



Закономерности формирования полимерных пленок на основе хитозана, модифицированных серебросодержащими наночастицами

В. С. Виноградов¹, А. С. Озерин¹✉, Ф. С. Радченко¹, И. А. Новаков

¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия,
e-mail: asozerin@vstu.ru

Поступила в редакцию: 28.04.2026 г.; после доработки: 20.05.2026 г.; принята в печать: 25.05.2026 г.

Аннотация – Наука, связанная с нанотехнологиями, активно развивается, и одним из ее перспективных направлений являются исследования по разработке антибактериальных препаратов на базе композитов из неорганических частиц серебра и полимеров. Представлены результаты исследования влияния концентрации растворов хитозана на размерные характеристики серебросодержащих частиц, их распределение по поверхности пленок хитозана и формирование структурированных пленок. Показано, что в разбавленных растворах хитозана получаемая дисперсия частиц серебра характеризуется размером частиц 12 нм и узким распределением. Повышение концентрации хитозана до концентрации кроссовера приводит к образованию агломератов размерами до 140 нм состоящих из малых частиц. Наполненные частицами серебра пленки хитозана полученные из разбавленных и концентрированных растворов хитозана характеризуются разным распределением частиц серебра по поверхности пленки. Добавление пектина к хитозану привело к получению структурированной пленки с равномерным распределением по поверхности частиц серебра размером 15 нм. Структурирование поверхности пленки происходит также при получении положительно и отрицательно заряженных наноразмерных частиц иодида серебра. При этом соотношение Ag/I в составе частиц, полученных в растворе хитозана, сохраняется и в процессе формирования пленки.

Ключевые слова: хитозан, пектин, частицы серебра, частицы иодида серебра.

Materials with new functional properties

Regularity of formation of polymer films based on chitosan modified with silver-containing nanoparticles

*Vladislav S. Vinogradov¹, Alexander S. Ozerin¹✉, Filipp S. Radchenko¹,
and Ivan A. Novakov¹*

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia, e-mail: asozerin@vstu.ru

Received: April 28, 2026; Revised: May 20, 2026; Accepted: May 25, 2026

Аннотация – The science of nanotechnology is actively developing, and one of its promising areas is research on the development of antibacterial drugs based on composites of inorganic silver particles and polymers. The results of the study of the effect of the concentration of chitosan solutions on the dimensional characteristics of silver-containing particles, their distribution on the surface of chitosan films, and the formation of structured films are presented. It is shown that in diluted chitosan solutions, the resulting dispersion of silver particles has a particle size of 12 nm and a narrow distribution. Increasing the concentration of chitosan to the crossover concentration leads to the formation of agglomerates up to 140 nm in size, consisting of small particles. Chitosan films filled with silver particles obtained from diluted and concentrated chitosan solutions are characterized by different distributions of silver particles on the film surface. The addition of pectin to chitosan resulted in the formation of a structured film with a uniform distribution of 15 nm silver particles on the surface. The surface structure of the film is also influenced by the formation of positively and negatively charged silver iodide nanoparticles. The Ag/I ratio of the particles obtained in the chitosan solution remains consistent during the film formation process.

Keywords: chitosan, pectin, silver particles, silver iodide particles.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования в области создания антибактериальных препаратов на основе композитов из серебросодержащих неорганических частиц и полимеров являются одним из интенсивно развивающихся направлений науки, связанных с нанотехнологиями [1–4]. Одна из областей применения таких полимер-металлических композиций является получение пленок и покрытий с антибактериальными свойствами [5–8]. В последние годы для создания пленок возросло использование биополимеров благодаря их низкой стоимости, возобновляемости, нетоксичности и экологичности методов обработки [9, 10, 11]. Так, например, хитозан широко используется для разработки подобных материалов благодаря своим свойствам, таким как биоразлагаемость и биосовместимость. Кроме того, хитозан обладает широким спектром антимикробных свойств и пленкообразующей способностью [3-5, 9]. Серебросодержащие наночастицы обладают сильным терапевтическим действием, поэтому эти материалы широко применяются в различных областях биомедицины, включая производство антимикробных и ранозаживляющих средств [10, 12, 13].

Получение пленок на основе хитозана, его интерполимерных комплексов с поликислотами и серебросодержащими частицами часто проводят из концентрированных растворов полимеров, а частицы серебра получают длительным нагревом смесей полимеров с солью серебра [14–18]. В этих процессах повышение температуры влияет не только на размерные характеристики получаемых дисперсий серебряных частиц, но и на вязкость растворов полисахаридов (конформационные переходы, микрогелевые состояния, образование дополнительных сшивок между функциональными группами полимеров) [19–21]. Данные процессы могут влиять на структуру пленки и равномерное распределение частиц дисперсной фазы по объему пленки. В условиях высокой вязкости полимерных растворов, образование частиц дисперсной фазы может так же приводить к образованию гелей за счет

связывания близкорасположенных макромолекул полимеров частицами новой фазы [22]. Таким образом, возможно одновременное влияние макромолекул полимера и металлосодержащих частиц друг на друга. В этих условиях становится важным не только получение наноразмерных частиц, но и равномерное распределение частиц по объему полимерной матрицы. Известно, что получение галогенидов серебра может способствовать улучшению ряда свойств частиц серебра, таких как фотокаталитические свойства в процессах разложения органических веществ, а так же повышение токсичности в отношении бактерий и микроорганизмов [23, 24]. Одним из перспективных галогенидов серебра является иодид серебра, частицы которого находят широкое применение в различных областях, в большей степени в качестве фотокатализаторов и реагентов с антибактериальными свойствами [25]. Одним из способов получения композиций на основе хитозана, наполненных частицами иодида серебра, является смешение или растворов полимеров, или полимерных пленок с растворами, содержащими предварительно полученные дисперсии частиц иодида серебра [26–28]. В таких процессах дисперсии частиц иодида серебра получают в отсутствии полимеров, по известным методикам. При этом не оценивается влияние полимерной матрицы на размерные характеристики дисперсий в процессе их получения, в концентрированных растворах полимеров и в процессе формирования пленки.

Целью данной работы является изучение влияния условий получения пленок на основе хитозана, наполненных дисперсиями серебросодержащих частиц на размерные характеристики частиц и морфологию поверхности пленок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали хитозан со степенью деацелирования 92% Mw=140000, ООО Биопрогресс, Россия, яблочный пектин со степенью этерификации 60% Mw=26000 марки Unipektine XPP 240 Швейцария, нитрат серебра, 99,9995%, Alfa Aesar, США, иодид калия 99,998%, Alfa Aesar, США, гидроксид натрия, 98%, ООО «Экрос-Аналитика», Россия, азотная кислота 0,1 моль/л стандарт-титр, ООО «Экрос-Аналитика», Россия.

В качестве растворителя для приготовления растворов использовали дистиллированную воду, полученную перегонкой кипячением при нормальных условиях с последующим пропусканием через установку для получения особо чистой воды «Водолей» ООО «НПП Химэлектроника».

