

Научная статья

УДК 541.64:544.77:532.77:620.186

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19109>


СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОДЕГРАДАЦИИ РАСТВОРОВ СВОБОДНОГО И СВЯЗАННОГО РАДАХЛОРИНА

С. В. Валуева^{1,2} , П. Ю. Морозова^{1,2}, М. Э. Вылегжанина¹,

Л. М. Чернова¹, Л. Н. Боровикова¹

¹ Филиал НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ – ИВС, Санкт-Петербург, Россия;

² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии имени Н. Н. Петрова,
Санкт-Петербург, Россия;

 svalu67@mail.ru

Аннотация. Методами УФ/видимой спектроскопии, атомно-силовой микроскопии и люминесценции проведены сравнительные исследования фотодеградации свободного фотосенсибилизатора – радахлорина и радахлорина в составе трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы (ФС-2) на основе амфифильной молекулярной щетки (АМЩ) с целлюлозной основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты (связанного радахлорина). Установлено влияние длительности светового облучения на оптическую плотность и интенсивность люминесценции радахлорина в обоих состояниях. Обнаружено, что АМЩ препятствуют ассоциации наночастиц селена в растворе, образуя до облучения дискретные сферические наноструктуры. После облучения в течение 60 мин наноструктуры приобретают эллипсоидальную форму; кроме того, наблюдается тенденция к их ассоциации. На основании спектральных данных для ФС-2 до и после облучения рассчитаны значения ширины запрещенной зоны и диаметра наночастиц селена.

Ключевые слова: селенсодержащая наносистема, радахлорин, фотодеградация, наночастица, наноструктура, морфология, ширина запрещенной зоны

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 24-25-00413 «Разработка новых селенсодержащих противоопухолевых препаратов для фотодинамической терапии»).

Для цитирования: Валуева С. В., Морозова П. Ю., Вылегжанина М. Э., Чернова Л. М., Боровикова Л. Н. Сравнительное исследование фотодеградации растворов свободного и связанного радахлорина // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2026. Т. 19. № 1. С. 106–120. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19109>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19109>


THE PHOTODEGRADATION OF THE FREE AND BOUND RADACHLORIN SOLUTIONS: A COMPARATIVE STUDY

S. V. Valueva^{1,2} , P. Yu. Morozova^{1,2}, M. E. Vylegzhanina¹,

L. M. Chernova¹, L. N. Borovikova¹

¹ NRC “Kurchatov Institute” – PNPI – IMC, St. Petersburg, Russia;

² National Medical Research Center of Oncology named after N. N. Petrov,
St. Petersburg, Russia;

 svalu67@mail.ru

Abstract. The comparative photodegradation studies of a free photosensitizer Radachlorine and Radachlorine being a part of the triple selenium-containing nanosystem (PS-2) based on the amphiphilic molecular brush (AMB) with a cellulose backbone and side chains of polymethacrylic acid (bound Radachlorine) have been performed using UV/visible spectroscopy, atomic force microscopy, and luminescence. The effect of the light exposure time on the optical density and luminescence intensity of Radachlorine in both states was established. The AMBs were found to hinder the association of selenium nanoparticles in the solution forming discrete spherical nanostructures before irradiation. But the nanostructures acquired an ellipsoidal shape after 60 min exposure; in addition, there was a tendency towards their association. On the basis of the UV/visible spectroscopy data for the PS-2 obtained before and after irradiation, the values of the band gap energy and diameter of the selenium nanoparticles were calculated.

Keywords: selenium-containing nanosystem, Radachlorine, photodegradation, nanoparticle, nanostructure, morphology, band gap energy

Funding: The work was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 24-25-00413 “Development of new selenium-containing anticancer drugs for photodynamic therapy”).

For citation: Valueva S. V., Morozova P. Yu., Vylegzhaniina M. E., Chernova L. M., Borovikova L. N., The photodegradation of the free and bound Radachlorin solutions: A comparative study, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 19 (1) (2026) 106–120. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.19109>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

Фотодинамическая терапия – это перспективный малоинвазивный метод лечения доброкачественных и злокачественных опухолей. Применение этого метода в сочетании с химиотерапией, ионизирующим излучением или хирургическим вмешательством позволяет повысить эффективность лечения болезней онкологического профиля. В отличие от радиотерапии и хирургического вмешательства, фотодинамическую терапию можно проводить многократно, причем на одном и том же участке тела пациента [1 – 5]. Этот метод основан на накоплении фотосенсибилизатора (ФС) в злокачественной ткани после его введения [5 – 7]. ФС поглощает световую энергию и индуцирует выработку активных форм кислорода в среде опухоли, которые убивают опухолевые клетки [1 – 4, 8]. Еще с 1998 года ФС первого поколения – фотогем разрешен Министерством здравоохранения Российской Федерации для медицинского применения [9]. Однако ряд проблем, связанных с использованием этого ФС, таких как повышенная светочувствительность кожи и плохое поглощение красного света, которое должно проникать в ткани, привели к разработке новых ФС с более благоприятными свойствами. ФС второго поколения характеризуются более короткими периодами фотосенсибилизации, более длинными волнами активации (и, следовательно, активируются в более глубоких тканях), более высокими значениями выхода синглетного кислорода и селективностью к опухолям.

Представителями ФС второго поколения, производимыми в России, являются радахлорин и фотодитазин (фармацевтические компании «Рада-Фарма» и «Вета-Гранд», соответственно). В России указанные препараты используют в клинических исследованиях фотодинамической терапии при злокачественных опухолях кожи, полости рта, гортани, желудка, бронхов, пищевода, вульвы и других [10, 11]. Однако большинство ФС не обладают фотостабильностью [2, 12]. В растворах ФС обнаруживают деградацию под действием света, что можно регистрировать по снижению их начального оптического поглощения и интенсивности люминесценции [2, 13]. При этом активным элементом, разрушающим молекулы ФС при световом облучении, выступает синглетный кислород, и в этом случае речь идет о корреляции процесса фотодеградациии с эффективностью генерации синглетного кислорода; другими словами, чем выше выработка синглетного

кислорода, тем интенсивнее протекает процесс окисления ФС, способствующий ускорению фотодеградации.

В качестве ФС в настоящей работе использовался радахлорин – многокомпонентный препарат хлоринового ряда (российский препарат, широко применяемый в медицине в противоопухолевой терапии).

