



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 93–101
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 93–101
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-93-101>, EDN: TOXVIP

Научная статья
УДК 53.043:543.062:543.426

Гибридный люминесцентный материал на основе электроформованной полимерной матрицы с инкапсулированными квантовыми точками AgInS₂/ZnS



А. А. Сердобинцев[✉], К. В. Коларькова, В. В. Оломская, Т. Ю. Русанова, И. Ю. Горячева, П. А. Демина

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, Россия, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, д. 83

Сердобинцев Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством Института физики, serdobintsevaa@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>, AuthorID: 238828

Коларькова Ксения Владимировна, студент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством Института физики, kkolarkova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6825-129X>

Оломская Вера Владимировна, аспирант кафедры общей и неорганической химии Института химии, o-v-v99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9065-1648>, AuthorID: 1308882

Русанова Татьяна Юрьевна, доктор химических наук, заведующий кафедрой аналитической химии и химической экологии Института химии, tatyanyars@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5902-3707>, AuthorID: 38756

Горячева Ирина Юрьевна, доктор химических наук, профессор кафедры общей и неорганической химии Института химии, goryachevai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>, AuthorID: 50556

Демина Полина Анатольевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Дистанционно управляемые системы для тераностики» Научного медицинского центра, polina.a.demina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9203-582X>, AuthorID: 644204

Аннотация. Разработан гибридный люминесцентный материал на основе нетканой нановолокнистой матрицы с инкапсулированными люминесцентными квантовыми точками AgInS₂/ZnS. Водный коллоид стабилизированных тиогликолевой кислотой квантовых точек вводили в формовочный раствор непосредственно перед процессом электроформования. При этом квантовые точки сохраняли свои люминесцентные свойства и не взаимодействовали с растворителем (диметилформамид). Установлено, что квантовые точки внедрены в полимерную матрицу физически, а не путём химического связывания. Материал может быть использован в качестве сенсорной платформы для определения биоактивных веществ, что показано на примере антибиотика фторхинолонового ряда ципрофлоксацина в водных растворах. Присутствие ципрофлоксацина в растворе приводит к тушению люминесценции квантовых точек, но не вызывает сдвига максимума люминесценции. Это существенно отличается от взаимодействия квантовых точек с ципрофлоксацином непосредственно в водном растворе, так как в этом случае наблюдается батохромный сдвиг. При пропитке образцов полученного гибридного материала водным раствором ципрофлоксацина метод флуориметрического детектирования позволяет уверенно определить антибиотик вплоть до его концентрации $C_M = 1 \cdot 10^{-7}$ М. Предложено объяснение тушения люминесценции квантовых точек на основе взаимодействия молекул ципрофлоксацина с молекулами тиогликолевой кислоты на поверхности квантовых точек. Электростатическое взаимодействие протонированных аминогрупп ципрофлоксацина с диссоциированными карбоксигруппами кислоты на поверхности квантовой точки приводит к тушению люминесценции AgInS₂/ZnS.

Ключевые слова: квантовые точки, люминесценция, электроформование, нетканые материалы

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00481, <https://rscf.ru/project/24-23-00481/>).

Для цитирования: Сердобинцев А. А., Коларькова К. В., Оломская В. В., Русанова Т. Ю., Горячева И. Ю., Демина П. А. Гибридный люминесцентный материал на основе электроформованной полимерной матрицы с инкапсулированными квантовыми точками AgInS₂/ZnS // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 1. С. 93–101. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-93-101>, EDN: TOXVIP

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Hybrid luminescent material based on an electrospun polymer matrix with encapsulated AgInS₂/ZnS quantum dots

А. А. Serdobintsev[✉], К. В. Kolarkova, В. В. Olomskaia, Т. Ю. Rusanova, И. Ю. Goryacheva, П. А. Demina



Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Alexey A. Serdobintsev, serdobintsevaa@sgu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3281-8352>

Kseniya V. Kolarkova, kkolarkova@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0005-6825-129X>

Vera V. Olomskaya, o-v-v99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9065-1648>

Tatiana Yu. Rusanova, tatyaryas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5902-3707>

Irina Yu. Goryacheva, goryacheva@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>

Polina A. Demina, polina.a.demina@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9203-582X>

Abstract. Background and Objectives: Hybrid polymer materials containing luminescent nanoparticles are promising for creating, in particular, electroluminescent devices. Such materials are able to withstand significant mechanical deformations while maintaining high radiation conversion efficiency with both decreasing and increasing frequency. Among the extensive set of existing approaches for the production of hybrid polymer materials, the electrospinning method allows the use of a wide range of polymers, resulting in formation of disordered structure consisting of fine (hundreds of nanometers diameter) arbitrarily oriented fibers, which makes it possible to obtain a porous fibrous material with a large surface area. The electrospinning method is an effective tool for creating composite structures with nanoparticles encapsulated in polymer fibers that protect nanoparticles from environmental influences. The high porosity of nanofiber nonwovens allows them to be used as the basis for highly sensitive sensors for dangerous and toxic substances due to their large surface area. **Materials and Methods:** The pre-synthesized $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots were introduced into the spinning solution of polyacrylonitrile in dimethylformamide immediately before the electrospinning process. Quantum dots retained their luminescent properties and did not interact with the solvent. To carry out the electrospinning process, a high voltage (-53 kV) was applied between the grounded solution supply capillary and the collector using a stabilized power source. The sample spinning time was 30 minutes, and the feed rate of the spinning solution was $750 \mu\text{l/h}$. The obtained hybrid luminescent material was experimentally studied using luminescence analysis. The effect of ciprofloxacin on the luminescent properties of the obtained material was studied by impregnating electroformed samples with aqueous solutions with different concentrations of the antibiotic. **Results:** It has been established that quantum dots are physically embedded in the polymer matrix, and not by chemical bonding. The presence of ciprofloxacin in the solution leads to quenching of the luminescence of quantum dots, but does not cause a shift in the luminescence maximum. This is significantly different from the interaction of quantum dots with ciprofloxacin directly in an aqueous solution, since in this case a bathochromic shift is observed. An explanation of quenching the luminescence of quantum dots based on the interaction of ciprofloxacin molecules with their shells is proposed. In course of $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots production, a coating of thioglycolic acid is applied to the surface of the dots to prevent aggregation in water. The protonated aminogroups of ciprofloxacin interact electrostatically with dissociated carboxylic groups of thioglycolic acid, which leads to a change in the quantum dots surface and causes quenching of $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ luminescence. **Conclusion:** A hybrid luminescent material based on a non-woven nanofiber matrix with encapsulated luminescent $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots has been developed. The material can be useful as a sensor platform for the determination of bioactive substances. It is possible to confidently determine the fluoroquinolone antibiotic ciprofloxacin in aqueous solution up to its concentration of $C_M = 1 \cdot 10^{-7}$ M by the developed material.

