

СЕРЕБРОСОДЕРЖАЩИЕ НАНОДИСПЕРСИИ НА ОСНОВЕ ВОДРАСТВОРИМОГО СОПОЛИМЕРА *N*-ВИНИЛПИРРОЛИДОНА С *N*-КРОТИЛ-*N*-АМИНОСАЛИЦИЛАТОМ НАТРИЯ И КРОТИЛОВЫМ СПИРТОМ: СИНТЕЗ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

© С. В. Валужева¹, М. Э. Вылегжанина¹, К. А. Митусова¹, Л. Н. Боровикова¹,
А. В. Караваева², Н. А. Нестерова¹, Е. Ф. Панарин¹

¹ Институт высокомолекулярных соединений РАН,
199004, г. Санкт-Петербург, Большой пр. В. О., д. 31

² Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет
Министерства здравоохранения Российской Федерации,
197376, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 14
E-mail: svalu67@mail.ru

Поступила в Редакцию 1 декабря 2020 г.

После доработки 14 декабря 2020 г.

Принята к публикации 25 января 2021 г.

*Синтезированы серебросодержащие наносистемы на основе тройного сополимера *N*-винилпирролидона с *N*-кротил-*N*-аминосалицилатом натрия и кротиловым спиртом в широком диапазоне варьирования концентрации серебра. Методами УФ/видимой спектроскопии, атомно-силовой и просвечивающей электронной микроскопии показано влияние содержания серебра на спектральные и структурно-морфологические характеристики серебросодержащих нанодисперсий. Установлено, что изученные нанодисперсии проявляют антибактериальную активность в отношении грамположительных бактерий *S. aureus* и грамотрицательных бактерий *E. Coli*, подавляя их рост при концентрации серебра 0.01 мас%.*

Ключевые слова: *серебросодержащие нанодисперсии; тройной сополимер; УФ/видимая спектроскопия; атомно-силовая и просвечивающая электронная микроскопия; антибактериальная активность*
DOI: 10.31857/S004446182103004X

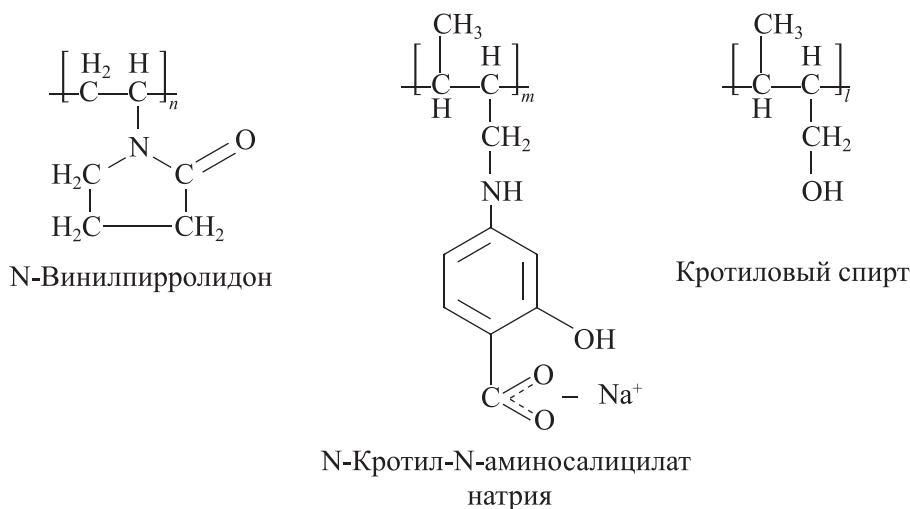
Наночастицы Ag⁰ проявляют выраженные анти-микробные свойства [1–4], однако в свободном состоянии неустойчивы в растворе, способны к агрегации и к окислению. В качестве стабилизаторов могут использоваться полимерные соединения [1, 5]. Благодаря нековалентным (адсорбционным) взаимодействиям полимерных цепей с поверхностью растущих наночастиц образуются макромолекулярные экраны, препятствующие росту частиц и предохраняющие их от агрегации. Также необходимо отметить, что в присутствии сополимеров процесс восстановления ионов может протекать с более высокой скоростью, чем в случае соответствующих гомополимеров [1].

