.M. Starodubtcev, V.M. Kiselev, V.V. Zarubaev., G.V. Ponomarev. Photophysical properties and *in vitro* photocytotoxicity of disodium salt 2.4-di (alpha-methoxyethyl)-deuteroporphyrin-IX (Dimagine). *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. **2018**. Vol.25. P.35-42. DOI:10.1016/j.pdpdt.2018.11.006
- [6] Муравьева Т.Д., Дадеко А.В., Киселев В.М., Крисько Т.К., Кисляков И.М., Крисько А.В., Стародубцев А.М., Багров И.В., Белоусова И.М., Пономарев Г.В. Сравнительное изучение фотофизических свойств низкотоксичных фотосенсибилизаторов на основе эндогенных порфиринов. *Оптический журнал*. **2018**. Т.85. №11. С.65-80. DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-11-65-80 [T.D. Murav'eva, A.V. Dadeko, V.M. Kiselev, T.K. Kris'ko, I.M. Kislyakov, A.V. Kris'ko, A.M. Starodubtsev, I.V. Bagrov, I.M. Belousova, G.V. Ponomarev. Comparative study of the photophysical properties of low-toxicity photosensitizers based on endogenous porphyrins. *Optical Journal*. **2018**. Vol.85. No.11. P.65-80. (Russian)]
- [7] Pr. Fróes Sebbe-Santos, P. Miquilini, J.G. Pinto, Pr.F. Campos de Menezes, J. Ferreira. Adverse effects of topical photodynamic therapy in rosacea. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. **2024**. Vol.45. P.103871.
- [8] Валуева С.В., Морозова П.Ю., Вылегжанина М.Э., Чернова Л.М., Боровикова Л. Н. Сравнительное исследование фотодегградации растворов свободного и связанного радахлорина. *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*. **2026**. Т.19. №1. С.106-120. <https://doi.org/10.18721/JPM.19109> [S.V. Valueva, P.Yu. Morozova, M.E. Vylegzhanina, L.M. Chernova, L.N. Borovikova. A comparative study of the photodegradation of solutions of free and bound radachlorin. *Scientific and Technical Journal of St. Petersburg State Polytechnical University. Physical and Mathematical Sciences*. **2026**. Vol.19. No.1. P.106-120. (Russian)]
- [9] Валуева С.В., Вылегжанина М.Э., Боровикова Л.Н., Иванов И.В., Якиманский А.В. Влияние топологии молекулярной щетки на стабилизацию наночастиц серебра и селена в водных нанодисперсиях: спектральные и структурно-морфологические характеристики. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. **2023**. №12. С.113-122. <https://doi.org/10.31857/S1028096023080149> [S.V. Valueva, M.E. Vylegzhanina, L.N. Borovikova, I.V. Ivanov, A.V. Yakimansky. The influence of molecular brush topology on the stabilization of silver and selenium nanoparticles in aqueous nanodispersions: spectral and structural-morphological characteristics. *Surface. X-ray, Synchrotron and Neutron Studies*. **2023**. No.12. P.113-122. (Russian)]
- [10] S., Bai, M. Zhang, Sh. Tang, M. Li, R. Wu, S. Wan, L. Chen, X. Sh. A Review. *Molecules*. **2025**. Vol.30. No.1. P.50.
- [11] Валуева С.В., Боровикова Л.Н. Самоорганизация, морфология и термодинамические характеристики селенсодержащих наноструктур на основе сильных поликислот. *Бутлеровские сообщения*. **2010**. Т.20. №5. С.52-61. [S.V. Valueva, L.N. Borovikova. Self-organization, morphology, and thermodynamic characteristics of selenium-containing nanostructures based on strong polyacids. *Butlerov Communications*. **2010**. Vol.20. No.5. P.52-61. (Russian)]
- [12] A. Khalid, P.A. Tran, R. Norello, D.A. Simpson, A.J. O'Connor, S. Tomljenovic-Hanic. Intrinsic fluorescence of selenium nanoparticles for cellular imaging applications. *Nanoscale*. **2016**. Vol.8. No.6. P.3376-3385. <https://doi.org/10.1039/C5NR08771F>
- [13] Валуева С.В., Боровикова Л.Н., Краснопева Е.Л., Меленевская Е.Ю., Якиманский А.В. Спектральные характеристики селенсодержащих гибридных наноконплексов на основе фотодитазина и целлюлозного полимерного носителя. *Журнал прикладной спектроскопии*. **2024**. Т.91. №4. С.519-525. [S.V. Valueva, L.N. Borovikova, E.L. Krasnopeeva, E.Yu. Melenevskaya, A.V. Yakimansky. Spectral characteristics of selenium-containing hybrid nanocomplexes based on photoditazine and a cellulose polymer carrier. *Journal of Applied Spectroscopy*. **2024**. Vol.91. No.4. P.519-525. (Russian)]