Keywords: quantum dots, luminescence, electrospinning, nonwoven materials

Acknowledgments: This work is supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-23-00481, <https://rscf.ru/project/24-23-00481/>).

For citation: Serdobintsev A. A., Kolarkova K. V., Olomskaya V. V., Rusanova T. Yu., Goryacheva I. Yu., Demina P. A. Hybrid luminescent material based on an electrospun polymer matrix with encapsulated $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 1, pp. 93–101 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-1-93-101>, EDN: TOXVIP

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Гибридные полимерные материалы, содержащие люминесцентные наночастицы, перспективны для создания, в частности, электролюминесцентных устройств, работающих на постоянном токе [1, 2]. Такие материалы способны выдерживать значительные механические деформации при сохранении высокой эффективности преобразования излучения как с понижением, так и с повышением частоты [3, 4]. Существует обширный спектр методов создания гибридных полимерных материалов. Метод электроформования позволяет использовать широкий спектр полимеров, формируя из них неупорядоченную структуру из тонких (сотни нанометров) произвольно ориентированных волокон, что позволяет получить пористый на-

новолокнистый материал с большой площадью поверхности [5]. Пористая структура может служить матрицей для многочисленных объектов, включая наночастицы, как встроенных в волокна в готовом виде, так и синтезированных *in situ* при электроформовании [6]. Метод электроформования является эффективным инструментом для создания композитных структур с наночастицами, инкапсулированными в полимерные волокна, которые защищают наночастицы от воздействия окружающей среды. Другим важным преимуществом такого материала является его гибкость, которая может быть полезна при работе с подложками сложной формы или в быстрорастущей области гибкой электроники. Высокая пористость нетканых материалов позволяет использовать их в качестве основы для



высококочувствительных сенсоров опасных и токсичных веществ благодаря большой площади поверхности.

Развитие различных областей науки, таких как медицинская диагностика и защита окружающей среды, вызывает необходимость создания аналитических инструментов, позволяющих обнаруживать и контролировать специфические аналиты. Сенсоры удовлетворяют эту потребность, позволяя высокоселективно и с высокой чувствительностью определять молекулы в анализируемых образцах.

Использование наноматериалов приводит к разработке более чувствительных сенсоров с лучшими характеристиками. Наноматериалы, в том числе нановолокна, обладают свойствами, недостижимыми для объемных материалов, что делает их востребованным дополнением к традиционным методам разработки сенсоров и открывают возможности миниатюризации сенсорных платформ [7].

В последнее время квантовые точки (КТ) активно используются при разработке биосенсоров для определения антибиотиков. КТ представляют собой полупроводниковые наночастицы, имеющие различный состав. При этом особый интерес вызывают тройные КТ AgInS_2 , не содержащие токсичных элементов [8, 9]. При размерах 2–10 нм КТ проявляют уникальные оптические и электронные свойства, такие как широкий спектр поглощения и узкий спектр испускания, высокие квантовые выходы, фотостабильность и большую площадь поверхности – характеристики, которые не наблюдаются в материалах макроразмера.

Так как при уменьшении размера частиц структура энергетических зон начинает меняться, то при достижении наноразмера оптические свойства КТ (длины волн возбуждения и испускания), могут быть «настроены» путем изменения размера, формы или структуры поверхности частиц. Таким образом, КТ нашли применение в качестве неорганических флуорофоров, благодаря яркой, «настраиваемой по размеру» люминесценции с узкими симметричными полосами излучения и высокой фотостабильностью [10].

Исходя из вышесказанного, целью настоящей работы стала разработка люминесцентного нановолокнистого материала на основе полиакрилонитрила, модифицированного КТ состава $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. В качестве аналита, определяемого с помощью разработанного материала, был

использован антибактериальный препарат хинолонового ряда ципрофлоксацин.

1. Материалы и методы

1.1. Материалы

Полиакрилонитрил ($[-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CN})-]_n$, PAN, 99.0%) и ципрофлоксацин ($\text{C}_{17}\text{H}_{18}\text{FN}_3\text{O}_3$, CF, $M_r = 331.34$ г/моль, 98.0%) производства Sigma-Aldrich (Merck, Германия). N,N-Диметилформамид ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}$, DMF, х.ч.) и соляная кислота (HCl, х.ч.) производства Вектон (Вектон, Россия).

Для приготовления всех растворов использовали дистиллированную воду (ГОСТ 6709-72).

1.2. Приготовление растворов

Стандартный раствор ципрофлоксацина с концентрацией $1 \cdot 10^{-2}$ М готовили растворением точной навески (0.0828 г) в 0.1 М HCl в мерной колбе объемом 25 мл. Рабочие растворы готовили путем последовательного разбавления стандартного раствора.