Радахлорин имеет следующий процентный состав [14, 15]:

Соединение	Содержание, %
хлорин е6	80 – 90
пурпурин 5	5 – 20
пурпурин 18	0 – 15
хлорин р6	0 – 15

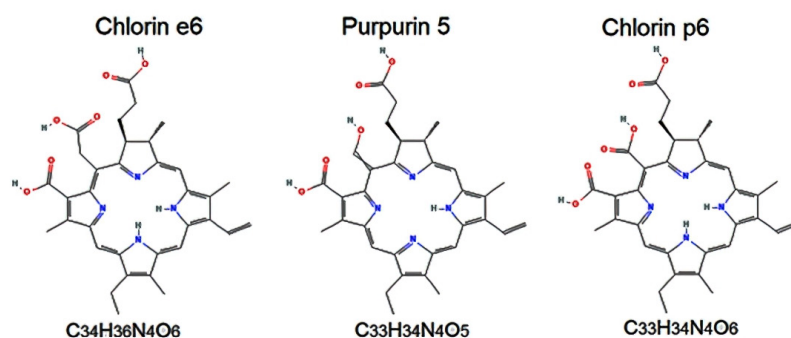


Рис. 1. Структурные и химические формулы солей, входящих в состав радахлорина

Химические и структурные формулы солей, входящих в состав радахлорина, представлены на рис. 1. В качестве дополнительного ингредиента использовали гидрофобные наночастицы селена Se^0 . Физико-химические свойства селена становятся особенно полезными при уменьшении размера частиц селена до наноуровня, в диапазоне от 1 до 100 нм. В указанном диапазоне значение отношения поверхности наночастицы к ее объему делается большим, увеличиваются ее поверхностная энергия и пространственные ограничения, что повышает эффективность ее физико-химического и медико-биологического действия, по сравнению с объемными материалами [16]. Так, например, селен проявляет высокую противоопухолевую активность [17 – 20]. Следует, помимо этого, отметить, что наноконкомпозиты селена, полученные разными способами и исследованные на данный момент, по всей видимости, отвечают критериям, необходимым для биомедицинских приложений *in vitro* и *in vivo*, являясь биосовместимыми, биоразлагаемыми и фотостабильными [21], тогда как прочие органические флуоресцентные соединения лишь частично удовлетворяют указанным требованиям [22]. В связи с этим особый интерес для стабилизации наночастиц селена (с целью решения задачи модификации ФС) и изучения оптических/фотолюминесцентных свойств селеносодержащих наносистем представляют амфифильные молекулярные щетки, которые имеют в своем составе функциональные группы с различным сродством к полярным и неполярным растворителям [21 – 25]. В данном случае можно предвидеть, что используемые полимерные стабилизаторы повлияют на размерные характеристики и оптические свойства селеносодержащих наносистем.

В качестве полимерного стабилизатора в данной работе использовалась амфифильная молекулярная щетка с гидрофобной основной целлюлозной цепью и гидрофильными боковыми цепями полиметакриловой кислоты [26], с молекулярной массой, равной 36400 Да и плотностью прививки боковых цепей, составляющей 100%. Этот полимерный стабилизатор сохраняет свои характеристики при комнатной температуре, обладает свойствами полиамфолита и имеет двойственную природу; при значительном количестве боковых цепей и высокой частоте прививки он способен включать медикаментозные вещества в зону, непроницаемую для воды, благодаря гидрофобным взаимодействиям. Такие полимерные стабилизаторы целесообразно использовать для адресной доставки гидрофобных лекарственных препаратов [26 – 28]. Применение полимерных стабилизаторов

с высокой степенью прививки боковых групп для фиксации наночастиц позволяет расширить набор физических, химических, а также медицинских и биологических характеристик полученных нанобъектов, а также внести разнообразие в этот набор.

Целью данной работы были анализ морфологии и сравнение спектров поглощения/люминесценции как свободного радахлорина (ФС-1), так и радахлорина, входящего в состав трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы (ФС-2), для выяснения влияния структуры этого фотосенсибилизатора на процесс его фотодеградации.

Экспериментальная часть

Световое облучение образцов. В качестве меры фотодеградации мы использовали изменение спектров оптического поглощения и люминесценции. Для этого экспериментального исследования было собрано специальное осветительное устройство с использованием светоизлучающего диода (рис. 2). Количество поглощенных фотонов, необходимое для преобразования фиксированного количества сенсибилизатора, выступает важным параметром для сравнения различных фотосенсибилизаторов, ввиду их фотодинамической эффективности [29, 30].

Растворы фотосенсибилизаторов облучали светодиодной матрицей 3 с длиной волны 405 нм и мощностью 1,8 Вт. Фотография и схема установки, используемой при облучении исследуемых растворов, представлена на рис. 2. Образцы жидкости заливали в кварцевые кюветы 2 (10 × 10 × 10 мм), которые после облучения помещали в измерительные отсеки приборов для измерения спектров оптического поглощения раствора и его спектров люминесценции.

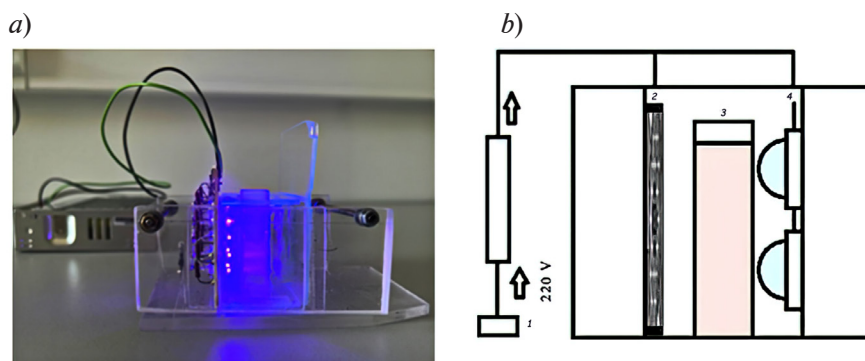


Рис. 2. Фотография (а) и принципиальная схема (b) установки для облучения растворов: 1 – источник питания; 2 – алюминиевое зеркало, 3 – кварцевая кювета с раствором, 4 – светодиодная матрица, составленная из 10 светодиодов марки BL-L522VC (длина волны 405 нм, суммарная мощность 1,8 Вт)

Синтез трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы. Указанный синтез фотосенсибилизатора проводили в стерильных условиях, которые обеспечивали асептичность полученных систем. Вся использованная посуда предварительно была автоклавирована при 121°C и 1,1 атм (автоклав фирмы “Mocom”, Италия). В качестве растворителя для приготовления всех ингредиентов использовалась вода для инъекций буфус (фармкомпания “Renewal”, Россия).

Первый этап синтеза. В реакционную колбу емкостью 20 мл наливали 5 мл раствора полимерного стабилизатора – молекулярной щетки с целлюлозной основной цепью и боковыми цепями полиметакриловой кислоты, с начальной концентрацией 0,2 масс.%, затем добавляли 3 мл воды и 1 мл раствора селенистой кислоты H_2SeO_3 с концентрацией 1,64 мг/мл. После перемешивания полученного раствора с помощью магнитной мешалки (в течение 10 мин), в реакционную колбу добавляли 1 мл восстановителя – аскорбиновой кислоты $C_6H_8O_6$ с концентрацией 4,47 мг/мл и оставляли эту жидкость при комнатной температуре на 24 часа (рис. 3). Общий объем полученного раствора был равен 10 мл. Концентрация наночастиц селена Se^0 составляла $c_{Se^0} = 0,01$ масс.%, а полимерного стабилизатора – $c_{PS} = 0,1$ масс.%, т.е. отношение $v = c_{Se^0}/c_{PS} = 0,1$.