Измерение pH растворов всех смесей проводили с помощью pH-метра HANNA (США). Для определения pH раствора использовали комбинированный стеклянный электрод HI 1053 В HANNA (США).

Кондуктометрическое титрование раствора хитозана проводили с использованием кондуктометра inoLabCond 7110 (Xylem Analytics GmbH&Co. KG, WTW), при перемешивании.

Для определения размеров полученных частиц использовали электронный микроскоп LEO912 AB OMEGA (Carl Zeiss Micro Imaging GmbH) при ускоряющем напряжении 100 кВ и с разрешающей способностью 0,2–0,3

нм. Образцы получали непосредственно перед измерением. Каплю исследуемого раствора помещали на подложку из формвара и высушивали при комнатной температуре. Для определения среднего размера частиц использовали программный комплекс ImageJ [29], обрабатывали выборку из 500–600 частиц.

Образцы полученных композиций исследовались на сканирующем электронном микроскопе Versa 3D DualBeam (FEI, США) в режиме низкого вакуума. Содержания элементов получены с помощью системы энергодисперсионного анализа (EDX) Oxford AZtecLive Expert с детектором Ultim Max 65 (Благодарим сотрудников ЦКП ФАХМИ за помощь в проведение анализов образцов).

Исходные растворы хитозана концентрациями 0,005 моль/л и 0,0097 моль/л готовили растворением навески хитозана в воде поддерживая pH 3, добавляя 0,1 моль/л азотную кислоту при постоянном перемешивании.

Раствор хитозана концентрацией 0,005 моль/л с pH 6,5 получали, добавляя 0,1 моль/л гидроксид натрия к раствору хитозана с pH 3.

Исходный раствор пектина концентрацией 0,1 моль/л готовили растворением навески пектина в дистиллированной воде при постоянном перемешивании. Меньшие концентрации пектина, для приготовления композиций с хитозаном, готовили разбавлением исходного раствора дистиллированной водой.

Смеси раствора хитозана и нитрата серебра готовили растворением навески нитрата серебра в растворе хитозана при постоянном перемешивании. Для растворов хитозана с концентрацией 0,005 и 0,0097 моль/л концентрация нитрата серебра в итоговом растворе составила 0,005 моль/л, и 0,0097 моль/л соответственно.

Исходный раствор иодида калия концентрацией 0,1 моль/л готовили растворением навески соли в дистиллированной воде. Для приготовления дисперсий частиц иодида серебра использовали соотношения компонентов $[I^-]/[Ag^+]=0,7$ для получения положительно и $[Ag^+]/[I^-]=0,7$ для получения отрицательно заряженных частиц. Итоговую концентрацию иодида калия в композициях рассчитывали из указанных соотношений.

Пленки всех смесей получали поливом в чашку Петри и дальнейшем высушиванием при температуре 25°C в течение суток в сушильном шкафу марки ШС-80, РУП «Гродторгмаш» Беларусь.

Ксерогель на основе смеси хитозана, пектина и нитрата серебра получали заморозкой раствора смеси при температуре -25°C и лиофильно высушивали сушили с помощью «FreeZone» Labconco corporation, США.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Использование хитозана для получения полимер-металлических композиций в водных растворах ограничено интервалом pH, при котором полимер растворим. Для хитозана разных марок (разная молекулярная масса и степени деацелирования), предельное значение pH, при котором хитозан растворим, ограничивается значениями 5,5–7,0 [30]. Хитозан, применяемый в

данной работе, выпадает в осадок при pH больше 6,5 [31] и не образует комплексы с катионами серебра в интервале pH 3,0–6,5. Кривые кондуктометрического титрования имеют линейный вид для всех растворов хитозана (рис. 1).

Получение частиц серебра или галогенидов серебра, в этом случае, будет проходить по методу псевдоматричного синтеза [32], что может привести к получению дисперсии частиц с большими размерами и широким распределением по размеру. Добавление нитрата серебра к водному раствору хитозана приводило к реакции фотовосстановления катионов серебра, с потемнением раствора. Дисперсия частиц серебра, полученная в присутствии хитозана, характеризуется средним размером 12 нм и узким распределением по размеру (рис. 2).

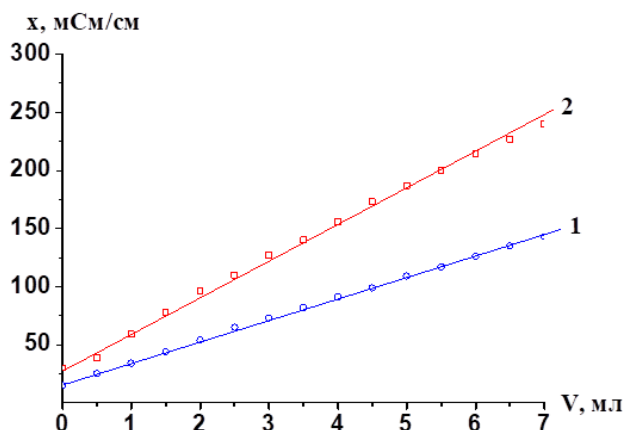
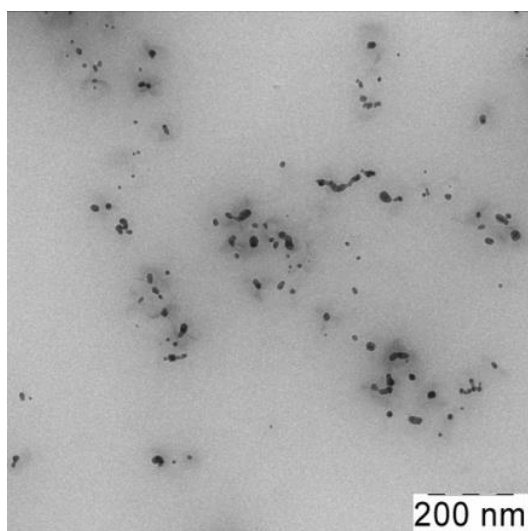
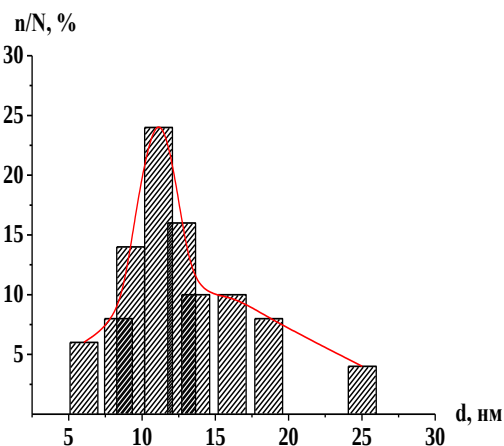


Рис. 1. Кривые кондуктометрического титрования раствора хитозана pH 3,0 (1) и pH 6,5 (2) раствором AgNO_3 .

Fig. 1. Conductometric titration curves of a chitosan solution pH 3.0 (1) и pH 6.5 (2) whis solution AgNO_3 .



a



б

Рис. 2. Микрофотография (а) и диаграмма численного распределения по размеру дисперсии частиц серебра, полученной в присутствии хитозана концентрацией 0,005 моль/л (б).

