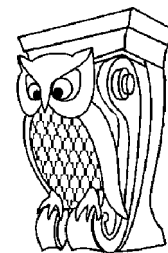




Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 165–174
Izvestiya of Saratov University. Physics, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 165–174
<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

Научная статья
УДК 544.723:544.723.2:535.37



Влияние пиридоксина и его производных на флуоресцентные свойства квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и на поверхности полиакрилонитрильных волокон

А. Ю. Шабунина, В. В. Оломская, Т. Ю. Русанова[✉], И. Ю. Горячева

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

Шабунина Анна Юрьевна, аспирант кафедры аналитической химии и химической экологии Института химии, a.shabunina00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5329-9896>, AuthorID: 1157670

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, доцент, 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, заведующий кафедрой общей и неорганической химии Института химии, goryachevai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>, AuthorID: 50556

Аннотация. Пиридоксин – одна из форм витамина В6, жизненно важного водорастворимого витамина, проявляющего сильные антиоксидантные свойства. Мексидол и Эмоксипин – это отечественные препараты, активные вещества которых являются производными пиридоксина. Данные препараты обладают широким спектром фармакологического действия, в том числе антигипоксическим и ноотропным. В статье предложен способ контроля содержания активных фармацевтических ингредиентов препаратов на основе их влияния на флуоресценцию квантовых точек. Для предварительного концентрирования фармацевтических ингредиентов предложено использовать полученные методом электроформования волокна полиакрилонитрила, перспективные нетканые материалы для создания сорбентов и тест-средств. С их помощью можно проводить концентрирование аналитов. Для определения концентрации активных фармацевтических ингредиентов использованы тройные квантовые точки $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, обладающие такими преимуществами как яркая флуоресценция, биосовместимость, нетоксичность, возможность взаимодействия с лекарственными средствами. В работе изучено влияние пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината на интенсивность флуоресценции фракций тройных квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и нанесенных на волокно полиакрилонитрила. Используются фракции квантовых точек с максимумами люминесценции 591 и 620 нм в связи с их наибольшим квантовым выходом и максимальным цветовым контрастом. Для витамина В6 наиболее чувствительной оказалась фракция квантовых точек 620 нм, нанесенных на волокна полиакрилонитрила, а для препарата Эмоксипин – фракция квантовых точек с максимумом 620 нм в водном растворе. Влияние препаратов на КТ может быть описано линейной зависимостью интенсивности флуоресценции от концентрации аналитов (с высоким значением коэффициента детерминации для В6). По времени затухания можно сделать вывод, что процессы на поверхности вносят наибольший вклад при взаимодействии квантовых точек и Мексидола. Для витамина В6 и Эмоксипина с квантовыми точками $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ необходимо исследовать наличие электростатического или иного взаимодействия. Дополнительного изучения требует влияние вспомогательных веществ, присутствующих в лекарственных формах, морфология нетканого материала.

Ключевые слова: волокна полиакрилонитрила, люминесценция, квантовые точки $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$, сорбция, определение лекарственных препаратов, пиридоксин, витамин В6, этилметилгидроксипиридин, этилметилгидроксипиридина сукцинат

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-23-00519).

Для цитирования: Шабунина А. Ю., Оломская В. В., Русанова Т. Ю., Горячева И. Ю. Влияние пиридоксина и его производных на флуоресцентные свойства квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных растворах и на поверхности полиакрилонитрильных волокон // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 165–174. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

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

Article

The effect of pyridoxine and its derivatives on the fluorescent properties of $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots in aqueous solutions and on the surface of polyacrylonitrile fibers

A. Yu. Shabunina, V. V. Olomskaia, T. Yu. Rusanova[✉], I. Yu. Goryacheva

© Шабунина А. Ю., Оломская В. В., Русанова Т. Ю., Горячева И. Ю., 2026



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

Ann Yu. Shabunina, a.shabunina00@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-5329-9896>, AuthorID: 1157670

Vera V. Olomskaya, o-v-v99@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9065-1648>, AuthorID: 1308882

Tatiana Yu. Rusanova, tatyaryas@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5902-3707>, AuthorID: 38756

Irina Yu. Goryacheva, goryachevai@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1781-6180>, AuthorID: 50556

Abstract. Background and Objectives: Pyridoxine is a form of vitamin B6, a vital water-soluble vitamin with strong antioxidant properties. Mexidol and Emoxipin are domestically produced medications whose active ingredients are pyridoxine derivatives. These drugs have a broad spectrum of pharmacological effects, including antihypoxic and nootropic effects. This article proposes a method for monitoring the content of active pharmaceutical ingredients in medications based on their effect on the fluorescence of quantum dots. For pre-concentration of drugs, we propose using polyacrylonitrile fibers produced by electrospinning. These fibers promising for creating sorbents and test kits. Moreover they can be used for pre-concentration and subsequent determination of analytes. Triple quantum dots AgInS₂/ZnS, which offer advantages such as bright fluorescence, biocompatibility, non-toxicity, and the ability to interact with drugs, were used to detect the concentration of active pharmaceutical ingredients. **Materials and Methods:** The fiber was obtained by electrospinning (voltage 70 ± 5 kV, spinning time 60 minutes, solvent dimethylformamide, current 0.02 mA). Fractions of previously synthesized 591 and 620 nm AgInS₂/ZnS quantum dots were used. The effect of vitamin B6, Mexidol, and Emoxipin on the luminescent properties of the quantum dots was studied by sorption of aqueous solutions with varying drug concentrations and a constant quantum dot concentration onto polyacrylonitrile fibers. **Results:** For vitamin B6, the most sensitive fraction was the 620 nm quantum dot fraction applied to polyacrylonitrile fibers, and for the drug Emoxipin, the most sensitive fraction was the quantum dot fraction with a maximum of 620 nm in an aqueous solution. The action of the drugs can be described by a linear dependence of the fluorescence intensity on the concentration of the analytes (with a high value of the coefficient of determination for B6). **Conclusion:** Based on the decay time, it can be concluded that surface processes make the greatest contribution to the interaction between quantum dots and Mexidol. For vitamin B6 and Emoxipin with AgInS₂/ZnS, the presence of electrostatic or other interactions should be investigated. The influence of excipients presents in dosage forms and the morphology of the nonwoven material require additional study.