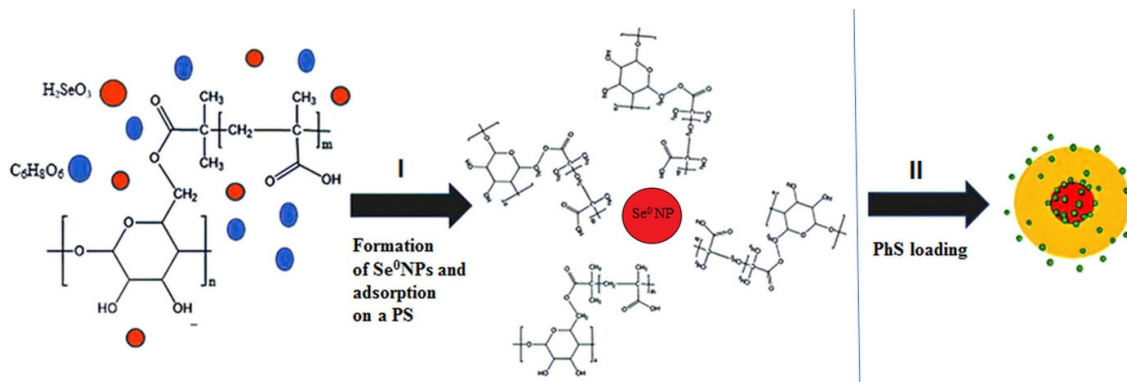


Рис. 3. Схема двухстадийного (I и II) синтеза трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы (ФС-2):

НPs – наночастицы, PhS – фотосенсибилизатор, PS – полимерный стабилизатор

Второй этап синтеза. Через сутки в полученный водный раствор наночастиц Se^0 с полимерным стабилизатором добавляли раствор радахлорина Rd (стандартный концентрат для приготовления раствора для инфузий – 0,35 %) и выдерживали еще сутки. В итоге концентрация фотосенсибилизатора составляла $c_{\text{Rd}} = 3,5 \cdot 10^{-3}$ мг/мл (см. рис. 3). Полученная система не подвергалась дополнительной химической очистке, так как в результате реакции получения наночастиц селена Se^0 образуются вода и следовые количества дегидроаскорбиновой кислоты.

Регистрация спектров оптического поглощения. Измерения временной динамики оптической плотности D растворов ФС-1 и ФС-2 проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-1900 (Япония) в диапазоне длин волн 220 – 800 нм, в кварцевых кюветках размерами 1×1 см (условия стандартные). Относительная суммарная погрешность при регистрации спектров не превышала 2%.

Регистрация спектров люминесценции. Спектры получали с помощью спектрофлуориметра Shimadzu RF 6000 (Япония) с шириной щели канала возбуждения и испускания 3×3 нм в диапазоне длин волн 200 – 900 нм. Измерения образцов проводились в кварцевых кюветках 1×1 см (условия стандартные).

Применение метода атомно-силовой микроскопии (АСМ). Исследования морфологии ФС-2 (до и после облучения) проводили на атомно-силовом микроскопе NanotopNT-206 (ОДО «Микротестмашины», Беларусь). Жидкостный образец наносили на поверхность свежего скола слюды. Измерения выполняли в атмосферных условиях, в контактном режиме, с использованием кремниевых кантилеверов FMG01, имеющих коэффициент жесткости $k = 3,0$ Н/м и радиус кривизны кончика острия 10 нм. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы Surface Explorer, при этом рассчитывали среднеарифметическое отклонение профиля R_a и среднеквадратичное отклонение профиля R_q для отображаемого участка поверхности (ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения. (СТ СЭВ 1156-78). Дата введения 1983-01-01).

Основные результаты и их обсуждение

На рис. 4 представлены спектры оптического поглощения – зависимости величины оптической плотности образцов растворов ФС-1 и ФС-2 от длины волны при их облучении светом с длиной волны $\lambda_{\text{exc}} = 405$ нм для разных времен экспозиции t . Сразу обращает на себя внимание существенное изменение величины максимума оптической плотности и формы кривой оптического поглощения полосы Core ($\lambda = 350 - 430$ нм), что может быть связано со встраиванием наночастиц селена в образце ФС-2 [31]. Для образца ФС-1 также наблюдается заметное снижение значений оптической плотности в области полосы Core. Тенденция к понижению величины D в области полосы Core наблюдается и для ФС-2.

Любопытная картина имеет место в Q -области ($\lambda = 620 - 700$ нм): если для раствора ФС-1 при увеличении времени экспозиции t происходит практически монотонное снижение величины оптической плотности, то для ФС-2 этот спад сопровождается bathochromным сдвигом Q -полосы после 20 мин облучения растворов светом с длиной волны $\lambda_{\text{exc}} = 405$ нм.

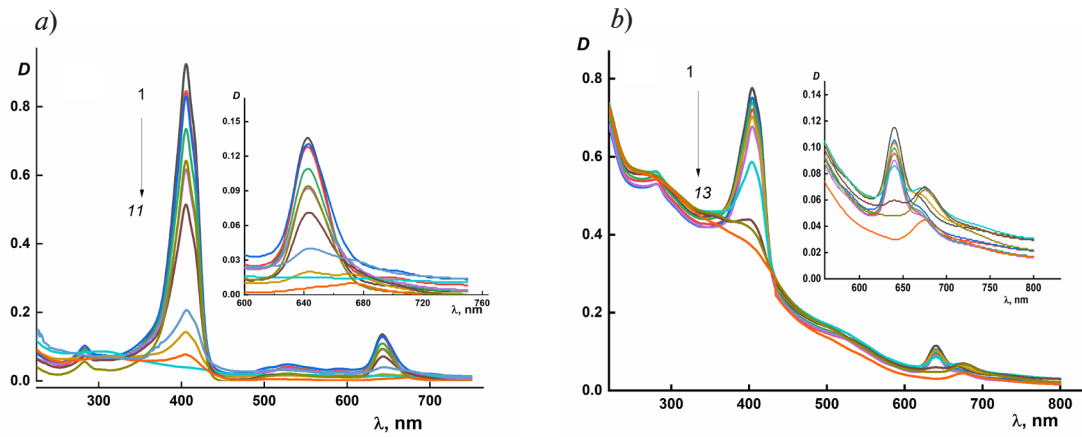


Рис. 4. Зависимости величины оптической плотности растворов ФС-1 (a) и ФС-2 (b) от длины волны при их разной экспозиции t светом с длиной волны $\lambda_{exc} = 405$ нм (мощность 1,8 Вт).
 Времена экспозиции t , мин: 0 (черные кривые 1), 0,5 (красные 2), 1,0 (синие 3), 2,0 (зеленые 4), 3,0 (салатные 5), 5,0 (серые 6), 10 (голубые 7), 15 (желтые 8), 20 (бордовые 9), 30 (розовые 10), 60 (оранжевые 11), 90 – 180 (фиолетовые 12–14)

Более детально картина изменений величины оптической плотности в максимумах полос поглощения от времени облучения для образцов ФС-1 и ФС-2 представлена на рис. 5. Так, при $\lambda_{max} = 405, 640$ и 675 нм для ФС-1 наблюдается резкий спад величины оптической плотности практически до $D_{max} = 0$, тогда как для ФС-2 за все время эксперимента (180 мин) таких масштабных изменений величины D_{max} не наблюдалось. Это, скорее всего, обусловлено «фиксацией» наночастицами селена порфиринового кольца радахлорина [26, 31] и изменением морфологии наноструктур.