Fig. 2. Micrograph (a) and numerical size distribution diagram of silver particle dispersion obtained in the presence of chitosan at a concentration of 0.005 mol/L (b).

Данный процесс проводился в растворах хитозана при концентрации полимера 0,005 моль/л, что незначительно ниже концентрации кроссовера равной 0,0097 моль/л [31], вероятно, позволило получить наноразмерные частицы. Получение пленки из раствора при такой концентрации хитозана будет осложнено большим объемом растворителя. Увеличение концентрации хитозана до концентрации кроссовера и образование частиц серебра привело к формированию геля за счет взаимодействия близкорасположенных макромолекул хитозана с образующимися частицами серебра. В этом случае, полученная дисперсия частиц серебра незначительно отличается средним размером частиц равным 17 нм (рис. 3) от дисперсии, полученной в разбавленных растворах (рис. 2). При этом полученная дисперсия характеризуется образованием агломератов размерами 100–140 нм, что может привести к формированию крупных частиц в процессе получения пленки.

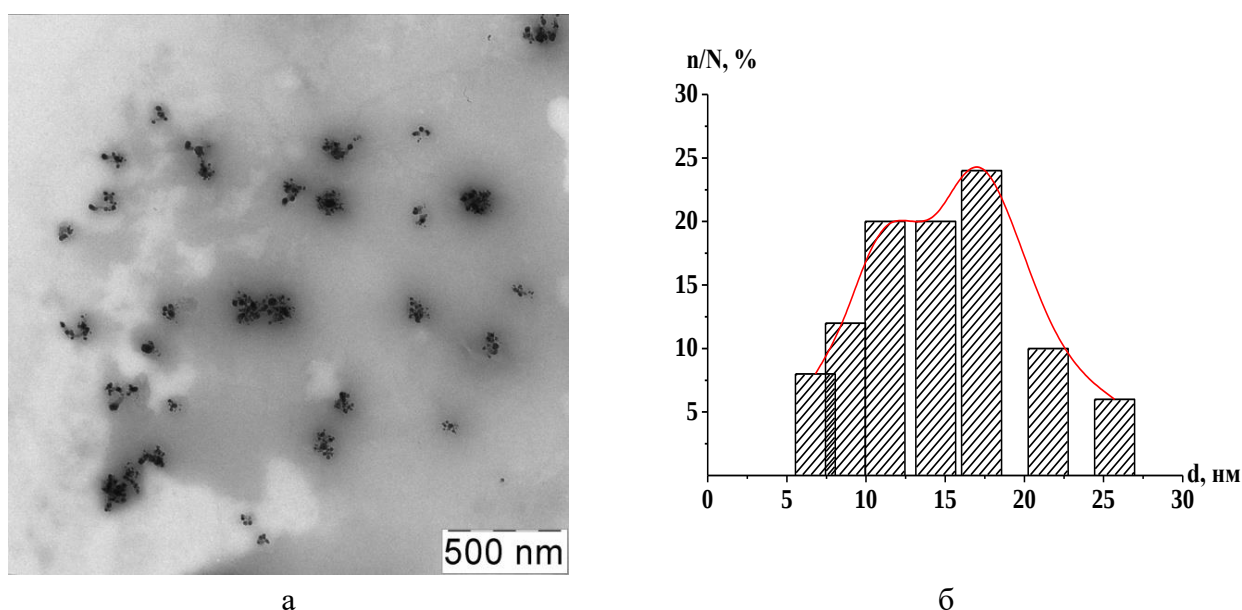


Рис. 3. Микрофотография (а) и диаграмма численного распределения по размеру дисперсии частиц серебра, полученной в присутствии хитозана концентрацией 0,0097 моль/л (б).

Fig. 3. Micrograph (a) and numerical size distribution diagram of silver particle dispersion obtained in the presence of chitosan at a concentration of 0.0097 mol/L (b).

Полученная пленка хитозана наполненного частицами серебра имеет неравномерное распределение частиц серебра по поверхности пленки (рис. 4 а). Неравномерное распределение частиц серебра по поверхности пленки, возможно, объяснить «стеканием» частиц к краям пленки в процессе высыхания под действием поверхностных сил. Увеличение количества частиц у границы пленки привело к их агрегации и увеличению размеров до 5–20 мкм (рис. 4 б).

В центре пленки частицы серебра более равномерно распределены по поверхности и характеризуются размером 185–250 нм (рис. 4 в), что соответствует образованию агломератов частиц образовавшихся в растворе (рис. 3).

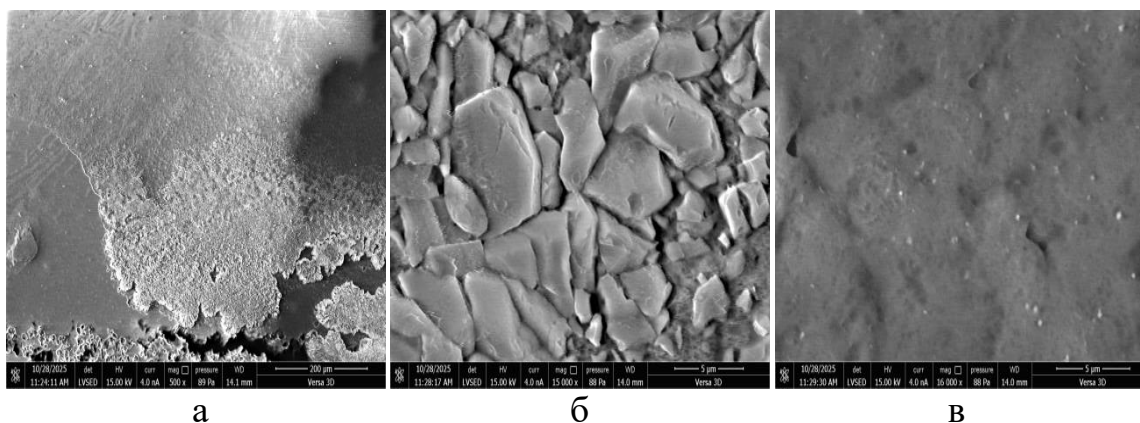


Рис. 4. Микрофотографии СЭМ пленки хитозана, наполненной частицами серебра общий вид (а), большие частицы (б), малые частицы (в).

Fig. 4. SEM micrographs of chitosan film filled with silver particles (a), large particles (b), and small particles (c).

Для контроля размера частиц серебра, образующихся в присутствии полимерного стабилизатора, часто применяют органические кислоты [33]. Так как будущая полимер-металлическая композиция должна быть биосовместимой, было предложено в качестве органической кислоты использовать природную поликислоту – пектин [14, 34]. При этом добавление к раствору хитозана раствора пектина приводит к образованию комплексов за счет водородных связей между функциональными группами полимеров. Комплексообразование наблюдали визуально по изменению вязкости растворов. При мольном соотношении хитозана к пектину равному 6,5 образовывался гель, дальнейшее увеличение количества пектина до соотношения равного 8,0 приводило к формированию плотного геля, перемешивание которого сопровождалось синерезисом и выпадением осадка. Дисперсия частиц серебра, полученная в процессе формирования пленки на основе смеси хитозана и пектина с мольным соотношением 6,5 характеризуется размером частиц 7–30 нм (рис. 5).