Keywords: polyacrylonitrile fibers, luminescence, AgInS₂/ZnS quantum dots, sorption, drug detection, pyridoxine, vitamin B6, ethylmethylhydroxypyridine, ethylmethylhydroxypyridine succinate

Acknowledgments: This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-23-00519).

For citation: Shabunina A. Yu., Olomskaya V. V., Rusanova T. Yu., Goryacheva I. Yu. The effect of pyridoxine and its derivatives on the fluorescent properties of AgInS₂/ZnS quantum dots in aqueous solutions and on the surface of polyacrylonitrile fibers. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 165–174 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-165-174>, EDN: PSKIKS

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

Введение

На основе витамина B6, участвующего в метаболизме аминокислот и проявляющего антиоксидантную активность [1] синтезирован отечественный оригинальный препарат Мексидол. Он обеспечивает нейропротекторное действие и широкий спектр клинических эффектов за счет имеющихся в его составе двух связанных и функционально значимых компонентов: 2-этил-6-метил-3-гидроксипиридина и сукцината. С наличием 3-гидроксипиридина в структуре Мексидола связаны антиоксидантная и мембранотропная активность препарата, сукцинат в составе обеспечивает способность индуцировать сукцинатный рецептор SUCNR1, улучшать сукцинатную сигнализацию, стимулировать митохондриогенез, восстанавливать митохондриальное дыхание и активизировать цикл Кребса, повышать энергетический статус клетки, что обуславливает антигипоксическое действие [2].

В настоящее время квантовые точки (КТ) широко применяются для решения практических задач в области медицинской диагностики. Одно из существенных преимуществ тройных

квантовых точек состава AgInS₂/ZnS (полупроводниковое ядро AgInS₂, оболочка ZnS) – это их высокая эффективность в поглощении света и излучении, стабильная фотолюминесценция и широкий спектр излучения. В связи с этим их применяют в оптоэлектронике и фотонике, а так как в их состав не входят токсичные тяжёлые металлы (кадмий и свинец), это обуславливает широту их применения и в биомедицине [3–5]. КТ состава AgInS₂/ZnS применяются в качестве зондов для детектирования некоторых металлов [6–8].

На сегодняшний день особое место занимает применение тройных квантовых точек как носителей веществ в определённый участок внутри тела или конкретный орган, где они необходимы. Нетоксичная природа этих квантовых точек, а также растворимость в воде, отличная биосовместимость и контролируемый профиль высвобождения лекарств в целевых участках делают их предпочтительными наноносителями по сравнению с другими носителями, такими как липосомы, хитозан и полимерные наночастицы [9].



Квантовые точки применяются также в диагностике раковых клеток. Для использования квантовых точек состава $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в качестве флуоресцентных зондов в исследованиях *in vitro* они должны обладать низкой физиологической токсичностью и хорошей стабильностью в физиологическом диапазоне pH. В работе [10] изучено влияние pH и ионной силы на фотолюминесцентные свойства фракций квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$. В сильно кислых и щелочных средах наблюдались резкие изменения; диапазон pH и ионной силы, соответствующий биологическим жидкостям, не оказал существенного влияния на фотолюминесцентные свойства всех фракций квантовых точек. Это указывает на потенциальное применение этих нанообъектов в качестве фотолюминесцентных зондов в различных биоприложениях. Разработанные методы неинвазивного скрининга раковых клеток показали значительное улучшение чувствительности по сравнению с классическим цитологическим исследованием [11–13].

Волокна, получаемые методом электроформования (нетканые материалы), приобрели значимость практически во многих отраслях промышленности, особенно в фармацевтической и биомедицинской, благодаря своим исключительным физико-химическим свойствам. Такие волокна формируют из различных полимеров в зависимости от их назначения. Многие из них биоразлагаемы и биосовместимы, а также способны создавать высокопористую структуру с высокой сорбционной емкостью, что делает их пригодными в широком спектре применений, включая упаковку, доставку лекарств, медицинские имплантаты органов и тканей, заживление ран и перевязочные материалы в фармацевтической промышленности, а также использование в качестве фильтров или адсорбентов при очистке воды [14]. Электроформование стало революционным методом изготовления волокон, обеспечивая точный контроль их морфологией, составов и функциональности. Этот универсальный процесс позволяет получать волокна от нано- до микромасштабов с заданными свойствами, интегрируя разнообразные материалы и архитектуры для передовых исследований и промышленных применений.

Полимеры являются одним из наиболее широко изученных классов материалов для электроформования из-за простоты настройки

композиции путем простого выбора различных совместимых пар полимера и растворителя. Процесс электроформования позволяет изготавливать волокна с определенным диапазоном размера диаметра и высоким отношением длины волокна к его диаметру, что приводит к получению материалов с исключительной структурной стабильностью и масштабируемостью. Ключевое преимущество электроформованных полимерных нано- и микроволокон заключается в их настраиваемых механических свойствах, которые можно точно контролировать, регулируя критические параметры формования, такие как вязкость раствора, концентрация полимера, приложенное напряжение и расстояние от иглы до коллектора.

Например, в работе [15] исследованы нетканые материалы на основе фторопласта, изучено влияние таких параметров, как межэлектродное расстояние и вязкость формовочного раствора, на характеристики сформованных материалов, включая размер самого материала, диаметр его волокон, а также смачиваемость его поверхности. Показано, что оптимальное межэлектродное расстояние должно составлять от 15 до 25 см. Результаты исследования адресованы для использования при оптимизации технологических процессов получения нетканых материалов из фторопласта.