Некоторые сополимеры способны проявлять собственную биологическую активность. Так, например, сополимеры, содержащие в своем составе *N*-кротил-*N*-аминосалицилат натрия, активны против микобактерий туберкулеза [6]. Таким образом, интерес представляет как исследование эффективности использования сополимеров в процессе стабилизации наночастиц серебра, так и изучение физико-химических свойств гибридных наносистем наночастица/сополимер с полифункциональной биологической активностью.

Цель работы — синтез дисперсных систем, в которых наночастицы серебра стабилизированы водорастворимым тройным сополимером *N*-винил-

пирролидона с хелатобразующими звеньями N-кротил-N-аминосалицилата натрия и кротиловым спиртом (состав 89.6:1.8:8.6 мол%) (ТСП), при варьировании концентрации наночастиц серебра в растворе; исследование влияния состава дисперсий

на их спектральные и структурно-морфологические характеристики, а также на их антибактериальную активность. Структурная формула сополимера представлена ниже:



Экспериментальная часть

В работе использовали: N-винилпирролидон (Aldrich, кат. № V340-9), очищенный перегонкой в вакууме ($T_{\text{кип}} = 69^\circ\text{C}$ при 3 мм рт. ст., $n_{\text{D}20}^{20} 1.5120$); кротоновый альдегид (ч., ООО «Компания Пушкинские лаборатории»), очищенный перегонкой ($T_{\text{кип}} = 102.15^\circ\text{C}$, $n_{\text{D}20}^{20} 1.4370$); 2,2'-азобисизобутиронитрил (Порофор ЧХЗ-57, 99%, ООО «ЛДХим»); 4-аминосалициловую кислоту (99%, Acros Organics, кат. № 104621000); NaBH_4 (95%, х.ч., АО «Вектон»); AgNO_3 (х.ч., ООО «ЭкросХим»); диэтиловый эфир (ч.д.а., ООО «Кузбассоргхим»); солянокислый гидроксилламин (ч.д.а., АО «ЛенРеактив»); NaOH (х.ч., АО «ЛенРеактив»).

Синтез тройного сополимера, содержащего 4-аминосалициловую кислоту, проводили реакцией замещения в цепях водорастворимого сополимера N-винилпирролидона с кротоновым альдегидом. Исходный сополимер N-винилпирролидона с кротоновым альдегидом, содержащий 7.6 мол% кротонового альдегида, получали радикальной сополимеризацией по методике [7]. Сополимеры выделяли осаждением в диэтиловый эфир и сушили в вакууме при комнатной температуре до постоянной массы. Состав сополимеров определяли по содержанию альдегидных групп, проводя реакцию оксимирования с солянокислым гидроксилламином.

Строение синтезированных соединений подтверждали данными ИК-спектроскопии по нали-

чию полосы поглощения альдегидных групп при 1720 см^{-1} . ИК-спектры регистрировали на ИК-Фурье-спектрофотометре Vertex-70 (Bruker) с приставкой ATR (Pike). Молекулярную массу оценивали на основе вискозиметрических данных. Характеристическую вязкость $[\eta]$ определяли с помощью вискозиметра Уббеллоде при 25°C в 0.1 М растворе CH_3COONa (х.ч., АО «Вектон»). Молекулярную массу рассчитывали, используя зависимость Марка–Куна–Хаувинка для поли-N-винилпирролидона: $[\eta] = 8.86 \cdot 10^{-5} \cdot M^{0.74}$ [8]. Молекулярная масса сополимера составила 5000.

