

ГИБРИДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ АЦЕТАТА ХИТОЗАНА И НАНОЧАСТИЦ ЙОДИДА СЕРЕБРА ДЛЯ ОПТИЧЕСКОГО СЕНСОРА

Р.Б. Салихов, М.В. Базунова, Т.Р. Салихов, Е.И. Кулиш, И.Н. Сафаргалин, А.Д. Остальцова

Кафедра электроники и физики наноструктур, Уфимский университет науки и технологий, Заки Валиди, 32, Уфа, Российская Федерация, 450076

E-mail: salikhovrb@yandex.ru, mbazunova@mail.ru, timur-salikhov@yandex.ru, onlyalena@mail.ru, idris-safargalin@gmail.com, nastia.ostaltsova@yandex.ru

В данной работе проведена отработка способа получения тонкопленочного оптического сенсора на основе полисахарида ацетата хитозана, содержащего наночастицы йодида серебра, заключающегося в приготовлении устойчивых полимер-коллоидных дисперсий смешением раствора ацетата хитозана с золем йодида серебра с последующим удалением дисперсионной среды. Определены условия, при которых может быть обеспечена наибольшая межфазная поверхность полимер-частица AgI, и, следовательно, высокое сродство компонентов в гибридном нанокompозите. Исследован тонкопленочный оптический сенсор на основе полисахарида ацетата хитозана, содержащий наночастицы йодида серебра в массовом соотношении ацетат хитозана:AgI 99,2:0,8 % (мас.). Изучена спектральная чувствительность композитного пленочного оптического сенсора в диапазонах фиолетового, зеленого и полного спектра солнечного излучения. Установлено, что образец с соотношением 99,2:0,8 % мас. демонстрирует максимальную оптическую реакцию на фиолетовый свет, что объясняется оптимальным перколяционным механизмом проводимости. Для зеленого света наблюдалась слабая чувствительность, подтверждающая селективность материала к коротковолновому диапазону.

Ключевые слова: ацетат хитозана, наночастицы йодида серебра, фиолетовое излучение, оптический сенсор

HYBRID MATERIALS BASED ON CHITOSAN ACETATE AND SILVER IODIDE NANOPARTICLES FOR OPTICAL SENSORS

R.B. Salikhov, M.V. Bazunova, T.R. Salikhov, E.I. Kulish, I.N. Safargalin, A.D. Ostaltsova

Department of Electronics and Physics of Nanostructures, Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi, 32, Ufa, 450076, Russian Federation

E-mail: salikhovrb@yandex.ru, mbazunova@mail.ru, timur-salikhov@yandex.ru, onlyalena@mail.ru, idris-safargalin@gmail.com, nastia.ostaltsova@yandex.ru

In this work, a method for producing a thin-film optical sensor based on chitosan acetate polysaccharide containing silver iodide nanoparticles was developed. The method consists of preparing stable polymer-colloidal dispersions by mixing a chitosan acetate solution with a silver iodide sol, followed by removal of the dispersion medium. The conditions under which the largest interfacial polymer-AgI particle surface area can be ensured, and, consequently, high affinity of the components in the hybrid nanocomposite, are determined. A thin-film optical sensor based on chitosan acetate polysaccharide containing silver iodide nanoparticles in a chitosan acetate:AgI mass ratio of 99.2:0.8% (wt.) was investigated. The spectral sensitivity of the composite film optical sensor in the violet, green, and full spectrum of solar radiation was studied. It was found that the sample with a ratio of 99.2:0.8% wt. exhibits maximum optical response to violet light, which is explained by the optimal percolation conductivity mechanism. Weak sensitivity was observed for green light, confirming the material's selectivity for shortwavelengths.

Keywords: chitosan acetate, silver iodide nanoparticles, violet radiation, optical sensor

Для цитирования:

Салихов Р.Б., Базунова М.В., Салихов Т.Р., Кулиш Е.И., Сафаргалин И.Н., Остальцова А.Д. Гибридные материалы на основе ацетата хитозана и наночастиц йодида серебра для оптического сенсора. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2026. Т. LXX. № 2. С. 31–37. DOI: 10.6060/rcj.2026702.4.

For citation:

Salikhov R.B., Bazunova M.V., Salikhov T.R., Kulish E.I., Safargalin I.N., Ostaltsova A.D. Hybrid materials based on chitosan acetate and silver iodide nanoparticles for optical sensors. *Ros. Khim. Zh.* 2026. V. 70. N 2. P. 31–37. DOI: 10.6060/rcj.2026702.4.