Рабочие растворы $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ готовили путем разбавления исходного раствора КТ. Исходный раствор $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ получен методом коллоидного синтеза по методике [11]. В данной работе использовали фракцию № 2 (красные КТ).

Рабочие растворы смесей ципрофлоксацина и $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ готовили путем смешения исходных растворов в диапазоне концентраций антибиотика от $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ М и с разбавлением КТ в 40, 100 и 500 раз.

Спектры поглощения растворов записывали на спектрофотометре Shimadzu UV-1800 (Shimadzu, Япония).

1.3. Получение и характеристика люминесцентного нетканого материала

Навеску полимера (13% мас.) растворяли в DMF при постоянном перемешивании (300 об/мин). После полного растворения полимера к полученному раствору приливали раствор КТ (10% об.) и продолжали перемешивание еще в течение 30 мин до образования гомогенной смеси. Далее полученную смесь переносили в формовочный шприц и начинали процесс электроформования. Шприцевой насос (SPLab02, Китай) располагался на горизонтальной подвижной платформе, расстояние от кончика формовочной иглы до коллектора



составляло 20 см. Для осуществления процесса электроформования между заземленным капилляром для подачи раствора и коллектором подавали напряжение (-53 кВ) с помощью стабилизированного источника питания (FUG HCP 140-65000, Германия). Время формования образца составляло 30 мин, скорость подачи формовочного раствора была 750 мкл/ч. В качестве контрольного образца выступал нетканый материал, полученный из 13%-ного раствора PAN.

Оптические свойства полученных люминесцентных материалов изучали с помощью мультимодального микропланшетного считывателя Synergy H1 (BioTek, США).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Спектральные характеристики ципрофлоксацина

Благодаря высокой эффективности, широкому спектру действия, биодоступности, удоб-

ным формам выпуска препаратов хинолонового ряда, они находят применение в клинической практике [12]. Согласно некоторым исследованиям, возможно развитие бактериальной резистентности к фторхинолонам из-за необоснованного применения в терапии заболеваний, наличия следовых количеств в пище животного происхождения, в сточных водах и бытовых отходах. Соответственно, есть высокий риск того, что данный тип препаратов может стать терапевтически неэффективным [13].

В зависимости от pH среды для ципрофлоксацина характерны четыре формы: нейтральная, анионная, катионная, и цвиттер-ионная [14]. В кислой среде при $\text{pH} < 5$ в результате протонирования кислорода карбонильной группы и азота пиперазинового кольца образуется катионная форма фторхинолона.

Хромофорные группы ципрофлоксацина, включающие пиперазиновое кольцо и карбоксильную группу, характеризуются в спектре поглощения высокоинтенсивной полосой в об-