Синтез сополимера, содержащего 4-аминосалициловую кислоту, проводили реакцией замещения в цепях исходного сополимера, содержащего альдегидные группы, с последующим восстановлением образовавшегося основания Шиффа. В 16%-ный водный раствор сополимера N-винилпирролидона с кротоновым альдегидом при комнатной температуре добавляли 4-аминосалициловую кислоту (мольное соотношение компонентов составляло 3:1). Для формирования азометиновых связей между альдегидными группами сополимера и 4-аминосалициловой кислоты pH реакционной среды доводили 1 М NaOH до 9 и поддерживали в течение 3 ч. Образовавшееся основание Шиффа подвергали гидрированию NaBH_4 , для этого в реакционную среду вносили рассчитанное количество NaBH_4 и выдерживали при перемешивании в течение 16 ч, при этом непрореагировавшие карбонильные группы альдегида восстанавливались до гидроксильных. Модифицированный сополимер

диализовали, затем выделяли методом лиофильной сушки.

Строение сополимера подтверждали данными УФ-спектроскопии. На УФ-спектре ТСП регистрируются полосы поглощения при 309 и 280 нм, характерные для 4-аминосалициловой кислоты в ионизованной форме. Содержание звеньев *N*-кротил-*N*-аминосалициловой кислоты в ТСП определяли методом потенциометрического титрования, предварительно пропустив сополимер через ионообменную колонку с катионитом КУ-2-8 в H^+ -форме (ООО «Взор»). Содержание звеньев *N*-кротил-*N*-аминосалициловой кислоты составляло 1.8 мол%.

Наночастицы Ag^0 получали в результате окислительно-восстановительной реакции $AgNO_3$ с $NaBH_4$ по методике [1]. Синтез проводили из расчета $c_{Ag} = 0.001-0.01$ мас% и $c_{ТСП} = 0.1$ мас% (соответственно отношение ν концентраций серебра и сополимера составляло $\nu = c_{Ag}/c_{ТСП} = 0.01-0.1$). В результате восстановления серебра сформировались дисперсии желтовато-коричневатого цвета разной степени насыщенности (рис. 1). Наиболее интенсивно окрашена дисперсия при отношении $\nu = 0.1$.

Для измерения рН среды использовали милливольтметр И-160 МИ (НПО «Измерительная техника»). Величина рН серебросодержащих растворов составляла 9.5–10.5. Полученные дисперсии стабильны не менее 2–3 мес.

Измерения оптической плотности (D) водных растворов тройного сополимера и соответствующих серебросодержащих дисперсий $Ag^0/ТСП$ проводили на спектрофотометре Shimadzu UV-1280 в диапазоне длин волн 185–900 нм в термостатируемом режиме, толщина фотометрического слоя 1 см.

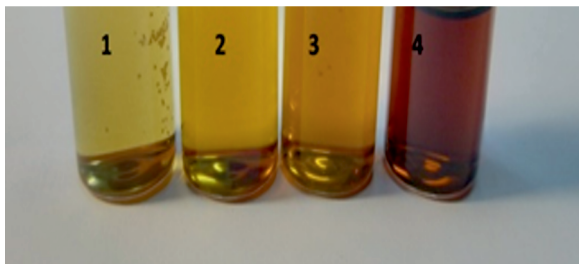


Рис. 1. Фотография серебросодержащих дисперсий, стабилизированных тройным сополимером *N*-винилпирролидона с *N*-кротил-*N*-аминосалицилатом натрия и кротиловым спиртом (состав 89.6:1.8:8.6 мол%) через 24 ч после завершения реакции.

Представлены 4 пробы с фиксированной концентрацией сополимера ($c_{ТСП} = 0.1$ мас%) и варьируемым отношением ν концентраций серебра и сополимера $c_{Ag}/c_{ТСП}$: 1 — 0.01, 2 — 0.025, 3 — 0.05, 4 — 0.1.