Технологические параметры электроформования влияют на свойства получаемых биомедицинских волокон и мембран. Подбираются оптимальная концентрация (однородные волокна), более высокая молекулярная масса (более гладкие волокна), более высокая проводимость (меньший и однородный диаметр волокна) и оптимальная вязкость (постоянный выброс струи/иглы). Параметры окружающей среды, такие как рабочая температура и влажность, также играют важную роль в контроле параметров волокна [16]. Электроформованные волокна активно применяются в функциональных мембранах, газовых датчиках, энергетических системах и каталитических процессах, решая критически важные задачи в этих областях [17].

Целью данной работы явилась оценка возможности определения пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината на основе их влияния на интенсивность флуоресценции фракций тройных квантовых точек $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ в водных



растворах и нанесенных на волокно полиакрилонитрила.

Материалы и методы

Материалы

В работе использовались: полиакрилонитрил (ПАН) ($\text{CH}_2\text{-CH}(\text{CN})_n$) производство ОАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург; диметилформамид (ДМФА, х. ч.) производство Реахим, г. Москва; пиридоксин ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}_3\cdot\text{HCl}$), витамин В6, раствор для инъекций 50 мг/мл, производство ОАО «Борисовский завод медицинских препаратов»; этилметилгидроксипиридина сукцинат ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}\cdot\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4$), мексидол, раствор для инъекций 50 мг/мл, производство ООО «Фармасофт», г. Москва; этилметилгидроксипиридин ($\text{C}_8\text{H}_{11}\text{NO}$), эмоксипин, раствор для инъекций 10 мг/мл, производство ФГУП «Московский эндокринный завод»; нитрат серебра (AgNO_3 , 99.0%), хлорид индия (InCl_3 , 99.9%), тиогликолевая кислота (ТГК, 98.0%), безводный сульфид натрия (Na_2S , 90%+), раствор аммиака (5М), безводный ацетат цинка (II) ($\text{Zn}(\text{CH}_2\text{COO})_2$), азотная кислота (70%), производство Sigma-Aldrich, г. Сент-Луис (США). Хлорид натрия, хлористый водород и 2-пропанол получены от компании «Экос-1» (г. Москва). Вода, использованная в ходе данного исследования, получена с помощью системы очистки воды Milli-Q (18.2 МОм·см, Millipore, г. Дармштадт, Германия).

Оборудование

Спектры флуоресценции регистрировали на гибридном ридере BioTek Synergy H1 (BioTek Instruments corp., США) в 96-луночном планшете. Длина волны возбуждения составляла 360 нм, диапазон длин волн регистрации люминесценции 500–700 нм. Подробнее выбор условий регистрации описан в работе [10].

Измерения времени жизни люминесценции проводили с помощью флуориметра DeltaPro TCSPC Lifetime Fluorometer (HORIBA Scientific, Киото, Япония).

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

Волокна электроформовали с использованием прибора Elmarco «Nanospider NS Lab 200» (Elmarco, г. Либерец, Чехия).

Исследование морфологии поверхности волокон проведено в лаборатории диагностики

наноматериалов и структур Образовательно-научного института наноструктур и биосистем ФГБОУ ВО «СГУ имени Н. Г. Чернышевского» с использованием автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа MIRA 2 LMU (Tescan, г. Брно, Чехия) на базе Центра коллективного пользования СГУ. Разрешающая способность микроскопа достигает 1 нм.

Исследования проводили в режиме высокого вакуума порядка 10^{-2} Па при ускоряющем напряжении 30 кВ. Подготовка образца к исследованию включала в себя нанесение токопроводящей реплики из золота (Au) с помощью магнетронного напыления. Толщина реплики контролировалась током плазмы и временем напыления. Толщина напыления – от 5 до 10 нм, что позволяет получать микрофотографии с большим увеличением без собственной визуализации напыляемого вещества. Изображения морфологии поверхности получены во вторичных электронах.

Методики регистрации спектров флуоресценции

Спектры флуоресценции регистрировали при помощи полимерного иммунологического планшета с 72 лунками. Для системы «Препарат-КТ» вносили в лунку 80 мкл водного раствора препарата и 20 мкл КТ. Для системы «ПАН-препарат-КТ» на дно лунки клали нетканый материал размером 5 х 5 мм, добавляли 5 мкл водного раствора препарата, высушивали, затем добавляли 20 мкл КТ.

Методика измерения времени жизни люминесценции квантовых точек в отсутствие и присутствии препаратов

Измерения времени жизни люминесценции проводили для коллоида квантовых точек с оптической плотностью 0.1 при 360 нм. Измерения проводили в стандартной 10-мм кварцевой кювете без оптических фильтров или монохроматора при поляризации регистрируемого излучения 54.7° . Функция отклика прибора IRF регистрировалась с рассеивающей кварцевой кюветы, заполненной бидистиллированной водой. Диапазон измерений составлял 870 нс.

Приготовление формовочного раствора полимера и получение нетканых материалов

Навеску полимера (13 мас.%) растворяли в ДМФА при постоянном перемешивании (300 об/мин) и нагреве (50°C). Условия получения материала представлены в табл. 1.



Таблица 1 / Table 1

Условия формирования нетканого материала
Conditions for forming nonwoven material

Параметр / Parameter	Значение / Value
Массовая доля ω , % / Mass fraction ω , %	13
Объем формовочного раствора V , мл / Volume of solution V , ml	100
Температура T , °C / Temperature T , °C	50 ± 3
Влажность, % / Humidity, %	10 ± 3
Напряжение U , кВ / Voltage U , kV	70 ± 5
Сила тока I , мА / Current I , mA	0.02
Напряженность, кВ/см / Electric field strength, kV/cm	4.4 ± 1
Растворитель / Solvent	ДМФА / DMF
Время формования τ , мин / Spinning time τ , min	60
Расстояние от электрода до коллектора, см / Distance from electrode to collector, cm	12–20

Изучение морфологии нетканых материалов на основе полиакрилонитрила

Поверхность полученных нетканых материалов на основе полиакрилонитрила изучали с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Волокно ПАН имеет в поперечном сечении округлую форму (рис. 1). Поверхности волокон однородны и не имеют видимых дефектов. Диаметры отдельных волокон исходного материала ПАН находились в пределах