ВВЕДЕНИЕ

Тонкопленочные органические оптические сенсоры – это перспективный класс устройств, применяемый в оптоэлектронике, гибкой электронике и сенсорике. Их работа основана на органических материалах (полимерах и композитах), способных изменять электрическое сопротивление под действием света благодаря генерации носителей заряда. Такие свойства делают эти устройства привлекательными для создания экономичных, легких и гибких сенсоров, фотодетекторов, солнечных элементов и компонентов электроники [1–3].

Для формирования оптических сенсоров органические материалы, включая проводящие полимеры и композиты с неорганическими наночастицами (оксидами металлов, углеродными нанотрубками), могут наноситься на гибкие подложки методами растворной обработки, такими как spin-coating или струйная печать [4, 5]. Например, композиты полимеров с наночастицами оксида цинка или диоксида титана обладают высокой светочувствительностью и стабильностью даже в условиях интенсивного освещения [6, 7]. Важным преимуществом органических материалов является возможность тонкой настройки их свойств для решения специфических задач, таких как детектирование УФ-излучения или создание высокочувствительных сенсоров [8].

Несмотря на прогресс, разработка органических оптических сенсоров сталкивается с рядом вызовов. Ключевым ограничением остается низкая стабильность материалов под воздействием кислорода и влаги, что может приводить к деградации устройств. Однако современные методы инкапсуляции и нанесения защитных слоев позволяют существенно повысить их долговечность [9, 10]. Дальнейшие перспективы связаны с исследованиями в области гибридных органическо-неорганических композитов, которые способны улучшить подвижность носителей заряда и общую эффективность устройств [11].

В оптоэлектронике полисахариды, в частности хитозан, представляют особый интерес как основа для тонкопленочных оптических сенсоров,

особенно в комбинации с функциональными добавками, такими как частицы йодида серебра. Подобные композиты демонстрируют улучшенные оптические и электрические свойства, что позволяет создавать на их основе высокочувствительные и стабильные сенсоры. При этом полисахаридная матрица обеспечивает стабильность и равномерное распределение частиц AgI, предотвращая их агрегацию и способствуя высокой однородности композитного материала [12].

Функциональность полисахаридов обусловлена наличием в их структуре активных функциональных групп, которые позволяют легко модифицировать полимер, вводя в матрицу различные наночастицы или ионы металлов. Это открывает возможности для целенаправленной настройки оптических и электрических характеристик материала. В частности, введение частиц йодида серебра в полисахаридную матрицу приводит к формированию гибридного композита, сочетающего преимущества органического полимера и неорганического полупроводника [13]. Йодид серебра, как и некоторые другие материалы, обладают выраженными полупроводниковыми свойствами и высокой светочувствительностью, что делает их перспективными компонентами для оптических сенсоров [14–20].

Получение устойчивых полимер-коллоидных дисперсий (ПКД) на основе водорастворимых полимеров и неорганических коллоидных частиц, например, золя йодида серебра, с последующим удалением дисперсионной среды является одним из способов создания гибридных материалов. При реализации данного способа следует учесть, что, чем больше межфазная поверхность полимер-частица AgI, тем выше сродство компонентов в гибридном нанокompозите [21]. Также, не вызывает сомнения тот факт, что в любом гибридном функциональном материале, в том числе фоточувствительном, содержание функциональной добавки и ее равномерность распределения в полимерной матрице существенным образом влияет на свойства материалов [22].

Разработка функциональных материалов на основе природных и синтетических полимеров, а также наноструктурированных систем, является актуальным направлением для создания современных

сенсорных устройств и мембранных технологий. В частности, полисахариды (хитозан, агар-агар) и их модифицированные формы широко применяются в качестве матриц для иммобилизации металлокомплексных соединений, что позволяет управлять физико-химическими свойствами пленочных покрытий и использовать их в аналитических целях [23, 24]. Для детектирования химического состава сред перспективны акустоэлектронные сенсоры на алмазных подложках [25]. Создание термостойких полимерных композитов с низкой газопроницаемостью [26] расширяет возможности практического применения таких материалов в экстремальных условиях эксплуатации. Важную роль в формировании функциональных покрытий играют коллоидные системы: изучение процессов гидратообразования в присутствии наночастиц серебра [27]. Также, пористые кордиеритовые материалы обеспечивают высокую чувствительность газовых сенсоров [28].

В связи с вышесказанным, целью работы является отработка условий получения пленочных материалов на основе ацетата хитозана и коллоидных частиц йодида серебра и определение перспективности применения полученных пленок при со-

здании селективных сенсоров фиолетового излучения на гибких подложках.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве полимерной основы гибридных пленочных материалов с наночастицами йодида серебра использовали ацетат хитозана, полученный из уксуснокислого раствора хитозана со степенью деацетилирования 82%, М.м.=80000 а.е.м. (ТУ 9289-067-00472124-03), производства ЗАО «Био-прогресс» (г. Щелково, Россия).