Исследование морфологической картины дисперсий $Ag^0/ТСП$ проводили методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на атомно-силовом микроскопе Nanotop NT-206 (ОДО «Микротестмашины»). Растворы дисперсий наносили на поверхность свежего скола слюды. Измерения выполняли в атмосферных условиях в контактном режиме с использованием кремниевых кантилеверов FMG01 с коэффициентом жесткости $k = 3.0$ Н·м⁻¹ и радиусом кривизны кончика острия 10 нм. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы Surface Explorer. В контактном режиме сканирования одновременно с получением топографии поверхности происходит сканирование образца методом латеральных сил. Полученное изображение контраста латеральных сил позволяет визуализировать области с различным коэффициентом трения. Экспериментальные данные обрабатывали с помощью программы Surface Explorer, в том числе рассчитывали среднеарифметическое отклонение профиля R_a и среднеквадратичное отклонение профиля R_q для отображаемого участка поверхности.*

Исследования серебросодержащих дисперсий методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили на электронном микроскопе BS-500 (Tesla) при ускоряющем напряжении $U = 60$ кВ, в диапазоне увеличений 9000–30 000. Перед исследованием дисперсии наносили на медную сетку, покрытую формваровой пленкой, и сушили на воздухе.

Гидродинамические радиусы наноструктур R_h в дисперсиях определяли методом динамического светорассеяния (ДСР) на корреляционном спектрометре Photocor Complex (источник света — гелий-неоновый лазер фирмы Coherent мощностью 20 мВт с длиной волны $\lambda = 632.8$ нм). Обработку корреляционной функции осуществляли с помощью программы DynaLS. Величины гидродинамических радиусов наноструктур рассчитывали из значений коэффициентов диффузии по уравнению Эйнштейна–Стокса [9].

Методом радиальной диффузии в агар** была определена антибактериальная активность водного раствора ТСП [$c_{ТСП} = 0.2$ мас% (образец № 1)] и серебросодержащих дисперсий [$\nu = 0.05$, $c_{Ag} = 0.005$ мас%, $c_{ТСП} = 0.1$ мас% (образец № 2) и $\nu = 0.05$, $c_{Ag} = 0.01$ мас%, $c_{ТСП} = 0.2$ мас% (образец № 3)]. При микробиологическом тестировании

* ГОСТ 25142-82. Шероховатость поверхности. Термины и определения (СТ СЭВ 1156-78).

** ОФС.1.2.4.0010.18. Определение антимикробной активности антибиотиков методом диффузии в агар. Государственная фармакопея Российской Федерации, XIV изд.

нии *in vitro* использовали два тест-микроорганизма: *Staphylococcus aureus* ATCC 209P и *Escherichia coli* ATCC. Для посева брали суточную культуру тест-микроорганизмов, выращенных на скошенном мясо-пептонном агаре (МПА; ЗАО СП «ХИМПРОМ») в фазе логарифмического роста. Чашки Петри с МПА засеивали «газоном» тест-микроорганизмами из расчета 10^8 клеток на чашку. Чашки инкубировали при температуре 37°C в течение 20 ч, затем измеряли диаметр зоны задержки роста микроорганизмов.