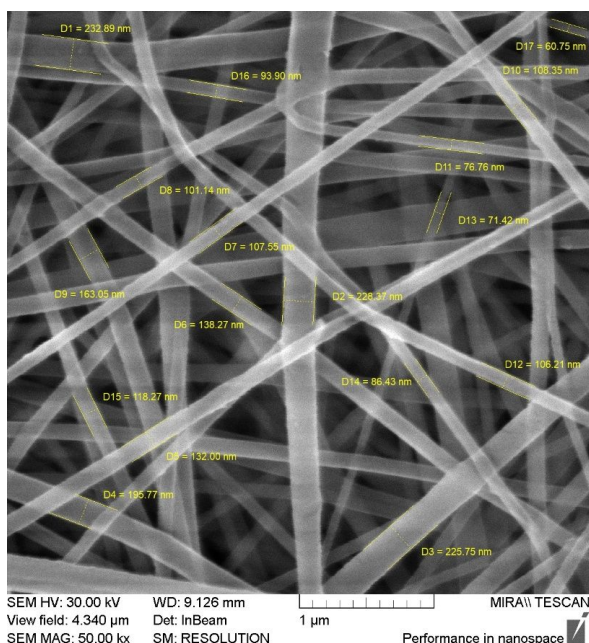


Рис. 1. СЭМ-изображения волокон ПАН
Fig. 1. SEM images of PAN fibers

от 60 до 230 нм; средний диаметр, рассчитанный по 17 точкам, составил 132 нм.

Синтез КТ $AgInS_2/ZnS$.

Фракционирование по размерам

В 96 мл воды при комнатной температуре последовательно смешивали прекурсоры: 1 мл $AgNO_3$ (0.1 М), 2 мл ТГК (1 М), 0.65 мл $NH_3 \cdot H_2O$ (5 М), 0.7 мл $InCl_3$ (1.0 М) и 1 мл Na_2S (10 М) для синтеза ядер $AgInS_2$. Затем раствор нагревали в течение 30 мин при 90–95°C. Далее наносили оболочку ZnS следующим образом: в горячий раствор добавляли 1 мл $Zn(CH_3COO)_2$ (1.0 М) и 1 мл ТГК (1.0 М) и нагревали при той же температуре в течение 30 мин. Полученный раствор содержит смесь КТ разных размеров. Разделение по размерам проводили при помощи последовательного осаждения с помощью изопропилового спирта как антирастворителя. Получили серию КТ с максимумом флуоресценции 516–620 нм [18, 19]. Для дальнейших исследований использовали фракции с максимумом флуоресценции 620 и 591 нм. Исходные растворы квантовых точек разбавляли до значения оптической плотности 0.1.

Приготовление растворов витамина В6, этилметилгидрокси-пиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината

Раствор витамина В6 с концентрацией 500 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 50 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл и довели дистиллированной водой до метки.

Раствор мексидола с концентрацией 500 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 50 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл.

Раствор этилметилгидроксипиридина с концентрацией 100 мг/л: 1 мл препарата с концентрацией 10 мг/мл перенесли в колбу на 100 мл и довели дистиллированной водой до метки.

Градуировочные растворы витамина В6, мексидола и этилметилгидроксипиридина (2, 6, 10, 14, 20 мг/л) готовили путем последовательного разбавления исходных растворов.

Результаты и их обсуждение

Структурные формулы исследуемых соединений – пиридоксина и его производных (этилметилгидроксипиридина и этилметилгидроксипиридина сукцината) представлены в табл. 2.

Для электроформования полимерных волокон выбран полиакрилонитрил, так как в предварительных экспериментах он показал наилучшие



Таблица 2 / Table 2

Структурные формулы пиридоксина, этилметилгидроксипиридина, этилметилгидроксипиридина сукцината
Structural formulas of vitamin B6, ethylmethylhydroxypyridine, ethylmethylhydroxypyridine succinate

Вещество / Substance	Структурная формула / Structural formula	Лекарственный препарат / Drug
Пиридоксин / Pyridoxine		Витамин B6 / Vitamin B6
Этилметилгидроксипиридина сукцинат / Ethylmethylhydroxypyridine succinate		Мексидол / Mexidol
Этилметилгидроксипиридин / Ethylmethylhydroxypyridine		Эмоксипин / Emoxipin

сорбционные характеристики (степень извлечения и предельную адсорбцию) по отношению к изучаемым препаратам.

В спектрах поглощения этилметилгидроксипиридина наблюдается полоса поглощения с максимумом в области 300 нм (рис. 2), для КТ поглощение в этой области спектра практически отсутствует. При добавлении КТ к этилметилгидроксипиридину положение полосы

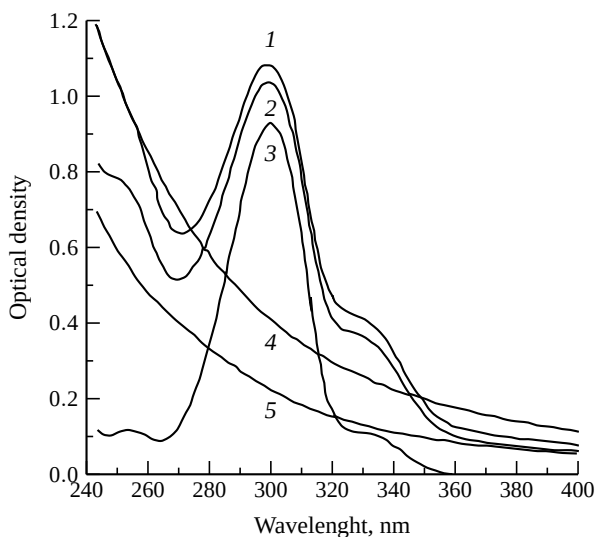


Рис. 2. Спектры поглощения исследуемых препаратов и материалов: 1 – система «Эмоксипин – КТ 591 нм», 2 – система «Эмоксипин – КТ 620 нм», 3 – «Эмоксипин», 4 – КТ 620 нм, 5 – КТ 591 нм

Fig. 2. Absorption spectra of the studied drugs and materials. 1 – system “Emoxipin – QDs 591 nm”, 2 – system “Emoxipin – QDs 620 nm”, 3 – “Emoxipin”, 4 – QDs 620 nm, 5 – QDs 591 nm

не меняется, небольшое возрастание оптической плотности объясняется фоновым поглощением КТ. Подобная картина наблюдалась и для других препаратов.