Отрицательно заряженные наночастицы йодида серебра получены путем смешения равноконцентрированных растворов нитрата серебра (х.ч.) и йодида калия (х.ч.) концентрацией 0,001-0,02 моль/л в различном объемном соотношении (табл. 1).

Для получения полимер-коллоидных дисперсий AgI – ацетат хитозана смешивали равные объемы раствора ацетата хитозана концентрацией 1 % мас. или золя.

Оптическую плотность золь и полимер-коллоидных дисперсий на их основе измеряли на концентрационном фотоколориметре КФК-2МП в диапазоне длин волн $\lambda = 340-750$ нм с шагом 40 нм

Таблица 1

Условия синтеза золя AgI
Table 1. Conditions for the synthesis of AgI sol

Концентрация исходных растворов KI и AgNO ₃ , моль/л	Объемное соотношение исходных растворов KI/AgNO ₃ , % об.	Номер изучаемой системы	Объемное содержание KI в реакционной смеси, % об.	Концентрация дисперсной фазы золя, моль/л
0,001	10:1	1	99	$1,0 \cdot 10^{-4}$
	10:3	2	76	$2,3 \cdot 10^{-4}$
	10:5	3	66	$3,3 \cdot 10^{-4}$
	10:7	4	58	$4,1 \cdot 10^{-4}$
0,01	10:1	5	99	$1,0 \cdot 10^{-3}$
	10:3	6	76	$2,3 \cdot 10^{-3}$
	10:5	7	66	$3,3 \cdot 10^{-3}$
	10:7	8	58	$4,1 \cdot 10^{-3}$
0,012	10:1	9	99	$1,2 \cdot 10^{-3}$
	10:3	10	76	$2,8 \cdot 10^{-3}$
	10:5	11	66	$4,0 \cdot 10^{-3}$
	10:7	12	58	$4,9 \cdot 10^{-3}$
0,015	10:1	13	99	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	10:3	14	76	$3,5 \cdot 10^{-3}$
	10:5	15	66	$5,0 \cdot 10^{-3}$
	10:7	13	58	$6,3 \cdot 10^{-3}$
0,02	10:1	14	99	$2,0 \cdot 10^{-3}$
	10:3	15	76	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	10:5	16	66	$6,7 \cdot 10^{-3}$
	10:7	17	58	$8,2 \cdot 10^{-3}$

при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для сравнительной характеристики исследуемых систем использовали значение оптической плотности при $\lambda = 540\text{ нм}$. Для определения среднего размера радиуса (r , нм) и числовой концентрации (N , $1/\text{см}^3$) частиц золей йодида серебра и полимер-коллоидных дисперсий использовали метод спектра мутности [29-30].

Измерение фотопроводимости осуществляли следующим образом. На полимерную пленку на основе ацетата хитозана и наночастиц йодида серебра в вакуумной установке УВП-250 на материалы наносились алюминиевые электроды, зазор составлял менее 50 мкм. Далее полученный образец ставили на держатель для подложки и на него светили светом из солнечного имитатора Newport 67005 (спектральный диапазон солнечного имитатора Newport 67005 зависит от используемой лампы и фильтров, но базовый корпус лампы и линзы из плавленого кварца обеспечивают пропускание света в диапазоне от 200 до 2500 нм) с широким спектральным диапазоном, включая УФ, видимый и инфракрасный свет. Кроме этого, проводили исследование с фиолетовым, зеленым и красным излучением по отдельности. Все измерения проводились при постоянном напряжении 5 В, приложенном к электродам, через вольтметр НУ3003. На универсальном вольтметре В7-21 снимали значения тока в нА. На рисунке 1 представлена описанная выше схема установки измерения проводимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При определении условий, позволяющих получить золи с малым средним размером частиц, и, по возможности, с высокой числовой концентрацией и высокой межфазной поверхностью, установлено, что, если концентрация дисперсной фазы достаточно велика, золи характеризуются наибольшим разме-

ром частиц, но их концентрация мала. При низкой концентрации дисперсной фазы (номера 1-4) размер формируемых частиц не велик, а их числовая концентрация и межфазная поверхность заметно выше. Например, система, получаемая при смешении растворов йодида калия и нитрата серебра с концентрацией 0,01 моль/л при объемном соотношении 10:7 дает частицы со средним размером 55-60 нм, т.е. является истинно-коллоидной системой (табл. 2).

