

DOI: 10.25205/978-5-4437-1843-9-152

**НОВЫЙ КЛАСС ОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОСЕНСИБИЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ
СОПРЯЖЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕРАПИИ РАКА *****A NEW CLASS OF ORGANIC PHOTOSENSITIZERS BASED ON CONJUGATED POLYMERS
FOR EFFECTIVE CANCER THERAPY**А. А. Шумицкая^{1,2}, Е. Д. Благодарная², Ю. А. Исаева^{2,3}, Р. А. Акасов³, Ю. Н. Лупоносов²¹Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова²Институт синтетических полимерных материалов им. Н. С. Ениколопова РАН, Москва³Московский педагогический государственный университетA. A. Shumitskaya^{1,2}, E. D. Blagodarnaia², Yu. A. Isaeva^{2,3}, R. A. Akasov³, Y. N. Lyponosov²¹Lomonosov Moscow State University²Enikolopov Institute of Synthetic Polymeric Materials RAS, Moscow³Moscow Pedagogical State University

✉ a.shumickaya@ispm.ru

Аннотация

В работе исследованы новые наночастицы (НЧ) на основе сопряженных полимеров (СП) Y-серии и их мономеров в качестве потенциальных агентов для фототерапии рака. Исследование фототоксичности *in vitro* показало повышенную эффективность НЧ на основе СП по сравнению с НЧ мономеров, что делает их перспективными кандидатами для дальнейшей разработки фототерапевтических препаратов.

Abstract

This study investigates new nanoparticles (NPs) based on Y-series conjugated polymers (CPs) and their monomers as potential agents for cancer phototherapy. *In vitro* phototoxicity studies showed that CP-based NPs were more effective than monomer NPs, making them promising candidates for the further development of phototherapeutic drugs.

Одним из ключевых направлений современной онкотерапии является разработка неинвазивных, селективных и эффективных методов лечения рака. Фототерапия (ФТ), основанная на использовании фотосенсибилизаторов (ФС) и электромагнитного излучения определенного диапазона, зарекомендовала себя как безопасный и минимально инвазивный подход к терапии злокачественных новообразований. Важным условием для успешной реализации ФТ является использование биосовместимых и селективных ФС с поглощением в терапевтически значимых диапазонах — красном (650–800 нм) и ближнем инфракрасном (БИК, 1000–1400 нм), что обеспечивает глубокое проникновение излучения в ткани и высокую селективность действия.

Наиболее перспективным новым классом ФС, отвечающих этим требованиям, являются органические сопряженные полимеры (СП) донорно-акцепторного (Д-А) типа. Благодаря наличию в их структуре как электронодонорных (Д), так и электроноакцепторных (А) фрагментов, можно тонко настраивать оптические свойства и фотофизические характеристики таких молекул за счет структурных модификаций. Такие материалы обладают способностью эффективно генерировать активные формы кислорода (АФК), обеспечивать визуализацию биомолекул и клеток, вызывать гипертермию опухолевых клеток, благодаря чему демонстрируют высокую фототоксичность при минимальных концентрациях [1]. Кроме того, такие материалы образуют стабильные наночастицы (НЧ) в воде, что позволяет получать многофункциональные наноматериалы с таргетной доставкой и возможностью комбинированной терапии.

В данной работе были получены и систематически исследованы НЧ органических Д-А-молекул: 2 мономера и 4 СП на основе 10,11-дигидро-[1,2,5]тиадиазоло[3,4-е]тиено[2',3':4,5]пирроло[3,2-g]тиено[3,2-b]-индола. Данные молекулы относятся к полупроводникам Y-серии, которые уже успешно применяются в органической электронике [2]. Эти материалы обладают высокой фотостабильностью, широким спектральным диапазоном поглощения и возможностью мультимодального применения, в том числе в биомедицинских приложениях. Размеры и оптические свойства дисперсий были изучены методами динамического светорассеяния и абсорбционной спектроскопии. Средние гидродинамические диаметры частиц варьировались в диапазоне 21,3–41,5 нм,

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-13-00422).

©А. А. Шумицкая, Е. Д. Благодарная, Ю. А. Исаева, Р. А. Акасов, Ю. Н. Лупоносов, 2025

что соответствует оптимальным размерам для эффективной доставки в опухолевые клетки. Максимумы поглощения находились в диапазоне 645–669 нм, что позволяет применять данные НЧ в красном терапевтическом «окне». Сравнительный анализ цитотоксичности проводился на клетках карциномы легкого человека A549 и фибробластах легких человека WI-26. Проведенное исследование продемонстрировало, что НЧ на основе СП обладают более выраженной фототоксичностью по сравнению с НЧ на основе мономеров: в среднем фототоксические индексы (ФИ) при использовании НЧ полимеров в 1,5 раза превышали ФИ для НЧ мономеров. Скорость интернализации полученных НЧ в клетках A549 количественно оценивали методом проточной цитометрии. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности дальнейшего изучения и развития Д-А-полимеров Y-серии в качестве эффективных фотосенсибилизаторов для эффективной терапии рака.

Литература

1. Lu B. et al. Organic conjugated small molecules with donor-acceptor structures: design and application in the phototherapy of tumors // *Materials Chemistry Frontiers*. 2022. Vol. 6 (20). P. 2968–2993.
2. Liu C. et al. Recent progress in π -conjugated polymers for organic photovoltaics: solar cells and photodetectors // *Progress in Polymer Science*. 2023. Vol. 143. P. 101711.