Спектры флуоресценции исследуемых препаратов показали отсутствие полос испускания в диапазоне от 500 до 700 нм. На рис. 3 представлены спектры поглощения КТ фракций с максимумами люминесценции 591 и 620 нм. Обнаружено усиление интенсивности флуоресценции КТ с увеличением концентрации препаратов как в растворах, так и нанесенных на поверхность ПАН.

Примеры градуировочных зависимостей интенсивности флуоресценции от концентрации аналита представлены на рис. 4. Уравнения для этих зависимостей приведены в табл. 3. Усиление флуоресценции КТ в присутствии препаратов на волокне ПАН позволит в дальнейшем комбинировать предварительное концентрирование веществ на волокне с детектированием концентрации по интенсивности флуоресценции КТ.

Временная зависимость затухания фотолюминесценции квантовых точек позволяет получить представление о динамике процесса. Для квантовых точек временные зависимости затухания фотолюминесценции имели многоэкспоненциальный характер и успешно аппроксимированы трехэкспоненциальной функцией:

$$I(t) = I(0) \sum_{i=1}^3 A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}}$$

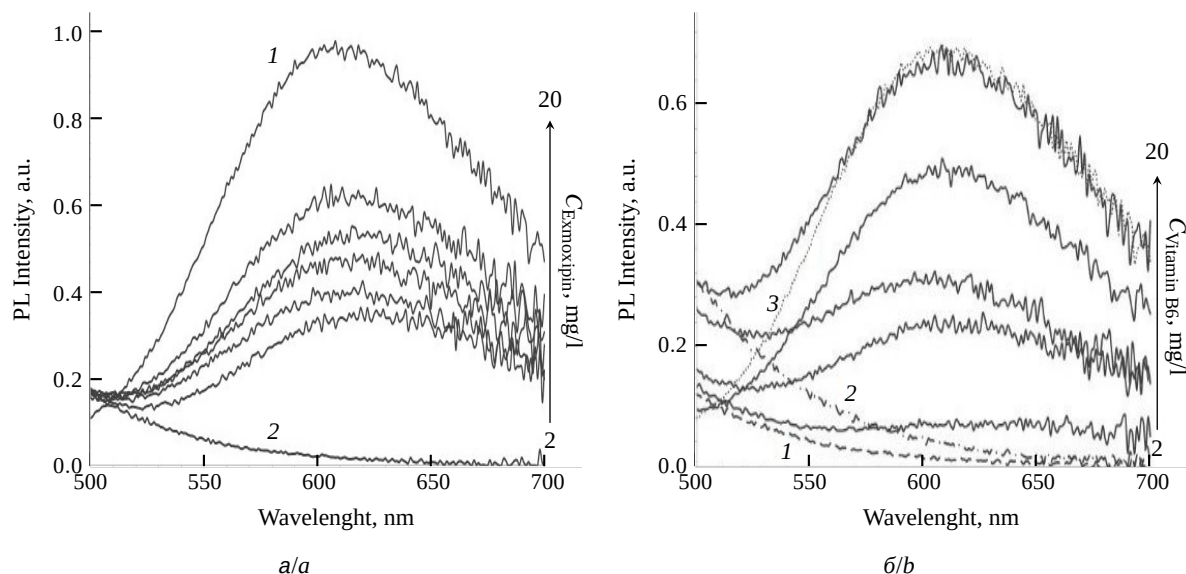


Рис. 3. Спектры флуоресценции при разных концентрациях действующего вещества: а – система «Эмоксипин – КТ 591 нм»: 1 – КТ 591 нм (6 графиков), 2 – «Эмоксипин»; б – система «Витамин В6 – КТ 591 нм/ПАН»: 1 – Витамин В6 (2 графика), 2 – ПАН (4 графика), 3 – КТ 591 нм. Длина волны возбуждения 360 нм

Fig. 3. Fluorescence spectra at different concentrations of the active substance: a – system “Emoxipin – QDs 591 nm”: 1 – QDs 591 nm (6 graphs), 2 – “Emoxipin”; b – system “Vitamin B6 – QDs 591 nm/PAN”: 1 – Vitamin B6 (2 graphs), 2 – PAN (4 graphs), 3 – QDs 591 nm. The excitation wavelength is 360 nm

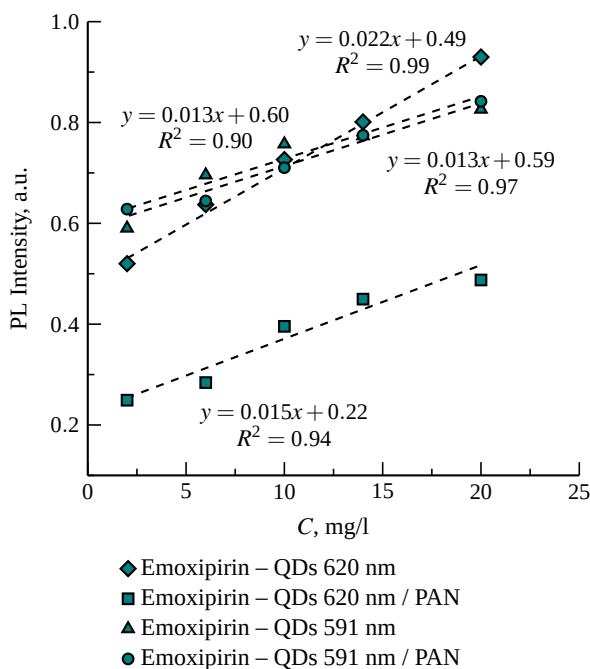


Рис. 4. Градуировочные зависимости интенсивности люминесценции КТ от концентрации эмоксипина
Fig. 4. Calibration curves of the luminescence intensity vs the Emoxipine concentration

Оценку кинетики взаимодействия КТ и препаратов проводили на основе анализа времени затухания КТ 620 нм и системы «Мексидол – КТ 620 нм» при постоянной концентрации мексидола 20 мг/л (табл. 4).