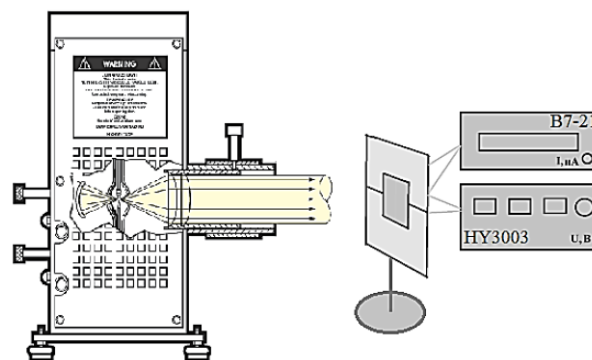


Рис. 1. Установка измерения фотопроводимости
Fig. 1. Photoconductivity measurement setup

Тот факт, что смешение золя йодида серебра с растворами полимеров сопровождается образованием полимер-коллоидных дисперсий, компоненты которой имеют высокое сродство друг к другу, а не представляют собой механические смеси раствора полимера и коллоидной дисперсии, подтверждается данными фотоэлектроколориметрии. Так, смешение раствора ацетата хитозана и золя йодида серебра приводит к увеличению значений оптической плотности полученных полимер-коллоидных дисперсий выше аддитивных значений, что свидетельствует о наличии взаимодействия между полимером и коллоидными частицами (рис. 2).

Таблица 2

Характеристики дисперсной фазы золей AgI
Table 2. Characteristics of the dispersed phase of AgI sols

Номер изучаемой системы	Концентрация исходных компонентов, моль/л	Диапазон изменения концентрации дисперсной фазы, моль/л	Диапазон изменения числа частиц, см^{-3}	Диапазон изменения размера частиц, нм	Диапазон изменения межфазной поверхности, $\text{нм}^2/\text{см}^3$
1-4	0,001	$(1,0-4,1) \cdot 10^{-3}$	$(35-37) \cdot 10^{12}$	42-53	$(77-130) \cdot 10^{16}$
5-8	0,010	$(1,0-4,1) \cdot 10^{-3}$	$(32-34) \cdot 10^{12}$	55-67	$(118-190) \cdot 10^{16}$
9-12	0,012	$(1,2-4,9) \cdot 10^{-3}$	$(2-4) \cdot 10^{12}$	100-125	$(25-79) \cdot 10^{16}$
13-16	0,015	$(1,5-6,3) \cdot 10^{-3}$	$(25-30) \cdot 10^{10}$	205-255	$(13-25) \cdot 10^{16}$
17-20	0,020	$(2,0-8,2) \cdot 10^{-3}$	$(5-10) \cdot 10^{10}$	410-520	$(11-34) \cdot 10^{16}$

Таким образом, при создании пленочных материалов на основе ацетата хитозана и коллоидных частиц йодида серебра, потенциально перспективных для использования в селективных сенсорах фиолетового излучения на гибких подложках, использована полимер-коллоидная дисперсия, полученная смешением равных объемов золя йодида серебра (табл. 1, система № 8) и раствора ацетата хитозана концентрацией 1 % мас. Массовое соотношение компонентов (полисахарид:частицы йодида серебра) в готовой пленке составило 99,2:0,8 % мас. Так, полученный на основе данной пленки оптический сенсор эффективно регистрирует зеленый свет видимого диапазона (рис. 3 а, в). В то же время, при облучении красным светом значимой фотопроводимости в нем не наблюдается. Образец также проявляет высокую чувствительность к широкому спектру солнечного излучения (УФ, видимый и ИК-диапазоны), что было продемонстрировано с использованием солнечного имитатора Newport 67005 (рис. 3 б, г).

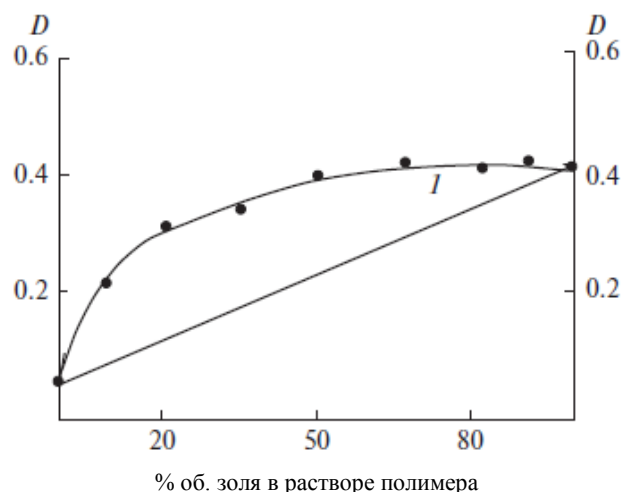


Рис. 2. Зависимость оптической плотности водных дисперсий ацетат хитозана–золь AgI от объемного соотношения исходных компонентов смеси. Концентрация полимера в растворе составляла 1 %. Золь получен смешением растворов йодида калия и нитрата серебра с концентрацией 0,01 моль/л при объемном соотношении 10:7, соответственно