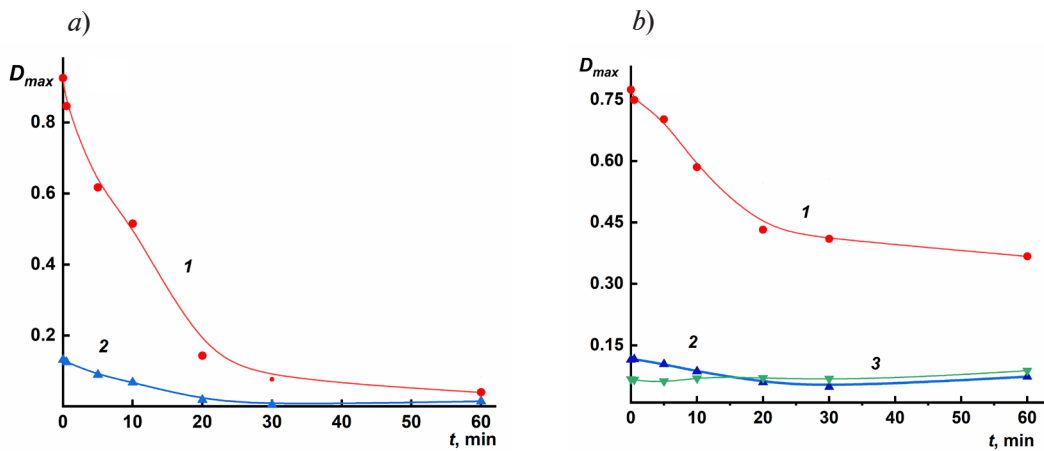


Рис. 5. Зависимости максимальной величины оптической плотности D_{max} образцов ФС-1 (a) и ФС-2 (b) от времени экспозиции t светом длиной волны $\lambda_{exc} = 405$ нм (мощность 1,8 Вт) на соответствующих значениях длины волны λ_{max} , нм: 405 (красные кривые 1), 640 (синие кривые 2), 675 (зеленая кривая 3)

Ширина запрещенной зоны E_g (минимальная энергия, необходимая для перехода электрона из валентной зоны в зону проводимости) была рассчитана для ФС-2 на основании данных, представленных на рис. 4. Расчет E_g был выполнен для спектральной области вблизи края полосы спектра поглощения по следующему уравнению:

$$Dh\nu = (h\nu - E_g)n,$$

где D – оптическая плотность; h , Дж·с, – постоянная Планка; ν , Гц, – частота фотонов; n – параметр, связанный с различными типами электронных переходов. Этот параметр может принимать значения 1/2, 2,0, 3/2 или 3,0 [32] (в нашем случае было принято $n = 1/2$).

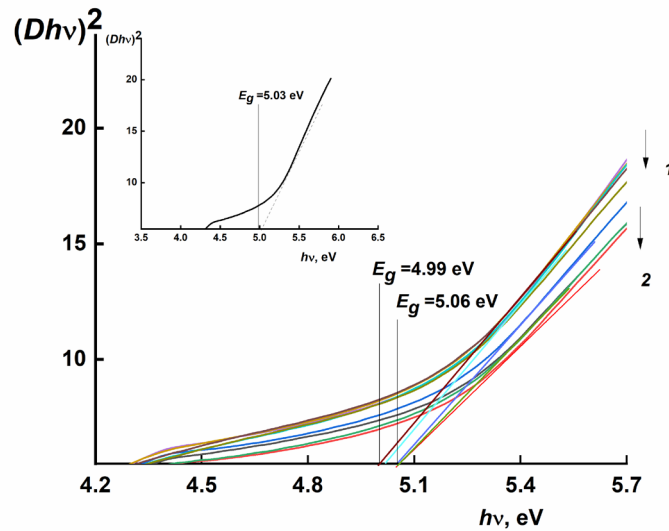


Рис. 6. Графики для расчета энергии запрещенной зоны, включающие две группы кривых, которые различаются длительностью экспозиции t (в мин).
 I группа: $t = 5$ (сиреневая кривая 5), 10 (бордовая 6), 20 (голубая), 30 (салатная), 60 (розовая);
 II группа: $t = 0,5$ (темно-серая кривая 1), 1,0 (красная 2), 2,0 (синяя 3), 3,0 (зеленая 4).
 На вставке: отдельный график для $t = 0,5$

На основании полученных зависимостей были рассчитаны значения E_g (см. таблицу) для раствора ФС-2 до и после облучения. Ширина запрещенной зоны для красного аморфного селена составляет 2,03 эВ [32]. Таким образом, наночастицы селена Se^0 в отсутствие полимерного стабилизатора быстро агрегируют, образуя агрегаты достаточно большого размера (порядка нескольких сотен нанометров); следовательно, полимерный стабилизатор образует экранирующую оболочку, которая препятствует агрегации, и размер наночастицы Se^0 становится намного меньше. В связи с этим, согласно результатам статей [33, 34], «эффект квантового ограничения» приводит к увеличению ширины запрещенной зоны (квантовое ограничение возникает, когда размеры наночастиц становятся сопоставимыми с длиной волны электронов или других частиц; при этом проявляются квантовые эффекты, влияющие на их свойства).

Увеличение величины E_g при переходе от красного аморфного селена к тройной селенсодержащей наносистеме ФС-2 можно объяснить размерными эффектами в этой наносистеме. Энергия первого экситонного максимума (энергия ширины запрещенной зоны) определяется размером наночастицы и описывается (без учета малых электростатических поправок) следующей формулой:

$$E_g = E_0 + 2\pi\hbar^2/\mu d^2 = \text{const}/d^2 \quad (1)$$

где E_0 , эВ, – ширина запрещенной зоны аморфного селена; d , нм, – диаметр наночастицы [33].

Параметр μ следует выражению

$$1/\mu = 1/m_e + 1/m_h,$$

где m_e , m_h , кг, – эффективные массы электрона и дырки, $m_e = 0,25m_0$, $m_h = 1,5m_0$ (m_0 – масса электрона).

Как видно из данных таблицы, значения параметров E_g и d не зависят от времени облучения. Такой результат может свидетельствовать о хорошей экранировке селенового ядра полимерным стабилизатором (процесс фотодеградации не затрагивает внутреннюю структуру ФС-2).

Спектры люминесценции образцов ФС-1 и ФС-2 при длине волны возбуждения $\lambda = 405$ нм в диапазоне длин волн $\lambda = 650 - 750$ нм представлены на рис. 7. Видно, что в указанном диапазоне, на различных временах облучения образцов t , формируются четко выраженные полосы люминесценции, одинаковые по форме, но резко различные по

Таблица

Зависимость расчетных значений параметров трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы ФС-2 от времени световой экспозиции

Экспозиция t , мин	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ	Диаметр d наночастицы Se^0 , нм
0	5,0	5,4
< 10	5,1	5,4
> 10	5,0	5,5

Примечание. Представлены усредненные значения параметров.

уровню интенсивности, причем для образца ФС-2 интенсивность эмиссии ниже, чем для ФС-1 на протяжении всего эксперимента. Следует также указать на незначительный сдвиг максимума полосы люминесценции у раствора ФС-2, по сравнению с ФС-1 (с 654 до 648 нм).