- [14] S.V. Valueva, L.N. Borovikova, M.E. Vylegzhanina. Effect of a polymer stabilizer's structure on the spectral and morphological characteristics of radachlorine in selenium-containing nanosystems. *Russian Journal of Physical Chemistry. A*. **2025**. Vol.99. No.8. P.1866-1875.
- [15] S.V. Valueva, L.N. Borovikova, A.Ya. Volkov, E.L. Krasnopeeva, I.V. Ivanov, A.V. Yakimansky. Synthesis and study of binary and ternary selenium-containing nanodispersions based on amphiphilic molecular brushes and Photoditazine. *Russian Chemical Bulletin*. **2025**. Vol.74. No.8. P.2449-2458.
<https://doi.org/10.1007/s11172-025-4725-0>
- [16] A. Akhmetzhan., N. Myrzakhmetova, N. Amangeldi, Zh. Kuanyshova, N. Akimbayeva, S. Dosmaganbetova, Zh. Toktarbay, S.N. Longinos. A short review on the *N,N*-dimethylacrylamide-based hydrogels. *Gels*. **2021**. Vol.7. No.4. P.234. DOI:10.3390/gels7040234
- [17] S.V. Valueva, E.L. Krasnopeeva, L.N. Borovikova, P.Yu. Morozova., M.P. Sokolova., E.Yu . Melenevskaya., A.V. Yakimansky. Triple nanosystems based on amphiphilic molecular brushes, selenium nanoparticles and photosensitizer: Synthesis, spectral and morphological characteristics. *Nanobiotechnology Reports*. **2024**. Vol.19. No.1. P.108-115. DOI:10.1134/S2635167623601250
- [18] M.V. Lesnichaya., R. Shendrik, B.G. Sukhov. Relation between excitation dependent luminescence and particle size distributions for the selenium nanoparticles in κ -carrageenan shell. *J. Lumin.* **2019**. Vol.211. P.305-313.
- [19] L. Brus. Electronic wave functions in semiconductor clusters: Experiment and theor. *J. Phys. Chem.* **1986**. Vol.90. No.12. P.2555-2560.
- [20] R.B. Vasiliev, D.N. Dirin, A.M. Gaskov. Semiconductor nanoparticles with spatial separation on charge carriers: synthesis and optical properties. *Russian Chemical Reviews*. **2011**. Vol.80. No.12. P.1139-1158. DOI:10.1070/RC2011v080n12ABEH004240
- [21] V.V. Sharoyko, O.V. Mikolaichuk, O.S. Shemchuk, A.O.E. Abdelhalim, A.A. Potanin, M.D. Luttsev, D.R. Dadadzhyanov, T.A. Vartanyan, A.V. Petrov, *et al.* Novel non-covalent conjugate based on graphene oxide and alkylating agent from 1,3,5-triazine class. *Journal of Molecular Liquids*. **2023**. Vol.372. P.121203. DOI:10.1016/j.molliq.2023.121203
- [22] M.E. Alberto, B.C. De Simone, E. Sicilia, *et al.* Rational Design of Modified Oxobacteriochlorins as Potential Photodynamic Therapy Photosensitizers. *International Journal of Molecular Sciences*. **2019**. Vol.20. No.8. P.2002. DOI:10.3390/ijms20082002
- [23] A.V. Dadeko, T.D. Murav'eva, A.M. Starodubtsev, S.I. Gorelov, *et al.* Photophysical properties of porphyrin photosensitizers. *Optics and Spectroscopy*. **2015**. Vol.119. No.4. P.633-637.
<https://doi.org/10.1134/S0030400X15100094>
- [24] S. Selim, Y.A. Hamoud, S.M. El-Sayed, M.T. Alharbi, *et al.* Novel royal jelly-mediated green synthesis of selenium nanoparticles and their multifunctional biological activities. *Nanotechnology Reviews*. **2025**. Vol.14. No.1. P.20250242. <https://doi.org/10.1007/s00210-026-05639-5>
- [25] E. Piacenza, A. Presentato, B. Heyne, R.J. Turner Tunable photoluminescence properties of selenium nanoparticles: biogenic versus chemogenic synthesis. *Nanophotonics*. **2020**. Vol.9. No.11. P.3615-3628. DOI:10.1515/nanoph-2020-0239
- [26] Svetlana V. Valueva, Polina Yu. Morozova, Lyudmila M. Chernova, Alexandra A. Osipenko, Lyudmila N. Borovikova, Elena V. Zhukova. Photodegradation of the hybrid selenium-containing nanosystem based on the chloride series photosensitizer. *Butlerov Communications A*. **2026**. Vol.13. No.2. Id.14. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14/ROI-jbc-A/26-13-2-14
- [27] Валуева С.В., Морозова П.Ю., Чернова Л.М., Осипенко А.А., Боровикова Л.Н., Жукова Е.В. Фотодеградация гибридной селенсодержащей наносистемы на основе фотосенсибилизатора хлоринового ряда. *Бутлеровские сообщения А*. **2026**. Т.13. №2. Id.14. DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14/ROI-jbc-A/26-13-2-14 (Russian)