Fig. 2. Optical density of aqueous dispersions of chitosan acetate–AgI sol versus the volume ratio of the initial mixture components. The polymer concentration in the solution was 1%. The sol was obtained by mixing potassium iodide and silver nitrate solutions with a concentration of 0.01 mol/L at a volume ratio of 10:7, respectively

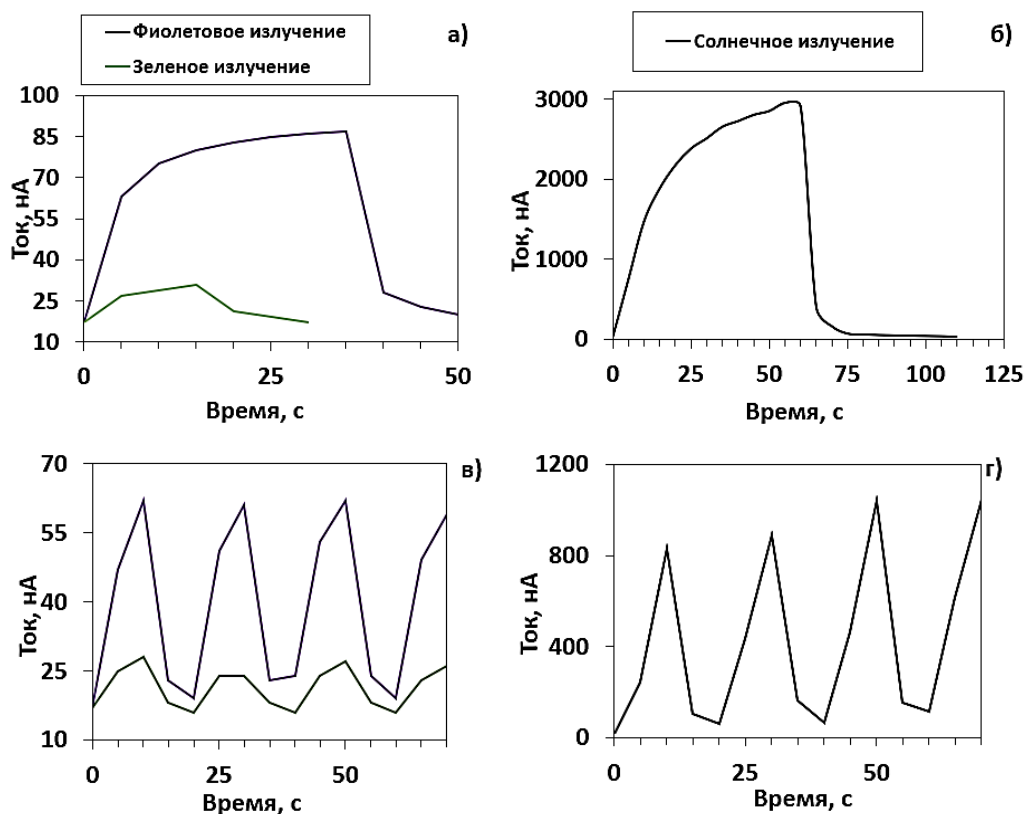


Рис. 3. Максимум тока для пленки, полученной из полимер-коллоидной дисперсии на основе равных объемов золя йодида серебра (табл. 1, система № 8) и раствора ацетата хитозана концентрацией 1 % мас. под фиолетовым, зеленым (в) и солнечным светом (г)
Fig. 3. Maximum current for a film, obtained from a polymer-colloidal dispersion based on equal volumes of silver iodide sol (Table 1, system No. 8) and chitosan acetate solution with a concentration of 1% by weight under violet, green (в) and sunlight (г)

Чувствительность (R) — ключевой параметр оптического сенсора, количественно характеризующий эффективность преобразования падающего оптического излучения в выходной электрический сигнал (ток или напряжение). Она напрямую определяет производительность и области применения устройства. Она определяется, как отношение между генерируемым фототоком и падающей оптической мощностью (P_{opt}); следовательно, R можно рассчитать, как:

$$R = I_{\text{ph}} P_{\text{opt}} = (I_{\text{illum}} - I_{\text{dark}}) / aE_{\text{opt}}, \quad (1)$$

Чувствительность солнечного света для изученного образца составила 8949 мкА Вт^{-1} , а значения чувствительности к фиолетовому и зеленому цвету составили: $R = 180 \text{ мкА Вт}^{-1}$, $R = 60 \text{ мкА Вт}^{-1}$, соответственно. Следовательно, исследуемый образец имеет большую чувствительность к солнечному цвету.

Оптический сенсор на основе полисахарида с частицами AgI обладает рядом преимуществ, которые делает его привлекательным для регистрации фиолетового, зеленого и солнечного излучения. Он сочетает в себе высокую светочувствительность и широкий спектральный диапазон работы.