Таблица 3 / Table 3

Уравнения зависимостей интенсивности флуоресценции КТ от концентрации препаратов и коэффициента детерминации

Equations for the dependence of QD fluorescence intensity on the concentration of drugs and coefficients of determination R^2

Препарат / Drugs	КТ, нм / QDs, nm	Сорбент / Sorbent	Уравнение / Equation	R^2
Мексидол / Mexidol	591	–	$y = 0.031x \pm 0.47$	0.79
		ПАН / PAN	$y = 0.027x \pm 0.50$	0.76
	620	–	$y = 0.006x \pm 0.41$	0.54
		ПАН / PAN	$y = 0.011x \pm 0.32$	0.82
Эмоксипин / Emoxipin	591	–	$y = 0.013x \pm 0.60$	0.90
		ПАН / PAN	$y = 0.013x \pm 0.59$	0.98
	620	–	$y = 0.022x \pm 0.49$	0.99
		ПАН / PAN	$y = 0.015x \pm 0.22$	0.94
Витамин В6 / Vitamin B6	591	–	$y = 0.002x \pm 0.46$	0.04
		ПАН / PAN	$y = 0.026x \pm 0.06$	0.92
	620	–	$y = 0.015x \pm 0.58$	0.97
		ПАН / PAN	$y = 0.038x \pm 0.02$	0.99



Кривая затухания состоит из нескольких компонент, каждая из них связана с определенным процессом. Быстрая компонента (τ_1) оценивает вклад рекомбинации экситонов на краю зоны КТ. Средняя компонента (τ_2) отражает влияние электронных или дырочных ловушек. Медленная компонента (τ_3) связана с эффектами на поверхности [20, 21]. Сравнение времен затухания показывает значительное влияние мексидола на среднюю и медленную компоненты.

Таблица 4 / Table 4

Времена затухания люминесценции КТ AgInS₂/ZnS 620 нм в отсутствие и присутствии мексидола
Luminescence decay times of AgInS₂/ZnS 620 nm QDs in the absence and presence of Mexidol

Система / System	τ_1 , нс / τ_1 , ns	τ_2 , нс / τ_2 , ns	τ_3 , нс / τ_3 , ns
КТ 620 нм / QDs 620 nm	398	1314	78.8
Мексидол – КТ 620 нм / Mexidol – QDs 620 nm	262	0.79	1000

Заключение

В работе продемонстрирован эффект усиления флуоресценции КТ AgInS₂/ZnS в присутствии пиридоксина и его производных (этилметилгидроксипиридина и эилметилгидроксипиридина сукцината). Используются фракции КТ 591 и 620 нм в связи с их наибольшим квантовым выходом по сравнению с другими фракциями и максимальным цветовым контрастом.

Влияние препаратов на КТ может быть описано линейной зависимостью интенсивности флуоресценции от концентрации аналитов. Для витамина В6 наиболее чувствительной является фракция КТ 620 нм при сорбции на ПАН (в этом случае коэффициент детерминации близок к 1, см. табл. 3), а для препарата «Эмоксипин» наиболее чувствительна фракция КТ 620 нм в водном растворе. Мексидол дает наименьшее усиление флуоресценции КТ AgInS₂/ZnS. Это может быть связано с наличием вспомогательных веществ, входящих в состав лекарственных препаратов, что требует дополнительного изучения.

Анализ времен затухания показал, что процессы на поверхности вносят наибольший вклад при взаимодействии КТ и мексидола, поэтому требуется более детальное изучение этих процессов. Необходимо также исследовать взаимодействие витамина В6 и эмоксипина с КТ

AgInS₂/ZnS с точки зрения электростатического или иного взаимодействия.

Влияние нетканого материала на люминесценцию неоднозначно. С ростом концентрации витамина В6 увеличивается значение коэффициента детерминации, что может быть связано с наличием большего числа гидроксильных групп и отсутствием мешающих вспомогательных веществ в составе лекарственной формы.

Требуется дополнительное изучение как зависимости флуоресценции от соотношения концентрации препаратов и КТ, так и влияния морфологии нетканого материала на сорбционные и флуоресцентные свойства системы.

Список литературы

1. Calori I., Gusmão L., Tedesco A. B6 vitamers as generators and scavengers of reactive oxygen species // J. Photochem. Photobiol. A. 2021. Vol. 7. Art. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.jprap.2021.100041>
2. Воронина Т. А., Литвинова С. А., Гладышева Н. А., Шульдин А. В. Известные и новые представления о механизме действия и спектре эффектов Мексидола // Журнал неврологии и психиатрии им. С. С. Корсакова. 2025. Т. 125, № 5. С. 22–33. <https://doi.org/10.17116/jnevro202512505122>
3. Yosypenko Y., Mykhailovych V., Yosypenko V., Rotaru A., Khalavka Y. Optical properties and thermal sensitivity of AgInS₂ and AgInS₂/ZnS quantum dots embedded in barium sulphate and calcium carbonate matrices // Opt. Mater. 2025. Vol. 158. Art. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116441>
4. Yang F., Wang Y., Gao J., Sui N., Liu Q., Wang Y., Liu L., Zou L., Kang Z., Zhang H. Studying of the photoluminescence characteristics of AgInS₂ quantum dots // J. Nanopart. Res. 2015. Vol. 17. Art. 159. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2970-0>
5. Wang X., Xie C., Zhong J., Liang X., Xiang W. Synthesis and temporal evolution of Zn-doped AgInS₂ quantum dots // J. Alloys Compd. 2015. Vol. 648. P. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.240>
6. Sun Z., Liu Y., Wei F., Wu Y., Wei L., Tian Y., Zhang Y., Wei C. Aqueous AgInS₂/ZnS quantum dot-based fluorescent probes for highly selective detection of Cu (II) ions // ACS Appl. Nano Mater. 2025. Vol. 8, iss. 27. P. 13876–13885. <https://doi.org/10.1021/acsnm.5c02494>
7. Parani S., Oluwafemi O. S. Selective and sensitive fluorescent nanoprobe based on AgInS₂-ZnS quantum dots for the rapid detection of Cr (III) ions in the midst of interfering ions // Nanotechnology. 2020. Vol. 31, iss. 39. Art. 395501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab9c58>
8. Kurshanov D. A., Khavlyuk P. D., Baranov M. A., Dubavik A., Rybin A. V., Fedorov A. V., Baranov A. V. Magneto-fluorescent hybrid sensor CaCO₃-Fe₃O₄-AgInS₂/ZnS for the detection of heavy metal ions in aqueous media // Materials. 2020. Vol. 13, iss. 19. Art. 4373. <https://doi.org/10.3390/ma13194373>