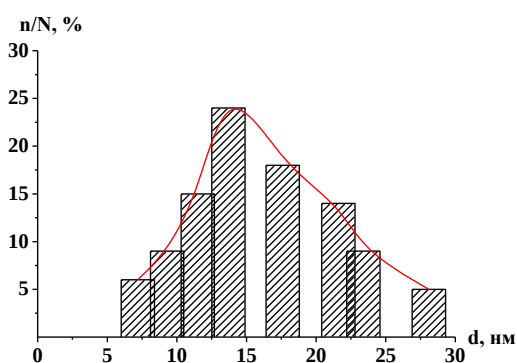
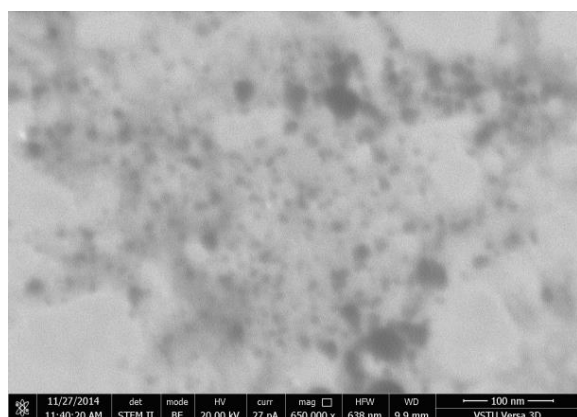


Рис. 5. Микрофотография СЭМ поверхности пленки (а) и диаграмма численного распределения по размеру дисперсии частиц серебра, полученной в пленке хитозана (б).

Fig. 5. SEM micrographs of the film surface (a) and a diagram of the numerical distribution of silver particle dispersion in the chitosan film (b).

Плотный гель хитозана с пектином при мольном соотношении 8,0 подвергали шоковой заморозке и далее леофильной сушке. Полученный ксерогель характеризуется металлическим блеском по всей поверхности пленки (по аналогии с результатом реакции «серебряного зеркала»). На поверхности ксерогеля (рис. 6 а) частицы серебра не были обнаружены методом СЭМ. Однако методом EDX точек поверхности пленки показал присутствию в составе пленки серебра (рис. 6 б, в), что можно объяснить формированием равномерного слоя из наноразмерных частиц серебра.

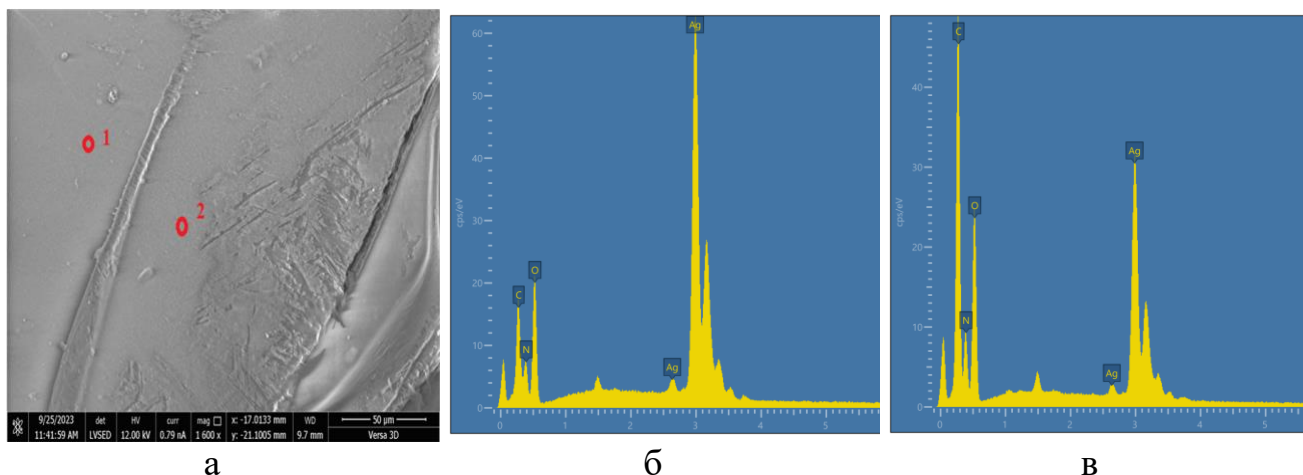


Рис. 6. Микрофотографии СЭМ ксерогеля смеси хитозана и пектина наполненной частицами серебра (а), спектры EDX в точке 1 (б) и 2 (в).

Fig. 6. SEM micrographs of a chitosan-pectin mixture filled with silver particles (a), EDX spectra at point 1 (b) and 2 (c).

Получение дисперсий частиц иодида серебра проводили псевдоматричным синтезом. В работе [31], были подобраны оптимальные условия получения дисперсий положительно и отрицательно заряженных частиц иодида серебра. Полученные данные показывают, что дисперсии частиц, стабилизированные макромолекулами хитозана, характеризуются средним значением диаметра частиц равным 45 нм и 130 нм для положительно и отрицательно заряженных частиц соответственно [31]. Получение дисперсии частиц проводили титрованием водным раствором иодида калия смеси хитозана с нитратом серебра. В концентрированных растворах, в условиях формирования гелевых структур (при концентрации хитозана близкой к концентрации кроссовера или в присутствии комплекса хитозана с пектином) получение дисперсии частиц затруднено невозможностью равномерного перемешивания смесей содержащих нитрат серебра и иодид калия, а так же формированию осадка иодида серебра локально в капле. По этому, пленки, наполненные серебросодержащими частицами, получали из разбавленных растворов композиций.

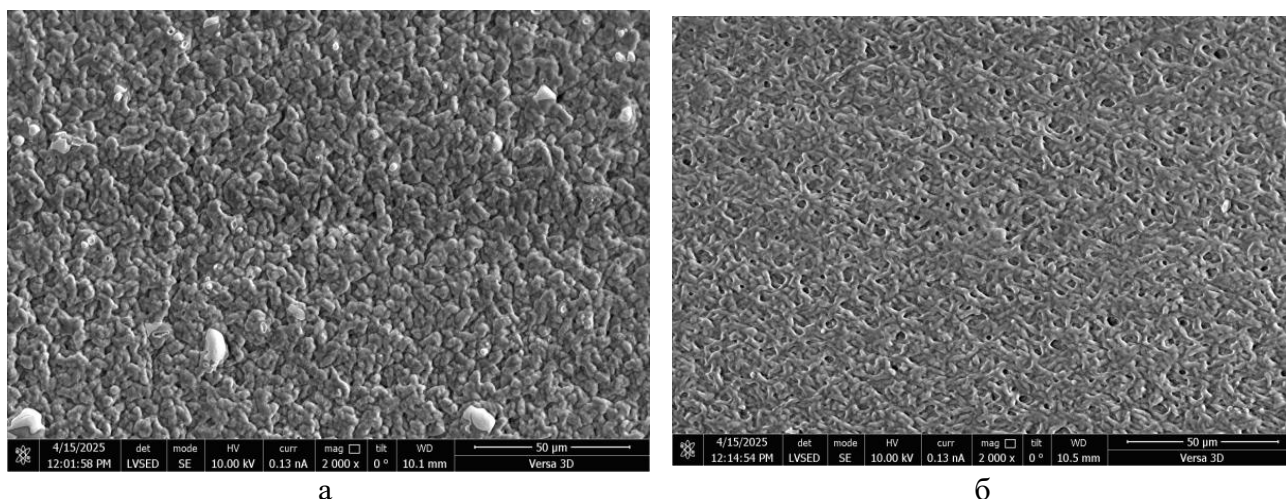


Рис. 7. Микрофотографии СЭМ пленок хитозана, наполненных частицами (а) – положительно заряженные частицы; (б) – отрицательно заряженные частицы.