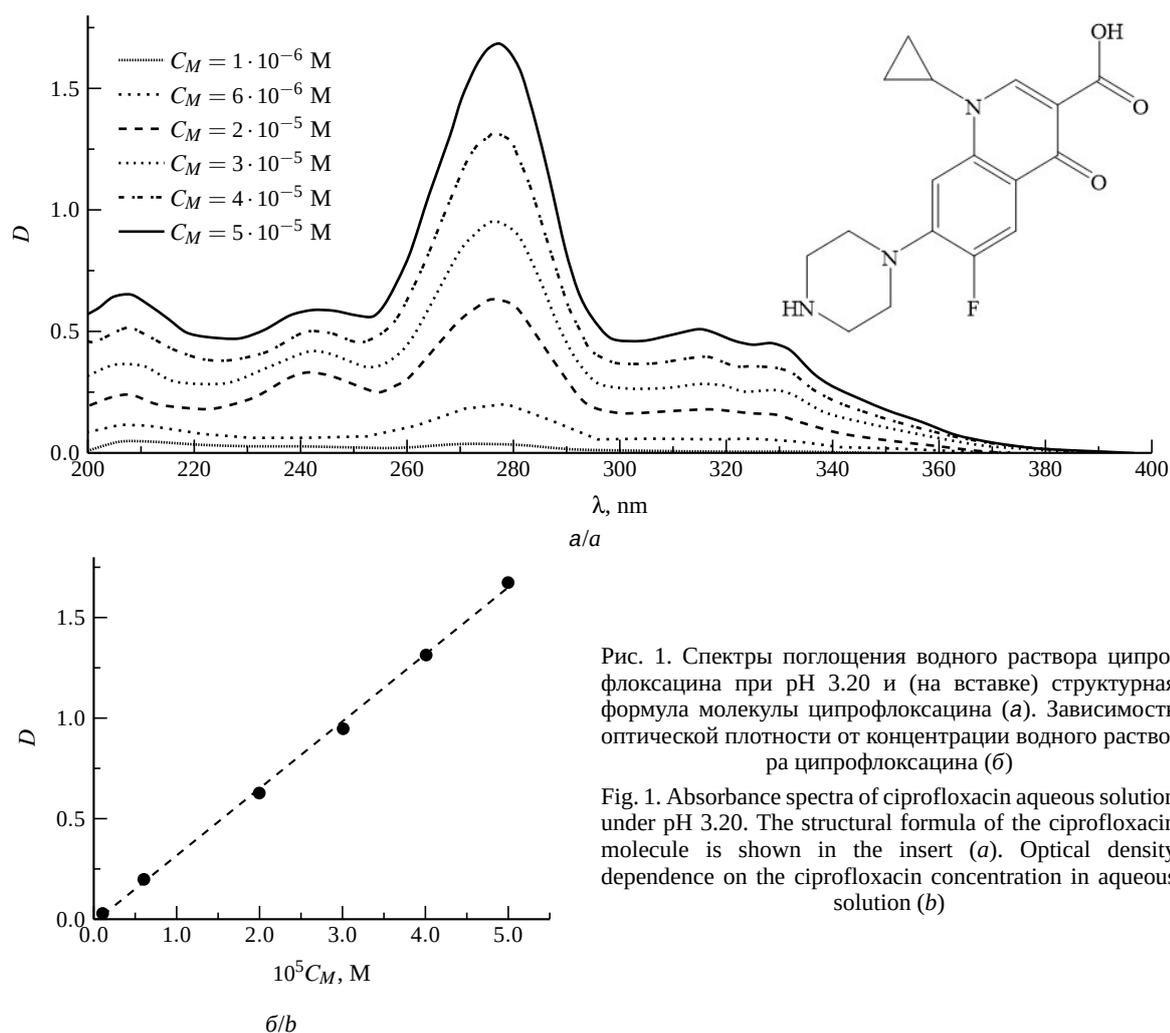


Рис. 1. Спектры поглощения водного раствора ципрофлоксацина при pH 3.20 и (на вставке) структурная формула молекулы ципрофлоксацина (а). Зависимость оптической плотности от концентрации водного раствора ципрофлоксацина (б)

Fig. 1. Absorbance spectra of ciprofloxacin aqueous solution under pH 3.20. The structural formula of the ciprofloxacin molecule is shown in the insert (a). Optical density dependence on the ciprofloxacin concentration in aqueous solution (b)



ласти 256–293 нм с максимумом при 279 нм и менее интенсивными при 204, 240, 315 и 330 нм (рис. 1, а). В данном исследовании спектрофотометрическое определение ципрофлоксацина проводили при длине волны, соответствующей максимуму поглощения электромагнитного излучения ципрофлоксацином (279 нм).

Из рис. 1, б видно, что зависимость оптической плотности раствора от концентрации ципрофлоксацина носит линейный характер, что соотносится с законом Бугера – Ламберта – Бера. Следовательно, указанный закон может быть использован для расчета молярного коэффициента поглощения. Рассчитанные коэффициенты молярного поглощения полос (ϵ) ципрофлоксацина при pH 3.20 равны $\epsilon_{207} = 1.2 \times 10^4$ моль/л, $\epsilon_{290} = 1.4 \cdot 10^4$ моль/л, $\epsilon_{277} = 3.2 \cdot 10^4$ моль/л и позволяют отнести их к π - π^* – переходам в сопряженной системе молекулы [15].

2.2. Влияние ципрофлоксацина на интенсивность люминесценции квантовых точек

Предварительно определено влияние DMF – растворителя, используемого для электроформования, – на форму спектра люминесценции КТ AgInS₂/ZnS. Как видно из рис. 2, а, в спектре люминесценции AgInS₂/ZnS присутствует широкий пик с максимумом при длине волны 649 нм ($\lambda_{\text{возб}} = 360$ нм), который практически не изменяется при использовании воды и DMF в качестве растворителей.

В присутствии ципрофлоксацина при той же волне возбуждения наблюдается bathochromic сдвиг максимума люминесценции КТ с 649 до 688 нм (рис. 2, б). Из рис. 2, в видно, что соотношение между интенсивностями пиков ципрофлоксацина и AgInS₂/ZnS варьируется в зависимости от концентрации антибиотика в растворе.

Установлена линейная зависимость между концентрацией ципрофлоксацина и интенсивностью люминесцентного сигнала антибиотика (рис. 2, г) с коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0.94$.

Вероятная схема, объясняющая взаимодействие между стабилизированными тиогликолевой кислотой КТ AgInS₂/ZnS и ципрофлоксацином, представлена на рис. 3 [16]. Происходит электростатическое взаимодействие протонированных аминогрупп ципрофлоксацина с диссоциированными карбоксигруппами кислоты, что

приводит к изменению поверхности КТ, и вызывает тушение люминесценции AgInS₂/ZnS [17].

2.3. Инкапсуляция квантовых точек в нетканую матрицу

Для инкапсуляции и иммобилизации активных веществ и частиц в различные нетканые матрицы чаще всего используется метод адсорбции [6]. Однако в данной работе был использован подход, при котором активные вещества добавляются в формовочный раствор, и инкапсуляция происходит уже непосредственно в процессе электроформования [3,4]. Поскольку КТ AgInS₂/ZnS не растворимы в DMF (рис. 2, а), то основным условием успешной инкапсуляции наночастиц в полимерные волокна являлось образование однородной смеси с раствором полимера. В результате были получены образцы люминесцентных нетканых материалов, фотографии которых представлены на рис. 4.

На рис. 5, а показаны спектры люминесценции (при $\lambda_{\text{возб}} = 360$ нм) нетканых материалов PAN и PAN–AgInS₂/ZnS. Как видно из рисунка, в спектре люминесценции PAN присутствуют два максимума при длине волны 416 и 445 нм.

По сравнению с системой ципрофлоксацин–AgInS₂/ZnS, максимум люминесценции полученных нановолокон, соответствующий AgInS₂/ZnS, не меняется, что свидетельствует об отсутствии взаимодействия в нановолокнах между PAN и AgInS₂/ZnS. Это позволяет предположить, что КТ внедрены в полимерную матрицу физически, а не через химическое связывание.