The English version of the article has been published in the international edition of the journal

Butlerov Communications A
Advances in Organic Chemistry & Technologies

The Reference Object Identifier – ROI-jbc-A/26-13-2-14

The Digital Object Identifier – DOI: 10.37952/ROI-jbc-01/26-86-6-14/ROI-jbc-A/26-13-2-14

Photodegradation of the hybrid selenium-containing nanosystem based on the chloride series photosensitizer

**Svetlana V. Valueva,^{*,+} Polina Yu. Morozova, Lyudmila M. Chernova,
 Alexandra A. Osipenko, Lyudmila N. Borovikova, Elena V. Zhukova**

*Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute Named by B.P. Konstantinov of National Research Centre
 "Kurchatov Institute" – Institute of Macromolecular Compounds, Saint-Petersburg, 199004, Russia.
 Phone: +7 (812) 328-85-03. E-mail: svalu67@mail.ru*

^{*}Supervising author; ⁺Corresponding author

Keywords: selenium-containing nanosystem, Radachlorine®, photodegradation constant, half-life, selenium nanoparticle diameter, band gap.

Abstract

Photodynamic therapy is a promising and minimally invasive approach to the treatment of both benign and malignant tumors as well. A mechanism of action of photodynamic therapy is based on the selective accumulation of the photosensitizer in the tumor tissue after its administration. When irradiated, the photosensitizer absorbs light energy, triggering formation of the reactive oxygen species that purposefully destroy cancer cells. In Russia, Radachlorin® is often used as a photosensitizer for photodynamic therapy and fluorescence diagnostics. However, degradation under influence of light is detected in Radachlorin® solutions, which can be detected by reducing the initial optical absorption and luminescence intensity. In this work, photodegradation of the multicomponent photosensitizer (FS-Se⁰) of the selenium-containing nanosystem based on Radachlorine® was studied using UV/visible spectroscopy and luminescence. The effect of the irradiation duration on the optical density and luminescence intensity has been established. It is shown that, unlike a free photosensitizer, the photosensitizer in the nanosystem does not demonstrate complete photodegradation during the entire time of the experiment. This difference can be explained by the stabilizing effect of the selenium nanoparticles of the porphyrin ring of Radachlorin®. Based on the spectral data for the photosensitizer in the free and bound state, the values of photodegradation constants, half-lives, band gap (the minimum energy required for the electron to pass from the valence band to the conduction band), and the diameter of the selenium nanoparticles were calculated. Analysis of data on the parameters of the band gap and diameter of the selenium nanoparticles showed that these parameters remain unchanged regardless of duration of irradiation. This observation suggests that the selenium core is effectively shielded by a polymer, that indicates that photodegradation does not affect the internal structure of the FS-Se⁰ hybrid nanosystem. It was found that free Radachlorin® exhibits a longer half-life compared to the bound photosensitizer, that is due to the "heavy atom effect" of selenium, which is a part of the PS-Se⁰ nanosystem.