Fig. 7. SEM micrographs of chitosan films filled with particles: (a) – positively charged particles; (b) – negatively charged particles.

Морфология пленок полученных на основе хитозана и дисперсий серебросодержащих частиц (рис. 7) более структурированная, чем на основе хитозана и частиц серебра, где присутствуют образования длиной до 10 мкм и шириной 1–2 мкм. При этом на поверхности пленки хитозана, наполненной отрицательно заряженной дисперсией частиц, наблюдаются поры со средним размером 3 мкм.

Дисперсия как положительно, так и отрицательно заряженных частиц в пленке хитозана характеризуется размером частиц 0,1–0,5 мкм (рис. 8). Частицы, независимо от знака заряда, распределяются равномерно по структуре пленки, при этом частицы так же наблюдаются на стенках пор пленки.

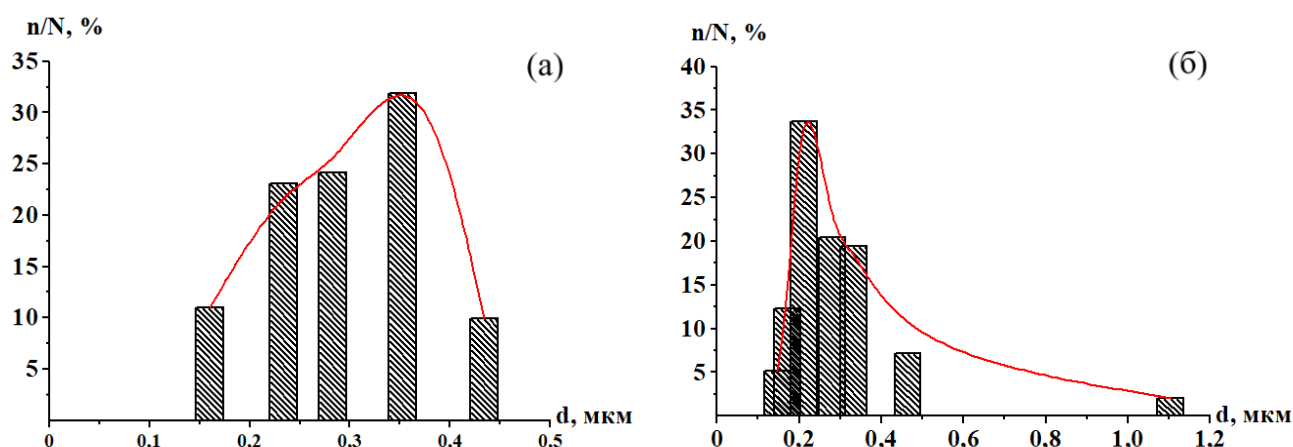


Рис. 8. Распределение серебросодержащих частиц по размерам в пленке хитозана: (а) – положительно заряженные частицы; (б) – отрицательно заряженные частицы.

Fig. 8. Size distribution of silver-containing particles in a chitosan film: (a) positively charged particles; (b) negatively charged particles.

Состав частиц в каждой пленке был исследован методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX). В таблице 1 представлены результаты элементного анализа и массовые доли элементов определенных в точках с поверхности всех пленок.

Таблица 1. Элементный состав и массовые доли элементов поверхности пленок

Table 1. Elemental composition and mass fractions of surface elements of films

Полимер	Хитозан	
Дисперсия частиц	AgI^+	AgI^-
	Массовые доли, %	
C	9,7	34,3
O	19,5	20,2
N	5,3	10,0
I	23,4	29,3
Ag	42,1	6,1

Из таблицы 1 следует, что заложенное в процессе получения дисперсий частиц, соотношение катионов серебра и анионов иода сохраняется в частицах в процессе получения пленок. Так в пленках хитозана в составе частиц, полученных на основе положительно заряженных дисперсий, массовая доля серебра больше массовой доли иода, а на основе отрицательно заряженных дисперсий наблюдается избыток иода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что функциональные группы хитозана не связываются с катионами серебра независимо от уровня pH. Псевдоматричный синтез в разбавленном растворе хитозана с использованием фотовосстановления катионов серебра дал дисперсию частиц серебра. Эти частицы имеют узкое распределение по размеру и средний диаметр около 12 нм. Повышение концентрации хитозана до концентрации кроссовера привело к получению агломератов размером 100–140 нм состоящих из малых (17 нм) частиц. В процессе получения пленки из концентрированного раствора хитозана частицы серебра по поверхности пленки распределяются неравномерно. У границ пленки наблюдается скопление частиц размером 1–5 мкм, а в объеме пленки частицы размером 185–250 нм распределяются по поверхности равномерно.

Добавление пектина к раствору смеси хитозана и нитрата серебра привело к получению гелей разной плотности. Дисперсия частиц серебра полученных в пленке на основе геля содержит частицы со средним размером 15 нм. Фотовосстановление катионов серебра в условиях формирования ксерогеля привело к образованию равномерного покрытия серебряными частицами поверхности геля.

Получение пленок хитозана, наполненных положительно и отрицательно заряженными серебросодержащими частицами, привело к структурированию поверхности пленок, формированию дисперсий частиц со средним размером 0,1–0,5 мкм. Так в пленках хитозана в составе частиц, полученных на основе положительно заряженных дисперсий, массовая доля серебра больше массовой доли йода, а на основе отрицательно заряженных дисперсий наблюдается избыток йода. Полученные структурированные пленки на основе хитозана, наполненные серебросодержащими частицами разного размера, обладают антибактериальным эффектом и могут использоваться для борьбы с различными видами бактерий [35–36].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZUS-2023-0003).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZUS-2023-0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CONFLICT OF INTERESTS:

The authors declare no conflict of interests.