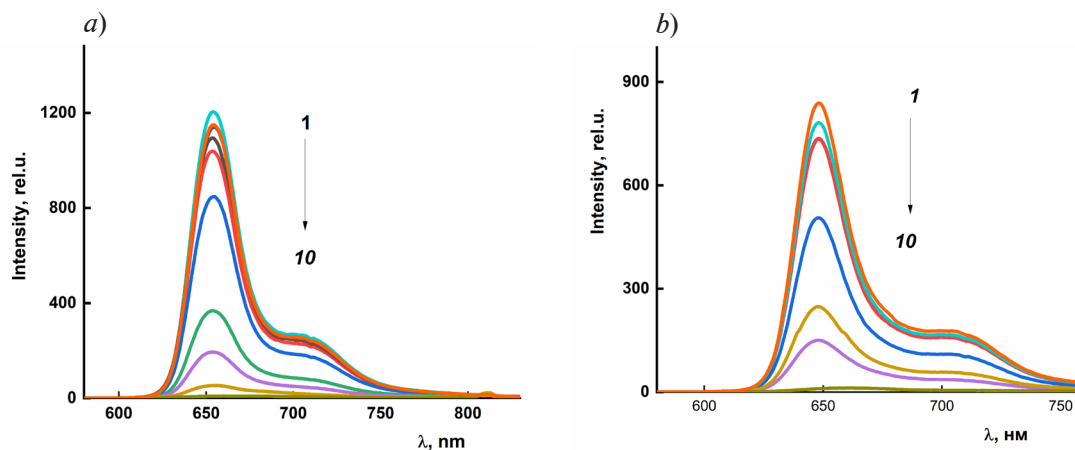


Рис. 7. Спектры люминесценции образцов ФС-1 (а) и ФС-2 (б) при ее возбуждении светом с длиной волны 405 нм для различных времен экспозиции t на той же длине волны (405 нм).

Для обоих образцов значения t , мин: 0 (кривая 1), 0,5 (2), 1,0 (3), 3,0 (4), 5,0 (5), 10 (6), 15 (7), 20 (8), 30 (9), 60 (10)

На рис. 8 представлена зависимость интенсивности люминесценции от времени облучения t в точке максимума. Четко прослеживается разница между временными периодами экспозиции, соответствующими полной фотодеградацией радахлорина в свободном и связанном состояниях: для ФС-1 это время составило 21 мин, а для ФС-2 – 15 мин. Учет равенства концентрации фотосенсибилизатора в исследованных образцах позволяет заключить, что образование комплекса способствует более быстрой фотодеградацией радахлорина. Это, кроме того, свидетельствует о том, что в случае ФС-2 большее количество активного кислорода вырабатывается за меньшее время, чем в случае ФС-1. Таким образом, факт превышения величины оптической плотности образца ФС-2 над аналогичной величиной для ФС-1 (см. рис. 4) свидетельствует о том, что процесс фотодеградации не затрагивает внутреннюю структуру ФС-2, а наночастицы селена играют роль инициаторов процесса фотодеградации образца.

На рис. 9 представлены АСМ-изображения (3D и топография) поверхности тонких пленок, отлитых из водных растворов трехкомпонентной селенсодержащей наносистемы ФС-2; изображения были получены до облучения (а) и после него (б). Время экспозиции составляло 60 мин, т.е. соотносилось с полной фотодеградацией (см. кривую 10 на рис. 7) По АСМ-снимкам обнаружено, что до облучения полимерный стабилизатор препятствовал ассоциации наночастиц селена в растворе: видны дискретные сферические

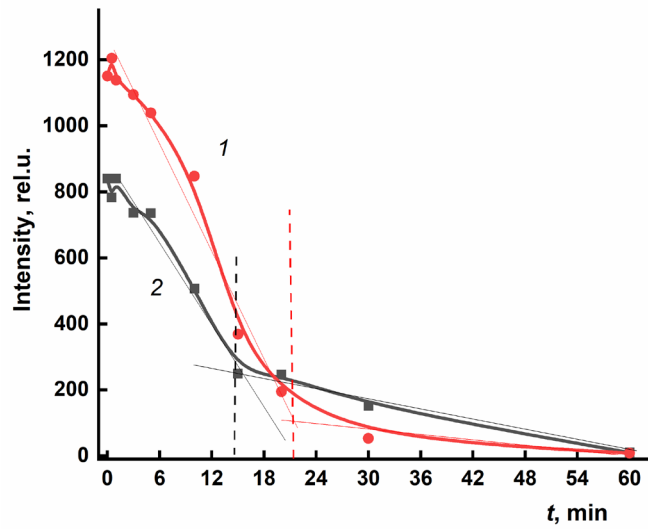


Рис. 8. Временная динамика уровня интенсивности флуоресценции образцов ФС-1 (кривая 1) и ФС-2 (кривая 2): прямые линии – касательные к кривым интенсивности, точки их пересечения для моментов t_1 и t_2 отмечены вертикальными пунктирными линиями

наноструктуры диаметром $D_{AFM} = 100 - 250$ нм. После же облучения, в течение 60 мин, наблюдалось изменение формы наноструктур (сферы трансформировались в эллипсоиды); кроме того, наблюдалась тенденция к их ассоциации.

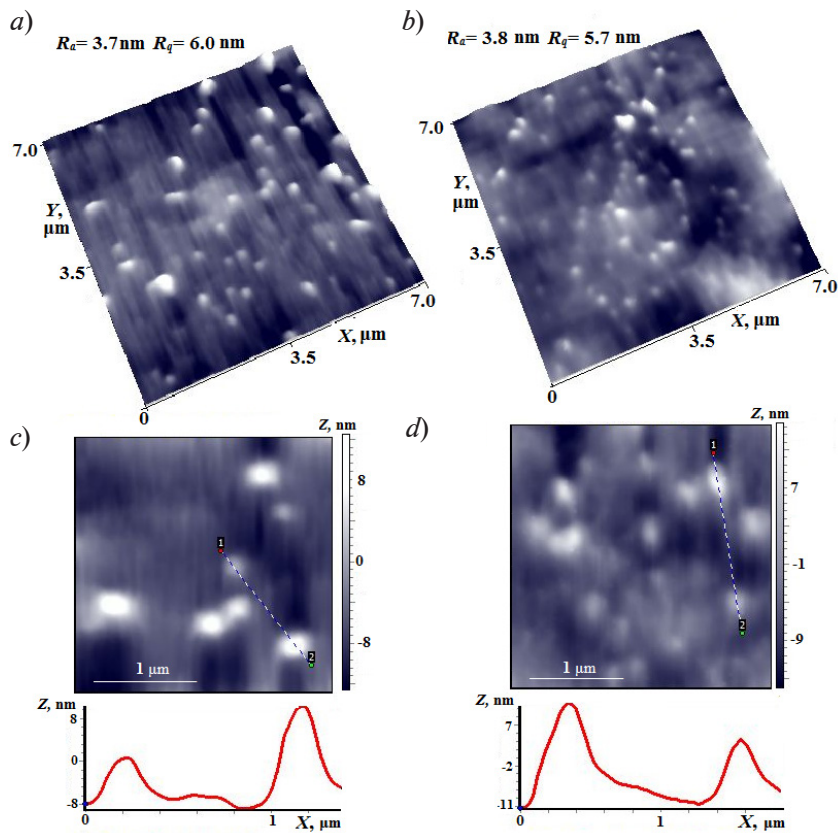


Рис. 9. АСМ-изображения поверхности тонкой пленки наносистемы ФС-2, полученной на поверхности скола слюды, до облучения светом (а) и после него ($t = 60$ мин) (b), а также соответствующие профили выделенных участков поверхности (отрезки 1...2) (c, d) с расчетными параметрами отклонения профиля R_a и R_q



Возможное следствие такого изменения формы наноструктур фотосенсибилизатора — это нарушение симметрии электронного облака его молекул, что неизбежно приводит к снижению устойчивости фотосенсибилизатора к внешним воздействиям, в том числе и к облучению светом. Указанное снижение, в частности, находит отражение в ускоренной фотодеградациии фотосенсибилизатора.