ВЫВОДЫ

1. Определены условия получения полимер-коллоидной дисперсии с достаточно высокими меж-

фазной поверхностью и сродством компонентов: смешение равных объемов золя йодида серебра (таб. 1, система № 8) и раствора ацетата хитозана концентрацией 1 % мас.

2. Оптический сенсор на основе пленок ацетата хитозана с частицами AgI обладает рядом преимуществ, которые делают его привлекательным для регистрации фиолетового, зеленого и солнечного излучения. Он сочетает в себе высокую светочувствительность и широкий спектральный диапазон работы. Чувствительность для образца солнечного света составила 8949 мкА Вт^{-1} , а значения чувствительности для образца 1 к фиолетовому и зеленому цвету составили: $R = 180 \text{ мкА Вт}^{-1}$, $R = 60 \text{ мкА Вт}^{-1}$, соответственно. Следовательно, исследуемый образец имеет большую чувствительность к солнечному цвету.

Исследование выполнено в рамках государственного задания (код научной темы FRRR-2026-0007).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence of a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. Butt M.A. // *Coatings*. 2026. V. 16. N 1. P. 93. DOI: 10.3390/coatings16010093.
2. Yu S., Deng W., Wu X., Ren Y., Xie Y., Sun S., Hu W. // *Chem. Soc. Rev.* 2026. V. 55. P. 567–604. DOI: 10.1039/D5CS00920K.
3. Salikhov R.B., Andrianova A.N., Petrov I.S., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Mustafin A.G. // *Lett. Mater.* 2024. V. 14. N 2. P. 113–118. DOI: 10.48612/letters/2024-2-113-118.
4. Салихов Р.Б., Муллагалиев И.Н., Салихов Т.Р., Остальцова А.Д. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2025. Т. LXIX. № 3. С. 125–129. DOI: 10.6060/rcj.2025693.14.
5. SK S., Sathish M., Chirra S., Rao B. B., Singh N. // *Tuning of Conducting Polymers: Applications from Environmental to Biomedical Fields*. 2026. P. 205–235. DOI: 10.1007/978-3-032-00461-1_10.
6. Mochane M.J., Motloung M.T., Mokhena T.C., Mofokeng T.G. // *Catalysts*. 2022. V. 12. N 11. P. 1439. DOI: 10.3390/catal12111439.
7. Siriboon J., Traiphon N., Traiphon R. // *ACS Appl. Nano Mater.* 2022. V. 5. N 9. P. 13198–13207. DOI: 10.1021/acsanm.2c02914.
8. Kaushal J.B., Raut P., Kumar S. // *Biosensors*. 2023. V. 13. N 11. P. 976. DOI: 10.3390/bios13110976.
9. Azeem M., Sun T.R., Jeyasundar P.G.S.A., Han R.X., Li H., Abdelrahman H., Li G. // *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.* 2023. V. 53. N 21. P. 1912–1934. DOI: 10.1080/10643389.2023.2190333.
10. Duan L., Uddin A. // *Mater. Chem. Frontiers*. 2022. V. 6. N 4. P. 400–417. DOI: 10.1039/D1QM01250A.

REFERENCES

1. Butt M.A. // *Coatings*. 2026. V. 16. N 1. P. 93. DOI: 10.3390/coatings16010093.
2. Yu S., Deng W., Wu X., Ren Y., Xie Y., Sun S., Hu W. // *Chem. Soc. Rev.* 2026. V. 55. P. 567–604. DOI: 10.1039/D5CS00920K.
3. Salikhov R.B., Andrianova A.N., Petrov I.S., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Mustafin A.G. // *Lett. Mater.* 2024. V. 14. N 2. P. 113–118. DOI: 10.48612/letters/2024-2-113-118.
4. Salikhov R.B., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Ostaltsova A.D. // *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 3. P. 125–129. DOI: 10.6060/rcj.2025693.14.
5. SK S., Sathish M., Chirra S., Rao B. B., Singh N. // *Tuning of Conducting Polymers: Applications from Environmental to Biomedical Fields*. 2026. P. 205–235. DOI: 10.1007/978-3-032-00461-1_10.
6. Mochane M.J., Motloung M.T., Mokhena T.C., Mofokeng T.G. // *Catalysts*. 2022. V. 12. N 11. P. 1439. DOI: 10.3390/catal12111439.
7. Siriboon J., Traiphon N., Traiphon R. // *ACS Appl. Nano Mater.* 2022. V. 5. N 9. P. 13198–13207. DOI: 10.1021/acsanm.2c02914.
8. Kaushal J.B., Raut P., Kumar S. // *Biosensors*. 2023. V. 13. N 11. P. 976. DOI: 10.3390/bios13110976.
9. Azeem M., Sun T.R., Jeyasundar P.G.S.A., Han R.X., Li H., Abdelrahman H., Li G. // *Crit. Rev. Env. Sci. Technol.* 2023. V. 53. N 21. P. 1912–1934. DOI: 10.1080/10643389.2023.2190333.
10. Duan L., Uddin A. // *Mater. Chem. Frontiers*. 2022. V. 6. N 4. P. 400–417. DOI: 10.1039/D1QM01250A.