Список литературы:

1. Guerrero, C.M., Martínez, F.B., Vidal, C.P., Streitt, C., Escrig, J., Dicastillo, C. L., Beilstein, J. (2020). Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action. *Nanotechnol*, 11, 1450–1469. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>.
2. Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. (2008). Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы. *Успехи химии*, 77(3). 242–269. <https://www.uspkhim.ru/RCR3751>.
3. Gong, L., Dai, H., Zhang, Sh., Lin, Y. (2016). Silver iodide-chitosan nanotag induced biocatalytic precipitation for self-enhanced ultrasensitive photocathodic immunosensor. *Analytical Chemistry*, 88, 5775–5782. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b00297>.
4. Varlamov, V.P., Il'ina, A.V., Shagdarova, B.T., Lunkov, A.P., Mysyakina, I.S. (2020). Chitin/chitosan and its derivatives: fundamental problems and practical approaches. *Biochemistry*, 85, 154–176. <https://doi.org/10.1134/s0006297920140084>.
5. Rubina, M.S., Naumkin, A.V., Vasilkov, A.Yu. (2018). Chitosan-based films with silver nanoparticles prepared using metal vapor synthesis. *Journal of International Scientific Publications*, 12, 100–109. <https://www.scientific-publications.net/en/article/1001686/>.
6. Ambrogi, V., Donnadio, A., Pietrella, D., Latterini, L., Proietti, F.A., Marmottini, F., Padeletti, G., Kaciulis, S., Riccia, S. (2014). Chitosan films containing mesoporous sba-15 supported silver nanoparticles for wound dressing. *Journal of Materials Chemistry B*, 2, 6054–6063. <https://doi.org/10.1039/C4TB00927D>.
7. Vimalaa, K., Murali Mohana, Y., Samba Sivudua, K., Varaprasada, K., Ravindraa, S., Narayana Reddya, N., Padmab, Y., Sreedharc, B., Mohana Rajua, K. (2010). Fabrication of porous chitosan films impregnated with silver nanoparticles: A facile approach for superior

- antibacterial application. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, 76, 248–258.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.10.044>.
8. Sharma, S., Sanpui, P., Chattopadhyay, A., Ghosh, S.S. (2012). Fabrication of antibacterial silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan composite films. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2, 5837–5843. <https://doi.org/10.1039/C2RA00006G>.
 9. Lu, S., Gao, W., Gu, H.Y. (2008). Construction, application and biosafety of silver nanocrystalline chitosan wound dressing. *Burns*, 34, 623–628.
<https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.08.020>.
 10. Bose, D., Chatterjee, S. (2015). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using Vasaka (*Justicia adhatoda* L.) leaf extract. *Indian Journal Microbiology*, 55(2), 163–167. <https://doi.org/10.1007/s12088-015-0512-1>.
 11. Shen, X.L., Wu, J.M., Chen, Y., Zha, G. (2010). Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan. *Food Hydrocoll*, 24, 285–290. <https://doi.org/10.1007/s12088-017-0670-4>.
 12. Velmurugan, P., Lydroose, M., Lee, S.M., Cho, M., Park, J.H., Balachandar, V., Oh, B.T. (2014). Synthesis of silver and gold nanoparticles using cashew nut shell liquid and its antibacterial activity against fish pathogens. *Indian Journal Microbiology*, 54(2), 196–202.
<https://doi.org/10.1007/s12088-013-0437-5>.
 13. Cooper, A., Oldinski, R., Ma, H., Bryers, J.D., Zhang, M. (2013). Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications. *Carbohydrate Polymer*, 92, 254–259.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.114>.
 14. Demchenko, V., Riabov, S., Sinelnikov, S., Radchenko, O., Kobylinskyi, S., Rybalchenko, N. (2020). Novel approach to synthesis of silver nanoparticles in interpolyelectrolyte complexes based on pectin, chitosan, starch and their derivatives. *Carbohydr Polymer*, 15, 242, 116431.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116431>.
 15. Kulikouskaya, V., Zhdanko, T., Hileuskaya, K., Kraskouski, A., Zhura, A., Skorohod, H., Butkevich, V., Pal, K., Tratsyak, S., Agabekov, V. (2021). Physicochemical aspects of design of ultrathin films based on chitosan, pectin, and their silver nanocomposites with antiadhesive and bactericidal potential. *J Biomed Mater Res A*, 110(1), 217–228.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.37278>.
 16. Akalin, G.O., Oztuna Taner, O., Taner, T. (2022). The preparation, characterization and antibacterial properties of chitosan/pectin silver nanoparticle films. *Polymer Bulletin*, 79, 3495–3512 <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03667-0>.
 17. Sharma, Sh., Sanpui, P., Chattopadhyay, A., Ghosh, S.S. (2012). Fabrication of antibacterial silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan composite films. *RSC Advances*, 2, 5837–5843.
<https://doi.org/10.1039/C2RA00006G>.
 18. Гилевская К.С., Машкин М.Е., Красковский А.Н., Кабанова О.В., Степанова Е.А., Кузьминский И.И., Куликовская В.И., Агабеков В.Е. (2021). Гидротермальный синтез и свойства нанокомпозитов хитозан-серебро. *Журнал неорганической химии*, 66(8). 1017–1024. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21080067>
 19. Сигаева Н.Н., Вильданова Р.Р., Султанбаев А.В., Иванов С.П. (2020). Получение и свойства гидрогелей на основе хитозана и пектина *Коллоидный журнал*, 82(3), 363–376.
<https://doi.org/10.31857/S0023291220030118>.
 20. Muhidinov, Z., Fishman, M.L., Avloev, Kh.Kh., Norova, M.T., Abubakr, A., Nasriddinov, S., Khalikov, D.Kh. (2010). Effect of Temperature on the Intrinsic Viscosity and Conformation of Different Pectins. *Polymer Science Series A*, 52(12), 1257–1263.
<https://doi.org/10.1134/S0965545X10120035>.
 21. Masuelli, MA. (2011). Viscometric study of pectin. Effect of temperature on the hydrodynamic properties. *Int J Biol Macromol*, 48(2), 286–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.11.014>.
 22. Novakov, I.A., Radchenko, F.S., Ozerin, A. S., Rybakova, E.V., Radchenko, S.S. (2011). Formation of polymer-colloid complexes of aluminoxane particles with poly(acrylic acid) and