Введение ципрофлоксацина в систему PAN–AgInS₂/ZnS вызывает изменение спектра люминесценции КТ. Как видно из рис. 5, б, PAN и ципрофлоксацин имеют близкие значения λ_{max} в диапазоне 400–500 нм, что приводит к частичному перекрытию полос. При высоких концентрациях ципрофлоксацина ($C_M = 1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-3}$ М) практически полностью подавляется люминесценция как полимерной матрицы, так и КТ AgInS₂/ZnS, что может быть объяснено тушением их люминесценции ципрофлоксацином. При концентрации ципрофлоксацина $C_M = 1 \cdot 10^{-4}$ М наблюдается как люминесценция антибиотика, так и люминесценция AgInS₂/ZnS, а также плечо в диапазоне 415–430 нм, характерное для структуры PAN. Снижение концентрации ципрофлоксацина до $C_M = 1 \cdot 10^{-7}$ М приводит к увеличению сигнала КТ и нетканой матрицы, приближая профиль спектра люминесценции к профилю исходной системы PAN–AgInS₂/ZnS.

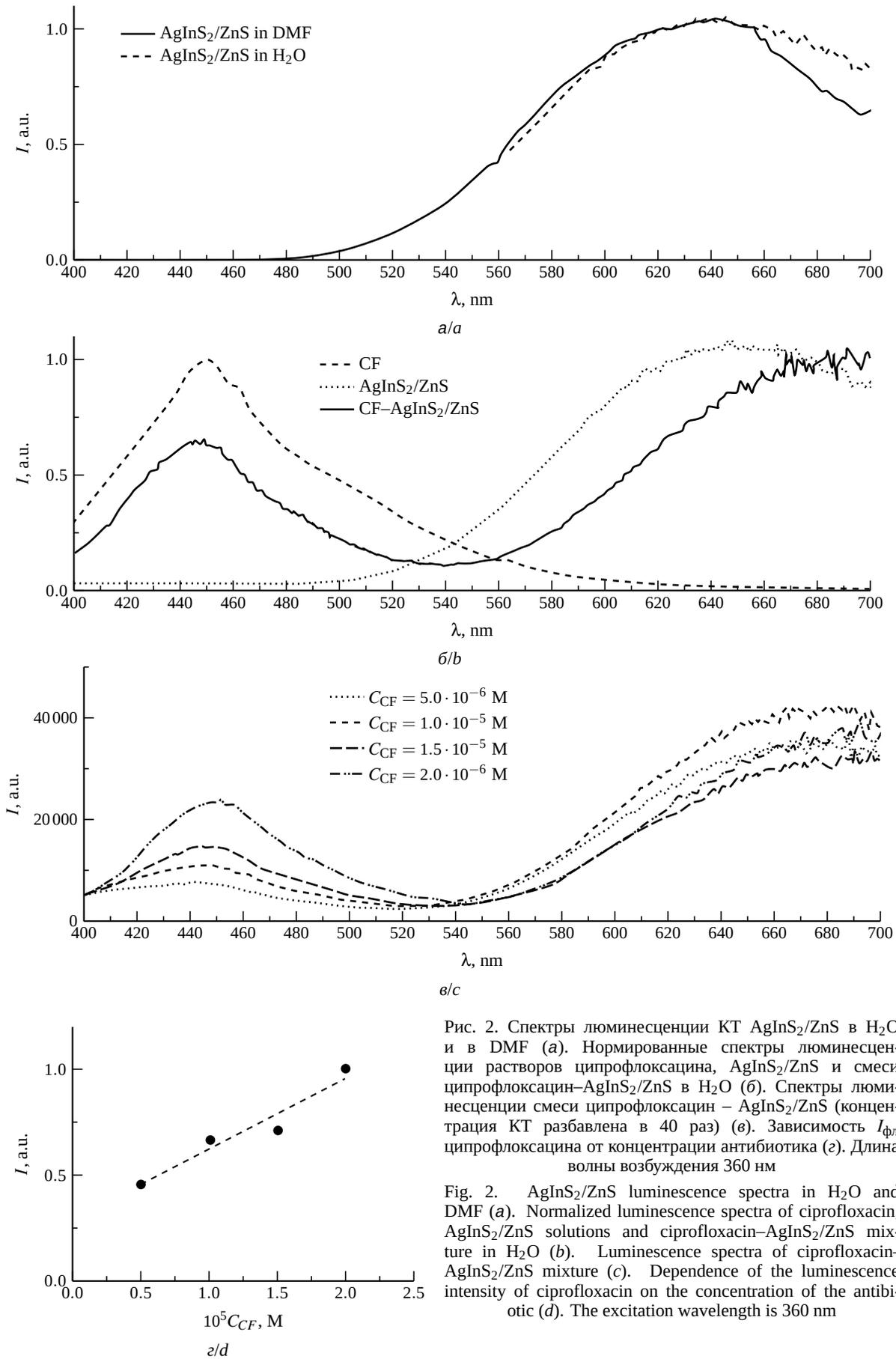


Рис. 2. Спектры люминесценции КТ AgInS₂/ZnS в H₂O и в DMF (а). Нормированные спектры люминесценции растворов ципрофлоксацина, AgInS₂/ZnS и смеси ципрофлоксацин–AgInS₂/ZnS в H₂O (б). Спектры люминесценции смеси ципрофлоксацин – AgInS₂/ZnS (концентрация КТ разбавлена в 40 раз) (в). Зависимость I_{фл} ципрофлоксацина от концентрации антибиотика (г). Длина волны возбуждения 360 нм

Fig. 2. AgInS₂/ZnS luminescence spectra in H₂O and DMF (a). Normalized luminescence spectra of ciprofloxacin, AgInS₂/ZnS solutions and ciprofloxacin–AgInS₂/ZnS mixture in H₂O (b). Luminescence spectra of ciprofloxacin–AgInS₂/ZnS mixture (c). Dependence of the luminescence intensity of ciprofloxacin on the concentration of the antibiotic (d). The excitation wavelength is 360 nm