9. Aladesuyi O., Lebepe T., Maluleke R., Oluwafemi O. Biological applications of ternary quantum dots: A review // *Nanotechnol. Rev.* 2022. Vol. 11, № 1. P. 2304–2319. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0136>
10. Пономарева Т. С., Оломская В. В., Новикова А. С., Горячева И. Ю. Влияние pH и ионной силы на фотолюминесценцию фракционированных по размеру квантовых точек AgInS₂/ZnS // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Физика.* 2023. Т. 23, вып. 3. С. 238–244. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-238-244>
11. Su W., Yang D., Wang Y., Kong Y., Zhang W., Wang J., Fei Y., Guo R., Ma J., Mi L. AgInS₂/ZnS quantum dots for noninvasive cervical cancer screening with intracellular pH sensing using fluorescence lifetime imaging microscopy // *Nano Research.* 2022. Vol. 15, iss. 6. P. 5193–5204. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4104-1>
12. Maji S. K. Luminescence-tunable ZnS–AgInS₂ nanocrystals for cancer cell imaging and photodynamic therapy // *ACS Appl. Bio Mater.* 2022. Vol. 5, iss. 3. P. 1230–1238. <https://doi.org/10.1021/acsabm.1c01247>
13. 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. Yu., Goryacheva O. A. Visualization of 2D and 3D tissue models via size-selected aqueous AgInS₂/ZnS quantum dots // *ACS Appl. Mater. & Interfaces.* 2024. Vol. 16, iss. 31. P. 40483–40498. <https://doi.org/10.1021/acsami.4c05681>
14. Anusiya G., Jaiganesh R. A review on fabrication methods of nanofibers and a special focus on application of cellulose nanofibers // *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* 2022. Vol. 4. Art. 100262. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100262>
15. Шабунина А. Ю., Волоковойнова Л. Д., Кожевников И. О., Зайцев Д. П., Терин Д. В., Савельева М. С., Русанова Т. Ю., Сердобинцев А. А., Демина П. А. Исследование влияния условий электроформования на характеристики нетканого материала на основе фторопласта Ф42Л // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия : Химия. Биология. Экология.* 2025. Т. 25, вып. 2. С. 151–162. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-151-162>
16. Chinnappan B., Krishnaswamy M., Xu H., Hoque M. Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: Effects of process parameters // *Polymers.* 2022. Vol. 14, iss. 18. Art. 3719. <https://doi.org/10.3390/polym14183719>
17. Cho Y., Baek J., Sagong M., Ahn S., Nam J., Kim I.-D. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals, Innovations, and Applications // *Materials.* 2025. Vol. 37, iss. 28. Art. 2500162. <https://doi.org/10.1002/adma.202500162>
18. Оломская В. В., Горячева И. Ю. Влияние доксорубицина на флуоресцентные свойства квантовых точек AgInS₂/ZnS в воде и плазме крови // *Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2024 : сборник статей Всероссийской школы-семинара / под ред. проф. Ан. В. Скрипала. Саратов :* Издательство «Саратовский источник», 2024. С. 156–159. EDN: EELUGM
19. Raevskaya A., Lesnyak V., Haubold D., Dzhagan V., Stroyuk O., Gaponik N., Zahn D. R. T., Eychmuller A. A fine size selection of brightly luminescent water-soluble Ag–In–S/ZnS quantum dots // *J. Phys. Chem. C.* 2017. Vol. 121, iss. 16. P. 9032–9042. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00849>
20. Roy D., Routh T., Asaithambi A. V., Mandal S., Mandal P. K. Spectral and temporal optical behavior of blue-, green-, orange-, and red-emitting CdSe-based Core/Gradient alloy shell/Shell quantum dots: Ensemble and single-particle investigation results // *J. Phys. Chem. C.* 2016. Vol. 120, iss. 6. P. 3483–3491. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10051>
21. Zhong H., Zhou Y., Ye M., He Y., Ye J., He C., Yang C., Li Y. Controlled synthesis and optical properties of colloidal ternary chalcogenide CuInS₂ nanocrystals // *Chem. Mater.* 2008. Vol. 20, iss. 20. P. 6434–6443. <https://doi.org/10.1021/cm8006827>