- its copolymers with acrylamide. *Colloid & Polymer Science*, 289(11). 1197–1203.
<https://doi.org/10.1007/s00396-011-2446-4>.
23. Silver, S. (2003). Bacterial silver resistance: molecular biology and uses and misuses of silver compounds. *FEMS Microbiology Reviews*, 27. 341–353. [https://doi.org/10.1016/s0168-6445\(03\)00047-0](https://doi.org/10.1016/s0168-6445(03)00047-0).
24. Zhang, L., Zhang, H. (2022). Silver Halide-Based Nanomaterials in Biomedical Applications and Biosensing Diagnostics. *Nanoscale Research Letters*, 17. 114–123.
<https://doi.org/10.1186/s11671-022-03752-x>.
25. George, P.P. (2021). A mini review on preparation, characterization, and applications of silver iodide nanoparticles. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 15. 11–17.
<https://doi.org/10.22159/ajpcr.2022.v15i2.43054>.
26. Базунова М.В., Салихов Р.Б., Терегулов Т.Б., Муллағалиев И.Н., Салихов Т.Р., Сафарғалин И.Н., Остальцова А.Д. (2024). Нанокompозитные тонкопленочные материалы на основе полисахаридов и наночастиц иодида серебра для использования в сенсорных устройствах. *Журнал прикладной химии*, 97(4). 347–353.
<https://doi.org/10.31857/S0044461824040091>.
27. Базунова М.В., Чернова В.В., Кулиш Е.И. (2024). Стабилизация частиц зольей йодида серебра ацетатом и N-сукцинилом хитозана. *Химическая физика*, 43(9). 75–83.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X24090099>.
28. Bahari, A., Esmail, S.I., Alattar, A.M. (2025). Investigate optical and structural properties with molecular behavior of AgI and silver oxide nanoparticles prepared by green synthesis from the Acacia Senegal plant and achieving biocompatibility. *J. Opt.* 54, 1261–1268.
<https://doi.org/10.1007/s12596-024-01810-4>.
29. Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9. 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>.
30. Попова Э.В., Домнина Н.С., Зорин И.М., Лезов А.А., И.И. Новикова, Краснобаева И.Л. (2023). Наноструктурированная форма хитозана: способ получения и биологическая активность. *Российские нанотехнологии*, 18(3), 368–376.
<https://doi.org/10.56304/S1992722323020103>.
31. Vinogradov, V.S., Ozerin, A.S., Radchenko, P.S., Novakov, I.A. (2026). Pseudomatrix synthesis characteristics of nanoscale silver iodide particles in the presence of chitosan. *Iran Polym J*, 35, 539–549. <https://doi.org/10.1007/s13726-025-01544-5>.
32. Паписов И.М., Воробьев А.Ю., Паписова А.И., Остаева Г.Ю., Исаева И.Ю., Полякова Е.В. (2016). Нанокompозит, формирующийся на катоде при электрохимическом восстановлении ионов меди из полимерного раствора. *Доклады Академии наук*, 468(5). 534–537 <https://doi.org/10.7868/S086956521617014X>.
33. Długosz, O., Banach, M. (2019). Continuous production of silver nanoparticles and process control. *Journal of Cluster Science*, 30. 541–552. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01505-y>.
34. Kulikouskaya, V., Zhdanko, T., Hileuskaya, K., Kraskouski, A., Zhura, A., Skorohod, H., Butkevich, V., Pal, K., Tratsyak, S., Agabekov, V. (2022). Physicochemical aspects of design of ultrathin films based on chitosan, pectin, and their silver nanocomposites with antiadhesive and bactericidal potential. *J Biomed Mater Res A*, 110(1). 217–228.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.37278>.
35. Хина А. Г., Крутяков Ю.А. (2021). Сходство и различия в механизме антибактериального действия ионов и наночастиц серебра. *Прикладная биохимия и микробиология*, 57(6). 523–535. <https://doi.org/10.31857/S0555109921060052>.
36. Dong, Y., Zhu, H., Shen, Y., Zhang, W., Zhang, L. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles of different particle size against *Vibrio Natriegens*. *PLoS ONE*, 14(9). e0222322.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222322>.

References:

1. Guerrero, C.M., Martínez, F.B., Vidal, C.P., Streitt, C., Escrig, J., Dicastillo, C. L., Beilstein, J. (2020). Antimicrobial metal-based nanoparticles: a review on their synthesis, types and antimicrobial action. *Nanotechnol*, 11, 1450–1469. <https://doi.org/10.3762/bjnano.11.129>.
2. Krutyakov, Yu.A., Kudrinskiy, A.A., Olenin, A.Yu., Lisichkin, G.V. (2008). Synthesis and properties of silver nanoparticles: advances and prospects *Russian Chemical Review*, 77, 233–269. <https://doi.org/10.1070/rc2008v077n03abeh003751>.
3. Gong, L., Dai, H., Zhang, Sh., Lin, Y. (2016). Silver iodide-chitosan nanotag induced biocatalytic precipitation for self-enhanced ultrasensitive photocathodic immunosensor. *Analytical Chemistry*, 88, 5775–5782. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.6b00297>.
4. Varlamov, V.P., Il'ina, A.V., Shagdarova, B.T., Lunkov, A.P., Mysyakina, I.S. (2020). Chitin/chitosan and its derivatives: fundamental problems and practical approaches. *Biochemistry*, 85, 154–176. <https://doi.org/10.1134/s0006297920140084>.
5. Rubina, M.S., Naumkin, A.V., Vasilkov, A.Yu. (2018). Chitosan-based films with silver nanoparticles prepared using metal vapor synthesis. *Journal of International Scientific Publications*, 12, 100–109. <https://www.scientific-publications.net/en/article/1001686/>.
6. Ambrogi, V., Donnadio, A., Pietrella, D., Latterini, L., Proietti, F.A., Marmottini, F., Padeletti, G., Kaciulis, S., Riccia, S. (2014). Chitosan films containing mesoporous sba-15 supported silver nanoparticles for wound dressing. *Journal of Materials Chemistry B*, 2, 6054–6063. <https://doi.org/10.1039/C4TB00927D>.
7. Vimalaa, K., Murali Mohana, Y., Samba Sivudua, K., Varaprasada, K., Ravindraa, S., Narayana Reddya, N., Padmab, Y., Sreedharc, B., Mohana Rajua, K. (2010). Fabrication of porous chitosan films impregnated with silver nanoparticles: A facile approach for superior antibacterial application. *Colloids and Surfaces B Biointerfaces*, 76, 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2009.10.044>.
8. Sharma, S., Sanpui, P., Chattopadhyay, A., Ghosh, S.S. (2012). Fabrication of antibacterial silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan composite films. *Royal Society of Chemistry Advances*, 2, 5837–5843. <https://doi.org/10.1039/C2RA00006G>.
9. Lu, S., Gao, W., Gu, H.Y. (2008). Construction, application and biosafety of silver nanocrystalline chitosan wound dressing. *Burns*, 34, 623–628. <https://doi.org/10.1016/j.burns.2007.08.020>.
10. Bose, D., Chatterjee, S. (2015). Antibacterial activity of green synthesized silver nanoparticles using Vasaka (*Justicia adhatoda* L.) leaf extract. *Indian Journal Microbiolodgy*, 55(2), 163–167. <https://doi.org/10.1007/s12088-015-0512-1>.
11. Shen, X.L., Wu, J.M., Chen, Y., Zha, G. (2010). Antimicrobial and physical properties of sweet potato starch films incorporated with potassium sorbate or chitosan. *Food Hydrocoll*, 24, 285–290. <https://doi.org/10.1007/s12088-017-0670-4>.
12. Velmurugan, P., Lydroose, M., Lee, S.M., Cho, M., Park, J.H., Balachandar, V., Oh, B.T. (2014). Synthesis of silver and gold nanoparticles using cashew nut shell liquid and its antibacterial activity against fish pathogens. *Indian Journal Microbiolodgy*, 54(2), 196–202. <https://doi.org/10.1007/s12088-013-0437-5>.
13. Cooper, A., Oldinski, R., Ma, H., Bryers, J.D., Zhang, M. (2013). Chitosan-based nanofibrous membranes for antibacterial filter applications. *Carbohydrate Polymer*, 92, 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.08.114>.
14. Demchenko, V, Riabov, S, Sinelnikov, S, Radchenko, O, Kobylinskyi, S, Rybalchenko, N. (2020). Novel approach to synthesis of silver nanoparticles in interpolyelectrolyte complexes based on pectin, chitosan, starch and their derivatives. *Carbohydr Polymer*, 15, 242, 116431. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116431>.
15. Kulikouskaya, V, Zhdanko, T, Hileuskaya, K, Kraskouski, A, Zhura, A, Skorohod, H, Butkevich, V, Pal, K, Tratsyak, S, Agabekov, V. (2021). Physicochemical aspects of design of ultrathin films based on chitosan, pectin, and their silver nanocomposites with antiadhesive and bactericidal potential. *J Biomed Mater Res A*, 110(1), 217–228. <https://doi.org/10.1002/jbm.a.37278>.