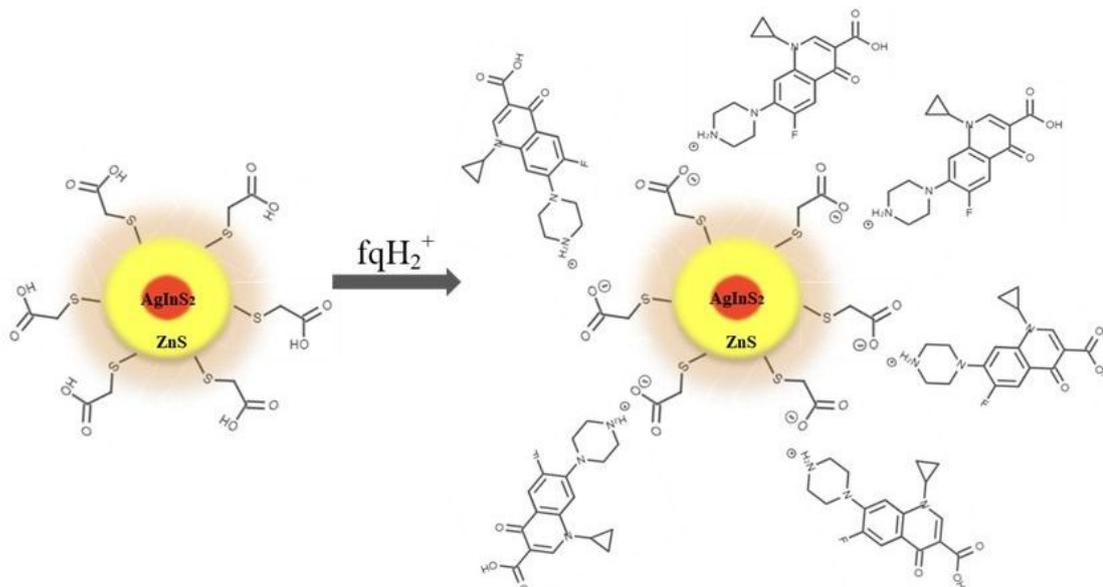


Рис. 3. Вероятная схема тушения люминесценции КТ $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в присутствии ципрофлоксацина (цвет онлайн)
 Fig. 3. Probable scheme of quenching $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ luminescence in the presence of ciprofloxacin (color online)

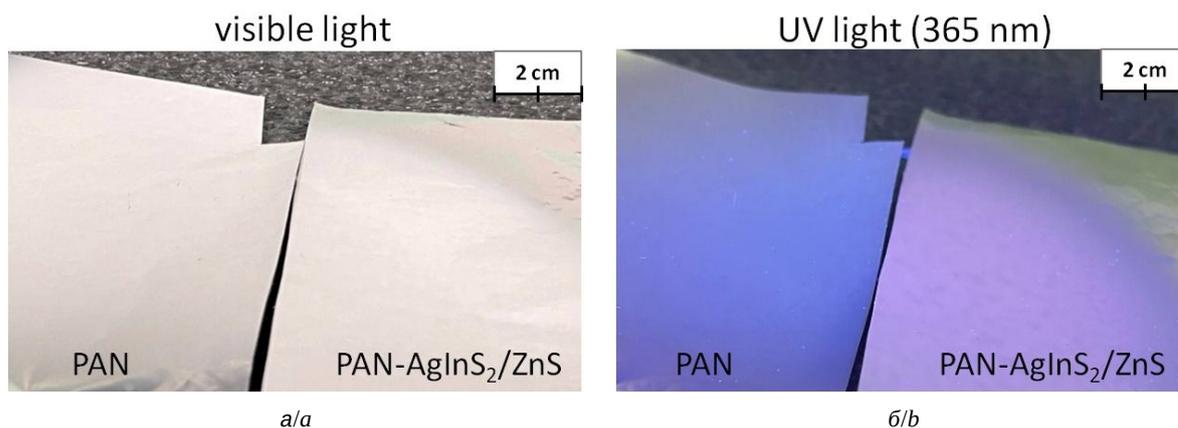


Рис. 4. Фотографии нетканых материалов PAN и PAN– $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в видимом (а) и ультрафиолетовом (б) свете. Длина волны возбуждения 365 нм (цвет онлайн)
 Fig. 4. Photos of PAN and PAN– $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ nonwovens in visible (a) and ultraviolet (b) light. The excitation wavelength is 365 nm (color online)

Влияние ципрофлоксацина на интенсивность люминесценции КТ $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, инкапсулированных в нетканую матрицу PAN, изучалось следующим образом. Для каждой концентрации ципрофлоксацина подготавливалось три образца PAN– $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ для повышения достоверности экспериментальных данных. На первом этапе фиксировался спектр люминесценции образца в исходном состоянии, затем образец пропитывался раствором ципрофлоксацина с заданной концентрацией, и спектр люминесценции регистрировался снова. Такой подход позволяет минимизировать погрешности, связанные с неоднородностью нетканой матрицы. Пик КТ $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ на каждом спек-

тре аппроксимировался функцией Гаусса, затем сравнивались параметры пиков каждого образца в исходном состоянии и после добавления ципрофлоксацина. Данные по образцам, пропитанным раствором ципрофлоксацина с идентичной концентрацией, усреднялись. По результатам анализа установлено, что наиболее значимые изменения наблюдаются в интенсивности пика $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. Положение пика и его ширина на половине высоты не имеют достоверно определяемых изменений при варьировании концентрации ципрофлоксацина.