11. Wu F., Xie A., Jiang L., Mukherjee S., Gao H., Shi J., Zeng H. // *Adv. Funct. Mater.* 2023. V. 33. N 28. Art. 2212861. DOI: 10.1002/adfm.202212861.
12. Bazunova M.V., Chernova V.V., Kulish E.I. // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2024. V. 18. N 5. P. 1382-1388. DOI: 10.1134/S1990793124700945.
13. Базунова М.В., Салихов Р.Б., Терегулов Т.Б., Муллагалиев И.Н., Салихов Т.Р., Сафаргалин И.Н., Остальцова А.Д. // *Журнал прикладной химии.* 2024. Т. 97. Вып. 4. С. 347-353. DOI: 10.31857/S0044461824040091.
14. Wang N., Wang W.W., Liang X.W., Wang P.Y., Liu T., Yao Z.Q., Liu F.C. // *Inorg. Chem.* 2024. V. 63. N 26. P. 12350-12359. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.4c01846.
15. Безруков П.А., Нашекин А.В., Сидоров А.И., Никонов Н.В. // *Оптика и спектроскопия.* 2023. Т. 131. Вып. 2. С. 228-232. DOI: 10.21883/OS.2023.02.55011.16-23.
16. Ali T., Illahi A., Kanwal S., Hussain A. // *Sensing and Imaging.* 2026. V. 27. N 1. P. 20. DOI: 10.1007/s11220-026-00718-6.
17. Salikhov R.B., Ostaltsova A.D., Salikhov T.R., Safargalin I.N., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. // *Optical Technologies for Telecommunications* 2024. 2025. V. 13738. P. 208-211.
18. Zhu, S., Wang, H., Sun, C., Zhao, X., Qi, H., Xu, Y., Li, C., Wang, X. & Chen, K. // *Journal of Analysis and Testing.* 2026. V. 10. N 1. P. 273-283. DOI: 10.1007/s41664-025-00392-9.
19. Salikhov R.B., Yumalin T.T., Salikhov T.R., Mullagaliev I.N. // *Optical Technologies for Telecommunications* 2024. 2025. V. 13738. P. 212-216.
20. Салихов Р.Б., Юмалин Т.Т., Остальцова А.Д., Салихов Т.Р., Муллагалиев И.Н. // *Вестник Башкирского университета.* 2025. Т. 30. № 1. С. 13-18. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.1.2.
21. Волынский А.Л., Никонорова Н.И., Волков А.В. // *Коллоидный журнал.* 2010. Т. 72. № 4. С. 458-464.
22. Салихов Р.Б., Базунова М.В., Салихов Т.Р. // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* 2025. Т. 91. № 11. С. 41-48. DOI: 10.26896/1028-6861-2025-91-11-41-48.
23. Годзишевская А.А., Лопашина Е.П., Снегирева А.А., Курасова М.Н., Трифонова Т.С. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2024. Т. 67. Вып. 11. С. 63-68. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7050.
24. Агоева Э.А., Хаширова С.Ю. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 3. С. 6-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7083.
25. Сорокин Б.П., Яшин Д.В., Асафьев Н.О., Хасков М.А., Лупарев Н.В. // *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2025. Т. 68. Вып. 12. С. 41-50. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.17y.
26. Чалая Н.М., Ефремова А.А., Щепелев А.А., Иваненко Т.А., Папенко И.Н. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2025. Т. LXIX. № 1. С. 55-59. DOI: 10.6060/rcj.2025691.11.
27. Мелешкин А.В., Морозов В.С., Князьков В.А., Климов Б.А. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2024. Т. LXVIII. № 4. С. 52-59. DOI: 10.6060/rcj.2024684.6.
28. Пономарев С.Г., Фесик Е.В., Рыбальченко В.В., Базарова В.Е. // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва).* 2025. Т. LXIX. № 1. С. 26-29. DOI: 10.6060/rcj.2025691.5.
29. Кленин В.И. Термодинамика систем с гибкоцепными полимерами. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1995. 736 с.
30. Кленин В.И., ШегOLEV С.Ю., Лаврушин В.И. Характеристические функции светорассеяния дисперсных систем. Саратов: Изд-во Саратов. гос. ун-та, 1977. 177 с.