16. Akalin, G.O., Oztuna Taner, O., Taner, T. (2022). The preparation, characterization and antibacterial properties of chitosan/pectin silver nanoparticle films. *Polymer Bulletin*, 79, 3495–3512 <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03667-0>.
17. Sharma, Sh., Sanpui, P., Chattopadhyay, A., Ghosh, S.S. (2012). Fabrication of antibacterial silver nanoparticle–sodium alginate–chitosan composite films. *RSC Advances*, 2, 5837–5843. <https://doi.org/10.1039/C2RA00006G>.
18. Hileuskaya, K.S., Mashkina, M.E., Kraskouskia, A.N., Kabanava, V.S., Stepanova, E.A., Kuzminski, I.I., Kulikouskaya, V.I., Agabekova, V.E. (2021). Hydrothermal Synthesis and Properties of Chitosan–Silver Nanocomposites. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 66(8), 1128–1134. <https://doi.org/10.1134/s0036023621080064>.
19. Sigaeva, N.N., Vil'danova, R.R., Ivanov, S.P., Sultanbaev A.V. (2020). Synthesis and properties of chitosan- and pectin-based hydrogels. *Colloid Journal*, 82(3). 311–323. <https://doi.org/10.1134/S1061933X20030114>.
20. Muhidinov, Z., Fishman, M.L., Avloev, Kh.Kh., Norova, M.T., Abubakr, A., Nasriddinov, S., Khalikov, D.Kh. (2010). Effect of Temperature on the Intrinsic Viscosity and Conformation of Different Pectins. *Polymer Science Series A*, 52(12), 1257–1263. <https://doi.org/10.1134/S0965545X10120035>.
21. Masuelli, MA. (2011). Viscometric study of pectin. Effect of temperature on the hydrodynamic properties. *Int J Biol Macromol*, 48(2), 286–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2010.11.014>.
22. Novakov, I.A., Radchenko, F.S., Ozerin, A. S., Rybakova, E.V., Radchenko, S.S. (2011). Formation of polymer-colloid complexes of aluminosilicate particles with poly(acrylic acid) and its copolymers with acrylamide. *Colloid & Polymer Science*, 289(11). 1197–1203. <https://doi.org/10.1007/s00396-011-2446-4>.
23. Silver, S. (2003). Bacterial silver resistance: molecular biology and uses and misuses of silver compounds. *FEMS Microbiology Reviews*, 27. 341–353. [https://doi.org/10.1016/s0168-6445\(03\)00047-0](https://doi.org/10.1016/s0168-6445(03)00047-0).
24. Zhang, L., Zhang, H. (2022). Silver Halide-Based Nanomaterials in Biomedical Applications and Biosensing Diagnostics. *Nanoscale Research Letters*, 17. 114–123. <https://doi.org/10.1186/s11671-022-03752-x>.
25. George, P.P. (2021). A mini review on preparation, characterization, and applications of silver iodide nanoparticles. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 15. 11–17. <https://doi.org/10.22159/ajpcr.2022.v15i2.43054>.
26. Bazunova M.V., Salikhov R.B., Teregulov T.B., Mullagaliev I.N., Salikhov T.R., Safargalin I.N., Ostaltsova A.D. (2024). Nanocomposite thin-film materials based on polysaccharides and silver iodide nanoparticles for use in sensor devices. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 97(4). 347–353. <https://doi.org/10.31857/S0044461824040091>.
27. Bazunova, M.V., Chernova, V.V., Kulish, E.I. (2024). Stabilization of silver iodide sol particles by acetate and N-succinyl of chitosan. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 18(5), 1382–1388 <https://doi.org/10.1134/S1990793124700945>.
28. Bahari, A., Esmail, S.I., Alattar, A.M. (2025). Investigate optical and structural properties with molecular behavior of AgI and silver oxide nanoparticles prepared by green synthesis from the Acacia Senegal plant and achieving biocompatibility. *J. Opt.* 54, 1261–1268. <https://doi.org/10.1007/s12596-024-01810-4>.
29. Schneider, C.A., Rasband, W.S., Eliceiri, K.W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature Methods*, 9. 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>.
30. Popova, E.V., Domnina, N.S., Zorin, I.M., Lezov, A.A., Novikova, I.I., Krasnobaeva, I.L. (2023). Nanostructured form of chitosan: method of production and biological activity. *Russian Nanotechnology*, 18(3), 368–376. <https://doi.org/10.56304/S1992722323020103>.
31. Vinogradov, V.S., Ozerin, A.S., Radchenko, P.S., Novakov, I.A. (2026). Pseudomatrix synthesis characteristics of nanoscale silver iodide particles in the presence of chitosan. *Iran Polym J*, 35, 539–549. <https://doi.org/10.1007/s13726-025-01544-5>.

32. Papisov, I.M., Vorobyov, A.Yu., Papisova, A.I., Ostaeva, G.Yu., Isaeva, I.Yu., Polyakova, E.V. (2016). Nanocomposite forming on the cathode in electrochemical reduction of copper ions from a polymer solution. *Doklady Chemistry*, 468(2). 183–186.
<https://doi.org/10.1134/S0012500816060033>.
33. Długosz, O., Banach, M. (2019). Continuous production of silver nanoparticles and process control. *Journal of Cluster Science*, 30. 541–552. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01505-y>.
34. Kulikouskaya, V., Zhdanko, T., Hileuskaya, K., Kraskouski, A., Zhura, A., Skorohod, H., Butkevich, V., Pal, K., Tratsyak, S., Agabekov, V. (2022). Physicochemical aspects of design of ultrathin films based on chitosan, pectin, and their silver nanocomposites with antiadhesive and bactericidal potential. *J Biomed Mater Res A*, 110(1). 217–228.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.37278>.
35. Khina, A.G., Krutyakov, Y.A. (2021). Similarities and Differences in the Mechanism of Antibacterial Action of Silver Ions and Nanoparticles. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 57(6). 683-693. <https://doi.org/10.1134/S0003683821060053>.
36. Dong, Y., Zhu, H., Shen, Y., Zhang, W., Zhang, L. (2019). Antibacterial activity of silver nanoparticles of different particle size against *Vibrio Natriegens*. *PLoS ONE*, 14(9). e0222322.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0222322>.