Как видно из рис. 5, в, присутствие ципрофлоксацина в растворе уверенно определяется

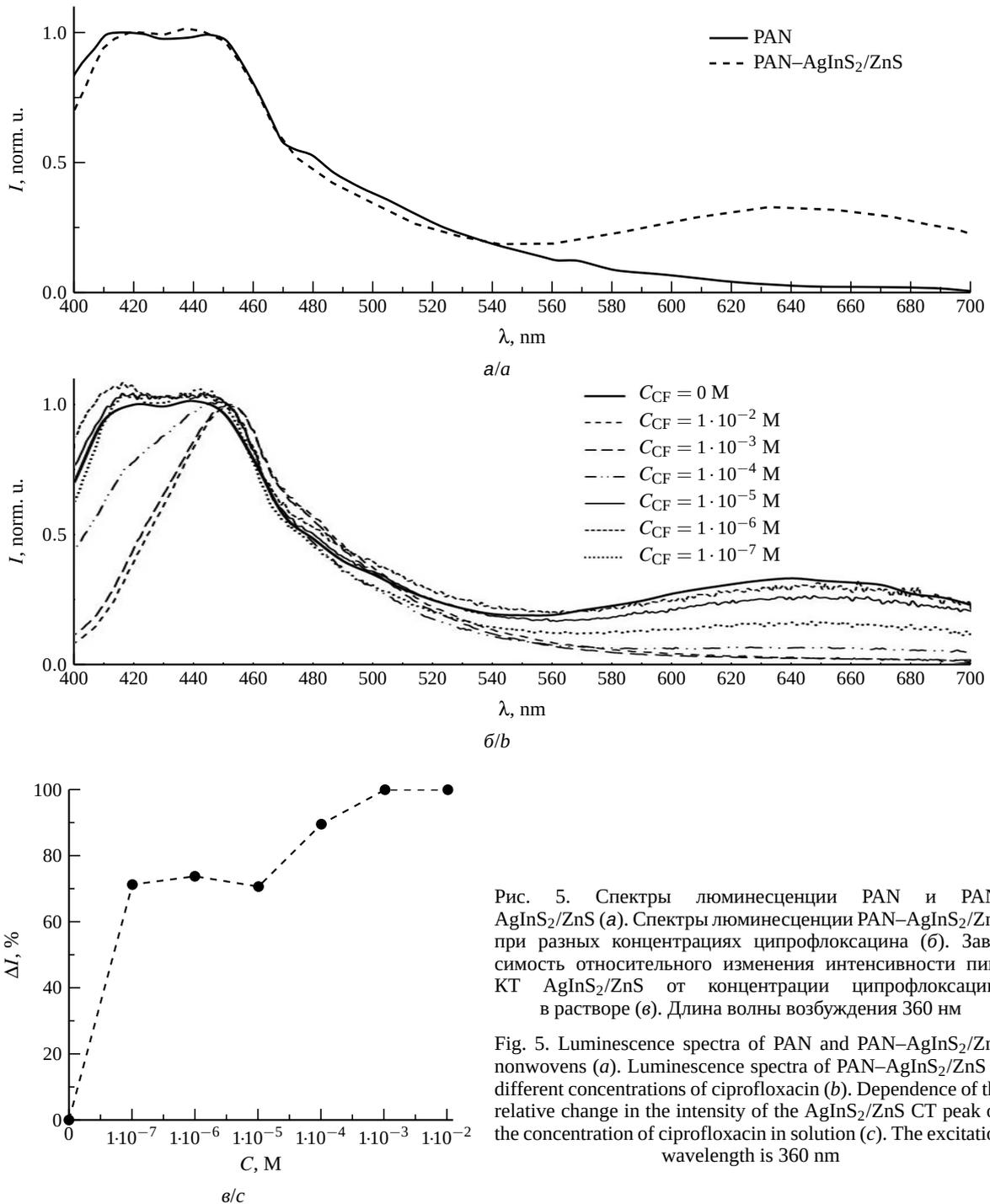


Рис. 5. Спектры люминесценции PAN и PAN–AgInS₂/ZnS (а). Спектры люминесценции PAN–AgInS₂/ZnS при разных концентрациях ципрофлоксацина (б). Зависимость относительного изменения интенсивности пика КТ AgInS₂/ZnS от концентрации ципрофлоксацина в растворе (в). Длина волны возбуждения 360 нм

Fig. 5. Luminescence spectra of PAN and PAN–AgInS₂/ZnS nonwovens (a). Luminescence spectra of PAN–AgInS₂/ZnS at different concentrations of ciprofloxacin (b). Dependence of the relative change in the intensity of the AgInS₂/ZnS CT peak on the concentration of ciprofloxacin in solution (c). The excitation wavelength is 360 nm

с помощью системы PAN–AgInS₂/ZnS вплоть до концентрации $C_M = 1 \cdot 10^{-7}$ М. Наблюдается снижение интенсивности пика AgInS₂/ZnS на величину от 70 до 90%. При этом величина изменения интенсивности практически идентична для концентраций ципрофлоксацина от $C_M = 1 \times 10^{-5}$ М до $C_M = 1 \cdot 10^{-7}$ М. И только при повышении концентрации до $C_M = 1 \cdot 10^{-4}$ М наблюдается рост её абсолютной величины до 90%. Вероятно, постоянство относительного изменения

интенсивности пика AgInS₂/ZnS при малых концентрациях ципрофлоксацина обусловлено особенностями проникновения молекул антибиотика в волокна полимерной нетканой матрицы.

Выводы

В результате проведённых исследований разработан гибридный люминесцентный материал PAN–AgInS₂/ZnS, позволяющий определять присутствие антибиотика ципрофлоксацина в водных



растворах при низких концентрациях ($C_M = 1 \times 10^{-7}$ М). Введение ципрофлоксацина в систему приводит к подавлению люминесценции при высоких концентрациях и к постоянному снижению интенсивности пика КТ при низких ($C_M = 10^{-5}$ М и менее). При этом в нановолокнах PAN–AgInS₂/ZnS отсутствует химическое взаимодействие между полимером и КТ.

Предложена схема подавления люминесценции КТ при взаимодействии их оболочек с молекулами ципрофлоксацина.