11. Wu F., Xie A., Jiang L., Mukherjee S., Gao H., Shi J., Zeng H. // *Adv. Funct. Mater.* 2023. V. 33. N 28. Art. 2212861. DOI: 10.1002/adfm.202212861.
12. Bazunova M.V., Chernova V.V., Kulish E.I. // *Russ. J. Phys. Chem. B.* 2024. V. 18. N 5. P. 1382-1388. DOI: 10.1134/S1990793124700945.
13. Bazunova M.V., Salikhov R.B., Teregulov T.B., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Safargalin I.N., Ostaltsova A.D. // *Russ. J. Appl. Chem.* 2024. V. 97. N 4. P. 347-353. DOI: 10.31857/S0044461824040091.
14. Wang N., Wang W.W., Liang X.W., Wang P.Y., Liu T., Yao Z.Q., Liu F.C. // *Inorg. Chem.* 2024. V. 63. N 26. P. 12350-12359. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.4c01846.
15. Bezrukov P.A., Nashchekin A.V., Sidorov A.I., Nikonorov N.V. // *Opt. Spectrosc.* 2023. V. 131. N 2. P. 228-232. DOI: 10.21883/OS.2023.02.55011.16-23.
16. Ali T., Illahi A., Kanwal S., Hussain A. // *Sensing and Imaging.* 2026. V. 27. N 1. P. 20. DOI: 10.1007/s11220-026-00718-6.
17. Salikhov R.B., Ostaltsova A.D., Salikhov T.R., Safargalin I.N., Meshkov I.K., Gizatulin A.R. // *Optical Technologies for Telecommunications* 2024. 2025. V. 13738. P. 208-211.
18. Zhu, S., Wang, H., Sun, C., Zhao, X., Qi, H., Xu, Y., Li, C., Wang, X. & Chen, K. // *Journal of Analysis and Testing.* 2026. V. 10. N 1. P. 273-283. DOI: 10.1007/s41664-025-00392-9.
19. Salikhov R.B., Yumalin T.T., Salikhov T.R., Mullagaliev I.N. // *Optical Technologies for Telecommunications* 2024. 2025. V. 13738. P. 212-216.
20. Salikhov R.B., Yumalin T.T., Ostaltsova A.D., Salikhov T.R., Mullagaliev I.N. // *Vestn. Bashkir. Univ.* 2025. V. 30. N 1. P. 13-18. DOI: 10.33184/bulletin-bsu-2025.1.2.
21. Volynsky A.L., Nikonorova N.I., Volkov A.V. // *Colloid J.* 2010. V. 72. N 4. P. 458-464.
22. Salikhov R.B., Bazunova M.V., Salikhov T.R., Mullagaliev I.N., Safargalin I.N., Ostaltsova A.D. // *Ind. Lab. Diagn. Mater.* 2025. V. 91. N 11. P. 41-48. DOI: 10.26896/1028-6861-2025-91-11-41-48.
23. Godzishevskaya A.A., Lopashinova E.P., Snegireva A.A., Kurasova M.N., Trifonova T.S. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2024. V. 67. N 11. P. 63-68. DOI: 10.6060/ivkkt.20246711.7050.
24. Agoeva E.A., Khashirova S.Yu. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2025. V. 68. N 3. P. 6-19. DOI: 10.6060/ivkkt.20256803.7083.
25. Sorokin B.P., Yashin D.V., Asafiev N.O., Khaskov M.A., Luparev N.V. // *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2025. V. 68. N 12. P. 41-50. DOI: 10.6060/ivkkt.20256812.17y.
26. Chalaya N.M., Efremova A.A., Shchepeliev A.A., Ivanenko T.A., Tsapenko I.N. // *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 1. P. 55-59. DOI: 10.6060/rcj.2025691.11.
27. Meleshkin A.V., Morozov V.S., Knyazkov V.A., Klimov B.A. // *Ros. Khim. Zh.* 2024. V. 68. N 4. P. 52-59. DOI: 10.6060/rcj.2024684.6.
28. Ponomarev S.G., Fesik E.V., Rybalchenko V.V., Bazarova V.E. // *Ros. Khim. Zh.* 2025. V. 69. N 1. P. 26-29. DOI: 10.6060/rcj.2025691.5.
29. Klenin V.I. Thermodynamics of Systems with Flexible-Chain Polymers. Saratov: Saratov State University Press, 1995. 736 p.
30. Klenin V.I., Shchegolev S.Yu., Lavrushin V.I. Characteristic Functions of Light Scattering in Disperse Systems. Saratov: Saratov State University Press, 1977. 177 p.

Поступила в редакцию (Received) 18.02.2026

Принята к опубликованию Accepted () 01.05.2026