Заключение

Сравнительные исследования фотодеградациии свободного и связанного радахлорина (последний входил в состав тройной селенсодержащей наносистемы), проведенные методами УФ/видимой спектроскопии и люминесценции, показали влияние длительности фиолетового излучения (длина волны — 405 нм) на оптическую плотность и интенсивность люминесценции свободного и связанного соединений, а также на темпы изменения этих величин в зависимости от состава фотосенсибилизатора.

Методом атомно-силовой микроскопии обнаружено, что полимерный стабилизатор до воздействия излучения на образец ФС-2 препятствует ассоциации наночастиц селена в растворе, способствуя формированию дискретных сферических наноструктур. После облучения в течение 60 мин наноструктуры ФС-2 приобретают эллипсоидальную форму вместо исходной сферической. Следствием такой трансформации наноструктур фотосенсибилизатора является, скорее всего, нарушение симметрии электронного облака молекул ФС, что неизбежно приводит к снижению устойчивости ФС к внешним воздействиям, в том числе и к световому излучению.

Рассчитанные на основании данных УФ/видимой спектроскопии значения энергии запрещенной зоны E_g и диаметра наночастиц селена d для образца ФС-2 (до и после облучения) показали отсутствие влияния облучения на указанные параметры, что может свидетельствовать о надежном экранировании селенового ядра полимерным стабилизатором. Другими словами, процесс фотодеградациии не затрагивает внутреннюю структуру тройной селенсодержащей наносистемы ФС-2 (связанного радахлорина).

Благодарность

Коллектив авторов статьи выражает благодарность ведущему инженеру лаборатории №13 Филиала НИЦ «Курчатовский институт» — ПИЯФ — ИВС Кутину Александру Александровичу за разработку и сборку прибора для проведения экспериментов по облучению образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Brown S. B., Brown E. A., Walker I.** The present and future role of photodynamic therapy in cancer treatment // *The Lancet Oncology*. 2004. Vol. 5. No. 8. Pp. 497–508.
2. **Correia J. H., Rodrigues J. A., Pimenta S., Dong T., Yang Zh.** Photodynamic therapy review: Principles, photosensitizers, applications, and future directions // *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13. No. 9. P. 1332.
3. **Jiang W., Liang M., Lei Q., Li G., Wu S.** The current status of photodynamic therapy in cancer treatment // *Cancers (Basel)*. 2023. Vol. 15. No. 3. Pp. 585.
4. **Aebisher D., Serafin I., Batóg-Szczęch K., Dynarowicz K., Chodurek E., Kawczyk-Krupka A., Bartusik-Aebisher D.** Photodynamic therapy in the treatment of cancer — The selection of synthetic photosensitizers // *Pharmaceutics*. 2024. Vol. 17. No. 7. Pp. 932–957.
5. **Aebisher D., Czech S., Dynarowicz K., Misiolek M., Komosińska-Vashev K., Kawczyk-Krupka A., Bartusik-Aebisher D.** Photodynamic therapy: Past, current, and future // *International Journal of Molecular Sciences*. 2024. Vol. 25. No. 20. P. 11325.
6. **Bienia A., Wiecheć-Cudak O., Murzyn A. A., Krzykawska-Serda M.** Photodynamic therapy and hyperthermia in combination treatment — Neglected forces in the fight against cancer // *Pharmaceutics*. 2021. Vol. 13. No. 8. P. 1147.
7. **Baskaran R., Lee J., Yang S.-G.** Clinical development of photodynamic agents and therapeutic applications // *Biomaterials Research*. 2018. Vol. 22. 26 September. P. 25.

8. **Gonçalves de Faria C. M., Inada N. M., Kurachi C., Bagnato V. S.** Determination of the threshold dose distribution in photodynamic action from *in vitro* experiments // *Journal of Photochemistry and Photobiology*. 2016. Vol. 162. September. Pp. 168–175.
9. **Menezes P. F. C., Melo C. A. S., Bagnato V. S., Imasato H., Perussi J. R.** Influence of pH on the phototransformation process of photogem // *Lazer Methods in Chemistry, Biology, and Medicine*. 2009. Vol. 19. No. 7. Pp. 435–442.
10. **Dadeko A. V., Lilge L., Kaspler P., Murav'eva T. D., Starodubtcev A. M., Kiselev V. M., Zarubaev V. V., Ponomarev G. V.** Photophysical properties and *in vitro* photocytotoxicity of disodium salt 2.4-di (alpha-methoxyethyl)-deuteroporphyrin-IX (Dimegine) // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2019. Vol. 25. March. Pp. 35–42.
11. **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.
12. **Rotomskis R., Bagdonas S., Streckyte G., Wendenburg R., Dietel W., Didziapetriene J., Ibelhauptaite A., Staciokiene L.** Phototransformation of sensitizers: 3. Implications for clinical dosimetry // *Lasers in Medical Science*. 1998. Vol. 13. No. 4. Pp. 271–278.
13. **Fróes Sebbe-Santos Pr., Miquilini P., Pinto J. G., Campos de Menezes Pr. F., Ferreira J.** Adverse effects of topical photodynamic therapy in rosacea // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2024. Vol. 45. February. P. 103871.
14. **Privalov V. A., Lappa A. V., Seliverstov O. V., Faizrakhmanov A. B., Yarovoy N. N., Kochneva E. V., Evnevich M. V.** Clinical trials of a new chlorin photosensitizer for photodynamic therapy of malignant tumors // Th. J. Dougherty (Ed.) *Optical methods for tumor treatment and detection: Mechanisms and techniques in photodynamic therapy XI*. Proceedings of SPIE. 2002. Vol. 4612. Pp. 178–190.
15. **Ильина А. Д., Глазов А. Л., Семенова И. В., Васютинский О. С.** Влияние параметров возбуждающего излучения на фотосенсибилизированную генерацию синглетного кислорода в воде // *Оптика и спектроскопия*. 2016. Т. 120. № 6. С. 935–940.
16. **Chaudhri M., Vohra A., Chakarvarti S. K.** A model for Cu-Se resonant tunneling diodes fabricated by negative template assisted electrodeposition technique // *Communications and Network*. 2010. Vol. 2. No. 1. Pp. 73–78.
17. **Валуева С. В., Вылегжанина М. Э., Митусова К. А., Волков А. Я., Мелешко Т. К., Иванов И. В., Якиманский А. В.** Селенсодержащие наносистемы на основе амфифильных молекулярных щеток с варьируемой степенью полимеризации боковых цепей в водных и органических средах // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 4. С. 3–11.
18. **Валуева С. В., Вылегжанина М. Э., Боровкова 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.
19. **Bai S., Zhang M., Tang Sh., Li M., Wu R., Wan S., Chen L., Wei X., Feng Sh.** Effects and impact of selenium on human health. A Review // *Molecules*. 2025. Vol. 30. No. 1. P. 50.
20. **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.
21. **Khalid A., Tran P. A., Norello R., Simpson D. A., O'Connor A. J., Tomljenovic-Hanic S.** Intrinsic fluorescence of selenium nanoparticles for cellular imaging applications // *Nanoscale*. 2016. Vol. 8. No. 6. Pp. 3376–3385.
22. **Akhmetzhan A., Myrzakhmetova N., Amangeldi N., Kuanyshova Zh., Akimbayeva N., Dosmaganbetova S., Toktarbay Zh., Longinos S. N.** A short review on the N,N-dimethylacrylamide-based hydrogels // *Gels*. 2021. Vol. 7. No. 4. P. 234.
23. **Piacenza E., Presentato A., Heyne B., Turner R. J.** Tunable photoluminescence properties of selenium nanoparticles: biogenic versus chemogenic synthesis // *Nanophotonics*. 2020. Vol. 9. No. 11. Pp. 3615–3628.