Полученные результаты позволяют создать основу для разработки портативных люминесцентных сенсоров для мониторинга фторхинолонов в биологических жидкостях, фармацевтических препаратах и экологических образцах.

Список литературы / References

- Liu X., Yu D., Huo C., Song X., Gao Y., Zhang S., Zeng H. A Perovskite Light-Emitting Device Driven by Low-Frequency Alternating Current Voltage. *Adv. Opt. Mater.*, 2018, vol. 6, iss. 16, art. 1800206. <https://doi.org/10.1002/adom.201800206>
- Zhang X., Wang F. Recent advances in flexible alternating current electroluminescent devices. *APL Mater.*, 2021, vol. 9, iss. 3, art. 030701. <https://doi.org/10.1063/5.0040109>
- Serdobintsev A., Neplokh V., Koryakin A., Kozhevnikov I., Yakubova A., Kirilenko D., Saveleva M., Makarov S., Mukhin I., Demina P. In situ synthesis and stabilization of perovskite quantum dots in electrospun fibers. *J. Semicond.*, 2025, vol. 46, iss. 2, art. 022801. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/25060014>
- Neplokh V., Markina D. I., Baeva M., Pavlov A. M., Kirilenko D. A., Mukhin I. S., Pushkarev A. P., Makarov S. V., Serdobintsev A. A. Recrystallization of CsPbBr₃ nanoparticles in fluoropolymer nonwoven mats for down-and up-conversion of light. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, iss. 2, art. 412. <https://doi.org/10.3390/nano11020412>
- Xue J., Wu T., Dai Y., Xia Y. Electrospinning and Electrospun Nanofibers: Methods, Materials, and Applications. *Chem. Rev.*, 2019, vol. 119, iss. 8, pp. 5298–5415. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593>
- Arzhanukhina A. I., Komova N. S., Pavlov A. M., Serdobintsev A. A., Rusanova T. Y., Goryacheva I. Y. SERS Assays Based on Electrospun Nanofibers: Preparation and Analytical Applications. *Crit. Rev. Anal. Chem.*, 2024, vol. 54, iss. 7, pp. 2309–2324. <https://doi.org/10.1080/10408347.2023.2165876>
- Halicka K., Cabaj J. Electrospun Nanofibers for Sensing and Biosensing Applications—A Review. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, iss. 12, art. 6357. <https://doi.org/10.3390/ijms22126357>
- Ponomaryova T. S., Olomsкая V. V., Abalymov A. A., Anisimov R. A., Drozd D. D., Drozd A. V., Novikova A. S., Lomova M. V., Zakharevich A. M., Goryacheva I. Y., Goryacheva O. A. Visualization of 2D and 3D Tissue Models via Size-Selected Aqueous AgInS/ZnS Quantum Dots. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, vol. 16, iss. 31, pp. 40483–40498. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c05681>
- Ding R., Chen Y., Wang Q., Wu Z., Zhang X., Li B., Lin L. Recent advances in quantum dots-based biosensors for antibiotics detection. *J. Pharm. Anal.*, 2022, vol. 12, iss. 3, pp. 355–364. <https://doi.org/10.1016/j.jpha.2021.08.002>
- Mal J., Nancharaiyah Y. V., Hullebusch E. D. Van, Lens P. N. L. Metal chalcogenide quantum dots: Biotechnological synthesis and applications. *RSC Adv.*, 2016, vol. 6, iss. 47, pp. 41477–41495. <https://doi.org/10.1039/C6RA08447H>
- Ponomaryova T. S., Olomsкая V. V., Novikova A. S., Goryacheva I. Y. Effect of pH and ionic strength on the photoluminescence of size-fractionated AgInS₂/ZnS quantum dots. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 238–244. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-238-244>
- Pham T. D. M., Ziora Z. M., Blaskovich M. A. T. Quinolone antibiotics. *Medchemcomm*, 2019, vol. 10, iss. 10, pp. 1719–1739. <https://doi.org/10.1039/c9md00120d>
- Rusu A., Hancu G., Uivarosi V. Fluoroquinolone pollution of food, water and soil, and bacterial resistance. *Environ. Chem. Lett.*, 2014, vol. 13, iss. 1, pp. 21–36. <https://doi.org/10.1007/s10311-014-0481-3>
- Polishchuk A. V., Karaseva E. T., Medkov M. A., Karasev V. E. Fluoroquinolones: Composition, Structure, and Antibacterial Properties. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2005, no. 2 (120), pp. 128–137 (in Russian).
- Elchishcheva Yu. B. *Spektrofotometricheskiye metody analiza: uchebnoye posobiye* [Spectrophotometric methods of analysis: A tutorial]. Perm, Perm University Publ., 2023, 188 p. (in Russian).
- Stroyuk O., Raevskaya A., Spranger F., Selyshchev O., Dzhagan V., Schulze S., Zahn D. R. T., Eychmüller A. Origin and Dynamics of Highly Efficient Broadband Photoluminescence of Aqueous Glutathione-Capped Size-Selected Ag-In-S Quantum Dots. *J. Phys. Chem. C*, 2018, vol. 122, iss. 25, pp. 13648–13658. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.8b00106>
- Yang B., Zhang Y., Zhang Q., Liu Y., Yan Y. Study on the preparation of water-soluble AgInS₂ quantum dots and their application in the detection of ciprofloxacin. *Mater. J. Sci. Mater. Electron.*, 2019, vol. 30, pp. 18794–18801. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-02233-9>

Поступила в редакцию 23.11.2025; одобрена после рецензирования 15.12.2025; принята к публикации 19.12.2025; опубликована 31.03.2026

The article was submitted 23.11.2025; approved after reviewing 15.12.2025; accepted for publication 19.12.2025; published 31.03.2026