Список литературы / References

1. Calori I., Gusmão L., Tedesco A. B6 vitamers as generators and scavengers of reactive oxygen species. *J. Photochem. Photobiol. A.*, 2021, vol. 7, art. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.jpap.2021.100041>
2. Voronina T. A., Litvinova S. A., Gladysheva N. A., Shulyndin A. V. The known and new ideas about the mechanism of action and the spectrum of effects of Mexidol. *S. S. Korsakov Journal of Neurology and Psychiatry*, 2025, vol. 125, no. 5, pp. 22–33 (in Russian). <https://doi.org/10.17116/jnevro202512505122>
3. Yosypenko Y., Mykhailovych V., Yosypenko V., Rotaru A., Khalavka Y. Optical properties and thermal sensitivity of AgInS₂ and AgInS₂/ZnS quantum dots embedded in barium sulphate and calcium carbonate matrices. *Opt. Mater.* 2025, vol. 158, art. 116441. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2024.116441>
4. Yang F., Wang Y., Gao J., Sui N., Liu Q., Wang Y., Liu L., Zou L., Kang Z., Zhang H. Studying of the photoluminescence characteristics of AgInS₂ quantum dots. *J. Nanopart. Res.*, 2015, vol. 17, art. 159. <https://doi.org/10.1007/s11051-015-2970-0>
5. Wang X., Xie C., Zhong J., Liang X., Xiang W. Synthesis and temporal evolution of Zn-doped AgInS₂ quantum dots. *J. Alloys Compd.*, 2015, vol. 648, pp. 127–133. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.06.240>
6. Sun Z., Liu Y., Wei F., Wu Y., Wei L., Tian Y., Zhang Y., Wei C. Aqueous AgInS₂/ZnS quantum dot-based fluorescent probes for highly selective detection of Cu (II) ions. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2025, vol. 8, iss. 27, pp. 13876–13885. <https://doi.org/10.1021/acsanm.5c02494>
7. Parani S., Oluwafemi O. Selective and sensitive fluorescent nanoprobe based on AgInS₂–ZnS quantum dots for the rapid detection of Cr (III) ions in the midst of interfering ions. *Nanotechnology*, 2020, vol. 31, iss. 39, art. 395501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab9c58>



8. Kurshanov D. A., Khavlyuk P. D., Baranov M. A., Dubavik A., Rybin A. V., Fedorov A. V., Baranov A. V. Magneto-fluorescent hybrid sensor $\text{CaCO}_3\text{-Fe}_3\text{O}_4\text{-AgInS}_2/\text{ZnS}$ for the detection of heavy metal ions in aqueous media. *Materials*, 2020, vol. 13, iss. 19, art. 4373. <https://doi.org/10.3390/ma13194373>
9. Aladesuyi O., Lebepe T., Maluleke R., Oluwafemi O. Biological applications of ternary quantum dots: A review. *Nanotechnol. Rev.*, 2022, vol. 11, no. 1, pp. 2304–2319. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0136>
10. Ponomaryova T. S., Olomskaya V. V., Novikova A. C., Goryacheva I. Yu. Effect of pH and ionic strength on the photoluminescence of size-fractionated $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 238–244 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2023-23-3-238-244>
11. Su W., Yang D., Wang Y., Kong Y., Zhang W., Wang J., Fei Y., Guo R., Ma J., Mi L. $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots for noninvasive cervical cancer screening with intracellular pH sensing using fluorescence lifetime imaging microscopy. *Nano Research*, 2022, vol. 15, iss. 6, pp. 5193–5204. <https://doi.org/10.1007/s12274-022-4104-1>
12. Maji S. K. Luminescence-tunable ZnS-AgInS_2 nanocrystals for cancer cell imaging and photodynamic therapy. *ACS Appl. Bio Mater.*, 2022, vol. 5, iss. 3, pp. 1230–1238. <https://doi.org/10.1021/acsbam.1c01247>
13. Ponomaryova T. S., Olomskaya 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. Yu., 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/acsmi.4c05681>
14. Anusiya G., Jaiganesh R. A review on fabrication methods of nanofibers and a special focus on application of cellulose nanofibers. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.*, 2022, vol. 4, art. 100262. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2022.100262>
15. Shabunina A. Yu., Volokovoinova L. D., Kozhevnikov I. O., Zaitsev D. P., Terin D. V., Saveleyeva M. C., Rusanova T. Yu., Serdobintsev A. A., Demina P. A. Study of the influence of electrospinning conditions on the characteristics of non-woven material based on fluoroplastic F42L. *Izvestiya of Saratov University. Chemistry. Biology. Ecology*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 151–162 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2025-25-2-151-162>
16. Chinnappan B., Krishnaswamy M., Xu H., Hoque M. Electrospinning of biomedical nanofibers/nanomembranes: Effects of process parameters. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 18, art. 3719. <https://doi.org/10.3390/polym14183719>
17. Cho Y., Baek J., Sagong M., Ahn S., Nam J., Kim I.-D. Electrospinning and Nanofiber Technology: Fundamentals. Innovations. and Applications. *Materials*, 2025, vol. 37, iss. 28, art. 2500162 <https://doi.org/10.1002/adma.202500162>
18. Olomskaya V. V., Goryacheva I. YU. Effect of doxorubicin on the fluorescent properties of $\text{AgInS}_2/\text{ZnS}$ quantum dots in water and blood plasma. *Metody kompyuternoy diagnostiki v biologii i meditsine – 2024: Sbornik statey Vserossiyskoy shkoly-seminara* [Skripal' An. V., ed. Methods of Computer Diagnostics in Biology and Medicine – 2024. Collection of articles from the All-Russian School-Seminar]. Saratov, Idatel'stvo "Saratovskiy Istochnik", 2024, pp. 159–159 (in Russian). EDN: EELUGM
19. Raevskaya A., Lesnyak V., Haubold D., Dzhagan V., Stroyuk O., Gaponik N., Zahn D. R. T., Eychmuller A. A Fine Size Selection of Brightly Luminescent Water-Soluble Ag-In-S/ZnS Quantum Dots. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, iss. 16, pp. 9032–9042. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b00849>
20. Roy D., Routh T., Asaithambi A. V., Mandal S., Mandal P. K. Spectral and temporal optical behavior of blue-, green-, orange-, and red-emitting CdSe-based Core/Gradient alloy shell/Shell quantum dots: Ensemble and single-particle investigation results. *J. Phys. Chem. C*, 2016, vol. 120, iss. 6, pp. 3483–3491. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10051>
21. Zhong H., Zhou Y., Ye M., He Y., Ye J., He C., Yang C., Li Y. Controlled synthesis and optical properties of colloidal ternary chalcogenide CuInS_2 nanocrystals. *Chem. Mater.*, 2008, vol. 20, iss. 20, pp. 6434–6443. <https://doi.org/10.1021/cm8006827>

Поступила в редакцию 11.09.2025; одобрена после рецензирования 07.10.2025; принята к публикации 10.10.2025; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 11.09.2025; approved after reviewing 07.10.2025; accepted for publication 10.10.2025; published 30.06.2026