24. **Kavand A., Anton N., Vandamme Th., Serra Ch., Chan-Seng D.** Synthesis and functionalization of hyperbranched polymers for targeted drug delivery // *Journal of Controlled Release*. 2020. Vol. 321. 10 May. Pp. 285–311.
25. **Gray V. P., Amelung C. D., Duti I. J., Laudermilch E. G., Letteri R. A., Lampe K. J.** Biomaterials via peptide assembly: design, characterization, and application in tissue engineering // *Acta Biomaterialia*. 2022. Vol. 140. 1 March. Pp. 43–75.
26. **Валуева С. В., Боровикова Е. И., 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.
27. **Валуева С. В., Вылегжанина М. Э., Митусова К. А., Безрукова М. А., Назарова О. В., Золотова Ю. И., Панарин Е. Ф.** Структурно-морфологические и спектральные характеристики гибридных биоактивных медь-, селен- и серебросодержащих наносистем на основе поли-4-акрилоилморфолина // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021. № 2. С. 15–26.
28. **Валуева С. В., Суханова Т. Е., Вылегжанина М. Э., Мелешко Т. К.** Бинарные наносистемы на основе амфифильных молекулярных щеток, загруженных фотосенсибилизатором Радахлорином или наночастицами селена // *Журнал технической физики*. 2020. Т. 90. № 9. С. 1462–1470.
29. **Shojaeian Sh., Asnaashari M., Heidari A., Sadeghi M., Mechrabinia P.** Effect of photodynamic therapy with two different photosensitizers on the viability of human dental pulp stem cells // *Journal of Lasers in Medical Sciences*. 2024. Vol. 15. 1 January. P. e70.
30. **Phasupan P., Le T. D., Nguyen L. Th.** Assessing the photodynamic efficacy of different photosensitizer-light treatments against foodborne bacteria based on the number of absorbed photons. // *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*. 2021. Vol. 221. August. P. 112249.
31. **Valueva S. V., Krasnopeeva E. L., Borovikova L. N., Morozova P. Yu., Sokolova M. P., Melenevskaya E. Yu., Yakimansky A. V.** Triple nanosystems based on amphiphilic molecular brushes, selenium nanoparticles and photosensitizer: Synthesis, spectral and morphological characteristics // *Nanobiotechnology Reports*. 2024. Vol. 19. No. 1. Pp. 108–115.
32. **Lesnichayaa M. V., Shendrik R., Sukhov B. G.** Relation between excitation dependent luminescence and particle size distributions for the selenium nanoparticles in κ -carrageenan shell // *Journal of Luminescence*. 2019. Vol. 211. July. Pp. 305–313.
33. **Brus L.** Electronic wave functions in semiconductor clusters: Experiment and theory // *The Journal of Physical Chemistry*. 1986. Vol. 90. No. 12. Pp. 2555–2560.
34. **Васильев Р. Б., Дирин Д. Н., Гаськов А. М.** Коллоидные полупроводниковые нанокристаллы с пространственным разделением носителей заряда: рост и оптические свойства // *Успехи химии*. 2011. Т. 80. № 12. С. 1190–1210.

REFERENCES

1. **Brown S. B., Brown E. A., Walker I.**, The present and future role of photodynamic therapy in cancer treatment, *Lancet Oncol.* 5 (8) (2004) 497–508.
2. **Correia J. H., Rodrigues J. A., Pimenta S., et al.**, Photodynamic therapy review: Principles, photosensitizers, applications, and future directions, *Pharmaceutics*. 13 (9) (2021) 1332.
3. **Jiang W., Liang M., Lei Q., et al.**, The current status of photodynamic therapy in cancer treatment, *Cancers (Basel)*. 15 (3) (2023) 585.
4. **Aebisher D., Serafin I., Batóg-Szczęch K., et al.**, Photodynamic therapy in the treatment of cancer – The selection of synthetic photosensitizers, *Pharmaceutics*. 17 (7) (2024) 932–957.
5. **Aebisher D., Czech S., Dynarowicz K., et al.**, Photodynamic therapy: Past, current, and future, *Int. J. Mol. Sci.* 25 (20) (2024) 11325.
6. **Bienia A., Wiecheć-Cudak O., Murzyn A. A., Krzykawska-Serda M.**, Photodynamic therapy and hyperthermia in combination treatment – Neglected forces in the fight against cancer, *Pharmaceutics*. 13 (8) (2021) 1147.
7. **Baskaran R., Lee J., Yang S.-G.**, Clinical development of photodynamic agents and therapeutic applications, *Biomater. Res.* 22 (26 Sept) (2018) 25.

8. **Gonçalves de Faria C. M., Inada N. M., Kurachi C., Bagnato V. S.**, Determination of the threshold dose distribution in photodynamic action from in vitro experiments, *J. Photochem. Photobiol.* 162 (Sept) (2016) 168–175.
9. **Menezes P. F. C., Melo C. A. S., Bagnato V. S., et al.**, Influence of pH on the phototransformation process of photogem, *Laser Methods in Chem. Biol. Med.* 19 (7) (2009) 435–442.
10. **Dadoko A. V., Lilge L., Kaspler P., et al.**, Photophysical properties and in vitro photocytotoxicity of disodium salt 2.4-di (alpha-methoxyethyl)-deuteroporphyrin-IX (Dimegine), *Photodiagnosis. Photodyn. Ther.* 25 (March) (2019) 35–42.
11. **Murav'eva T. D., Dadoko A. V., Kiselev V. M., et al.**, Comparative study of the photophysical properties of low-toxicity photosensitizers based on endogenous porphyrins, *J. Opt. Technol.* 85 (11) (2018) 709–721.
12. **Rotomskis R., Bagdonas S., Streckyte G., et al.**, Phototransformation of sensitizers: 3. Implications for clinical dosimetry, *Lasers Med. Sci.* 13 (4) (1998) 271–278.
13. **Fryes Sebbe-Santos Pr., Miquillini P., Pinto J. G., et al.**, Adverse effects of topical photodynamic therapy in rosacea, *Photodiagnosis. Photodyn. Ther.* 45 (Febr) (2024) 103871.
14. **Privalov V. A., Lappa A. V., Seliverstov O. V., et al.**, Clinical trials of a new chlorin photosensitizer for photodynamic therapy of malignant tumors, In book: Th. J. Dougherty (Ed.) *Optical methods for tumor treatment and detection: Mechanisms and techniques in photodynamic therapy XI. Proceedings of SPIE.* 4612 (2002) 178–190.
15. **Il'ina A. D., Glazov A. L., Semenova I. V., Vasyutinskii O. S.**, The influence of excitation radiation parameters on photosensitized generation of singlet oxygen in water, *Opt. Spectrosc.* 120 (6) (2016) 876–880.
16. **Chaudhri S., Vohra A., Chakarvarti S. K.**, A model for Cu-Se resonant tunneling diodes fabricated by negative template assisted electrodeposition technique, *Comms. Netw.* 2 (1) (2010) 73–78.
17. **Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Mitusova K. A., et al.**, Selenium-containing nanosystems based on amphiphilic molecular brushes with a variable degree of polymerization of the side chains in aqueous and organic media, *J. Surf. Investig. X-ra.* 15 (2) (2021) 313–320.
18. **Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Borovikova L. N., et al.**, Effect of the topology of a molecular brush on the stabilization of silver and selenium nanoparticles in aqueous nanodispersions: Spectral and structural-morphological characteristics, *J. Surf. Investig. X-ra.* 17 (1) (2023) 150–158.
19. **Bai S., Zhang M., Tang Sh., et al.**, Effects and impact of selenium on human health. A review, *Molecules.* 30 (1) (2025) 50.
20. **Valuyeva S. V., Borovikova L. N.**, Self-organization, morphological and thermodynamic characteristics of the selenium-containing nanostructures on the basis of strong polyacids, *Butlerov Commun.* 20 (5) (2010) 52–61 (in Russian).
21. **Khalid A., Tran P. A., Norello R., et al.**, Intrinsic fluorescence of selenium nanoparticles for cellular imaging applications, *Nanoscale.* 8 (6) (2016) 3376–3385.
22. **Akhmetzhan A., Myrzakhmetova N., Amangeldi N., et al.**, A short review on the N,N-dimethylacrylamide-based hydrogels, *Gels.* 7(4) (2021) 234.
23. **Piacenza E., Presentato A., Heyne B., Turner R. J.**, Tunable photoluminescence properties of selenium nanoparticles: biogenic versus chemogenic synthesis, *Nanophotonics.* 9 (11) (2020) 3615–3628.
24. **Kavand A., Anton N., Vandamme Th., et al.**, Synthesis and functionalization of hyperbranched polymers for targeted drug delivery, *J. Control. Release.* 321 (10 May) (2020) 285–311.
25. **Gray V. P., Amelung C. D., Duti I. J., et al.**, Biomaterials via peptide assembly: design, characterization, and application in tissue engineering, *Acta Biomater.* 140 (1 March) (2022) 43–75.
26. **Valueva S. V., Borovikova L. N., Krasnopeeve E. L., et al.**, Spectral characteristics of selenium-containing hybrid nanocomplexes based on fotoditazine and cellulose polymer carrier, *J. Appl. Spectrosc.* 91 (4) (2024) 754–760.
27. **Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Mitusova K. A., et al.**, Structural, morphological, and spectral characteristics of hybrid bioactive copper-, selenium- and silver-containing nanosystems based on poly-4-acryloylmorpholine, *J. Surf. Investig. X-ra.* 15 (1) (2021) 110–120.
28. **Valuyeva S. V., Sukhanova T. E., Vylegzhanina M. E., Meleshko T. K.**, Binary nanosystems based on amphiphilic molecular brushes loaded with Radachlorine photosensitizer or selenium nanoparticles, *Tech. Phys.* 65 (9) (2020) 1403–1410.

29. **Shojaeian Sh., Asnaashari M., Heidari A., et al.**, Effect of photodynamic therapy with two different photosensitizers on the viability of human dental pulp stem cells, *J. Lasers Med. Sci.* 15 (1 Jan) (2024) e70.
30. **Phasupan P., Le T. D., Nguyen L. Th.**, Assessing the photodynamic efficacy of different photosensitizer-light treatments against foodborne bacteria based on the number of absorbed photons, *J. Photochem. Photobiol B.* 221 (Aug) (2021) 112249.
31. **Valueva S. V., Krasnopeeva E. L., Borovikova L. N., et al.**, Triple nanosystems based on amphiphilic molecular brushes, selenium nanoparticles and photosensitizer: Synthesis, spectral and morphological characteristics, *Nanobiotechnol. Rep.* 19 (1) (2024) 108–115.
32. **Lesnichayaa M. V., Shendrik R., Sukhov B. G.**, Relation between excitation dependent luminescence and particle size distributions for the selenium nanoparticles in κ -carrageenan shell, *J. Lumin.* 211 (July) (2019) 305–313.
33. **Brus L.**, Electronic wave functions in semiconductor clusters: Experiment and theory, *J. Phys. Chem.* 12 (90) (1986) 2555–2560.
34. **Vasiliev R. B., Dirin D. N., Gaskov A. M.**, Semiconductor nanoparticles with spatial separation on charge carriers: synthesis and optical properties, *Russ. Chem. Rev.* 80 (12) (2011) 1139–1158.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАЛУЕВА Светлана Валерьевна – кандидат физико-математических наук, руководитель лаборатории структуры и морфологии полимерных и композиционных систем Института высокомолекулярных соединений – филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ; старший научный сотрудник Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н. Н. Петрова, Санкт-Петербург, Россия.

199004, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 31

svalu67@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9446-4233

МОРОЗОВА Полина Юрьевна – научный сотрудник лаборатории структуры и морфологии полимерных и композиционных систем Института высокомолекулярных соединений – филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ; лаборант-исследователь Национального медицинского исследовательского центра онкологии имени Н. Н. Петрова, Санкт-Петербург, Россия.

199004, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 31

aravenko_polina@yahoo.com

ORCID: 0000-0003-3068-7838

ВЫЛЕГЖАНИНА Милана Эрнестовна – научный сотрудник лаборатории структуры и морфологии полимерных и композиционных систем Института высокомолекулярных соединений – филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ; Санкт-Петербург, Россия.

199004, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 31

v.e.milana@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4334-7595

ЧЕРНОВА Людмила Михайловна – старший лаборант лаборатории структуры и морфологии полимерных и композиционных систем Института высокомолекулярных соединений – филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ; Санкт-Петербург, Россия.

199004, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 31

zenitik1993@gmail.com

ORCID: 0009-0006-3914-2307

БОРОВИКОВА Людмила Николаевна – научный сотрудник лаборатории структуры и морфологии полимерных и композиционных систем Института высокомолекулярных соединений – филиала НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ; Санкт-Петербург, Россия.

199004, Россия, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., 31

svalu67@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1034-6713

THE AUTHORS

VALUEVA Svetlana V.

Institute of Macromolecular Compounds – Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”; Senior Researcher, National Medical Research Center of Oncology named after N. N. Petrov

31 Bolshoy Ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia

svalu67@mail.ru

ORCID: 0000-0001-9446-4233

MOROZOVA Polina Yu.

Institute of Macromolecular Compounds – Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”; laboratory assistant researcher, National Medical Research Center of Oncology named after N. N. Petrov

31 Bolshoy Ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia

aravenko_polina@yahoo.com

ORCID: 0000-0003-3068-7838

VYLEGZHANINA Milana E.

Institute of Macromolecular Compounds – Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”.

31 Bolshoy Ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia

v.e.milana@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4334-7595

CHERNOVA Lyudmila M.

Institute of Macromolecular Compounds – Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”.

31 Bolshoy Ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia

zenitik1993@gmail.com

ORCID: 0009-0006-3914-2307

BOROVIKOVA Lyudmila N.

Institute of Macromolecular Compounds – Branch of Petersburg Nuclear Physics Institute named by B. P. Konstantinov of National Research Centre “Kurchatov Institute”.

31 Bolshoy Ave. V. O., St. Petersburg, 199004, Russia

svalu67@mail.ru

ORCID: 0000-0002-1034-6713

Статья поступила в редакцию 26.05.2025. Одобрена после рецензирования 29.09.2025. Принята 29.09.2025.

Received 26.05.2025. Approved after reviewing 29.09.2025. Accepted 29.09.2025.