Обсуждение результатов

На спектре тройного сополимера регистрируются две ярко выраженные полосы поглощения при $\lambda = 285$ и 310 нм (рис. 2, а), которые соответствуют N-кротил-N-аминосалициловой кислоте. Максимум в спектрах исследуемых дисперсий регистрировался при $\lambda = 400$ – 420 нм (рис. 2, б, табл. 1), что соответствует полосе поверхностного плазмонного резонанса в водном растворе наночастиц серебра в нуль-валентном состоянии [1, 10]. При отношении ν концентраций серебра и сополимера, равном 0.1, наблюдался гипсохромный сдвиг полос поглощения I и II (табл. 1) по сравнению со спектром свободного сополимера. В интервале $\nu = 0.01$ – 0.05 положение полос I и II оставалось неизменным. Для полосы поглощения III, характерной для наночастиц серебра ($\lambda = 400$ – 420 нм), зависимости положения максимума на спектрах поглощения от параметра ν при $\nu = 0.01$ – 0.05 не наблюдалось: $\lambda = 420$ нм. При $\nu = 0.1$ максимум полосы поглощения III фиксируется при $\lambda = 400$ нм (табл. 1). Можно предположить, что гипсохромный сдвиг максимума полосы III (рис. 2, б, кривая 4) при максимальной концентрации серебра в дисперсии $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ может быть обусловлен уменьшением размеров серебросодержащих наноструктур (наночастицы нуль-валентного серебра вместе с органической фазой), поскольку bathochromный сдвиг максимума полосы поглощения обычно связан с агло-

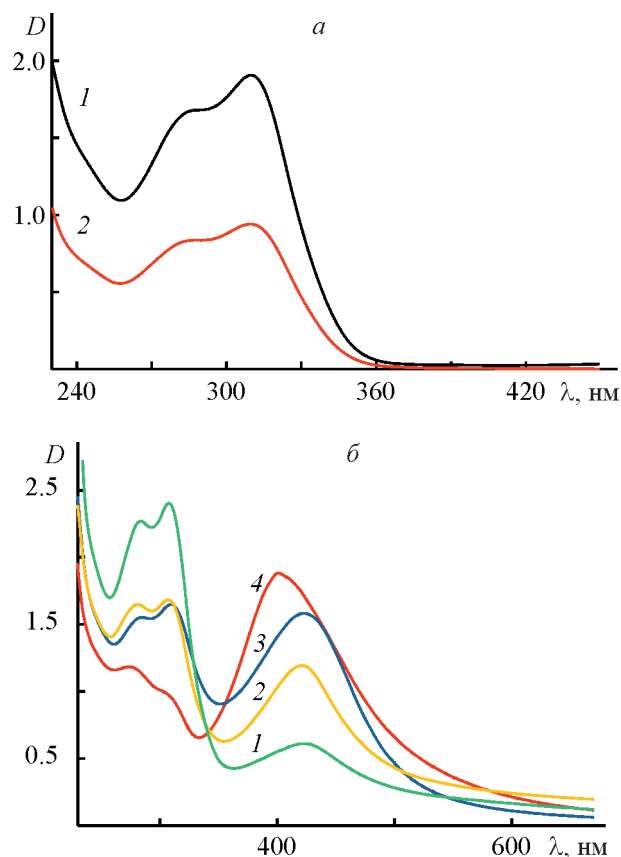


Рис. 2. Спектры поглощения тройного сополимера N-винилипирролидона с N-кротил-N-аминосалицилатом натрия и кротилловым спиртом (состав 89.6:1.8:8.6 мол%) при $c_{\text{ТСП}} = 0.4$ (1) и 0.2 мас% (2) (а) и дисперсий $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ ($c_{\text{ТСП}} = 0.1$ мас%) при варьировании отношения концентраций $c_{\text{Ag}}/c_{\text{ТСП}}$: 1 — 0.01, 2 — 0.025, 3 — 0.05, 4 — 0.1 (б).

мерацией частиц в растворе. Это подтверждается данными динамического светорассеяния: при $\nu = 0.1$ (максимальное содержание серебра в дисперсии) гидродинамический радиус наноструктуры R_h достигает наименьшего значения (табл. 2). Важно отметить, что в спектрах дисперсий $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ четко прослежи-

Таблица 1

Положения максимумов на спектрах поглощения серебросодержащих дисперсий $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ в зависимости от отношения концентраций серебра и сополимера в дисперсии

Отношение концентраций серебра и сополимера в дисперсии ν	λ , нм		
	полоса I	полоса II	полоса III
0.01	285	310	420
0.025	285	310	420
0.05	285	310	420
0.1	275	305	400

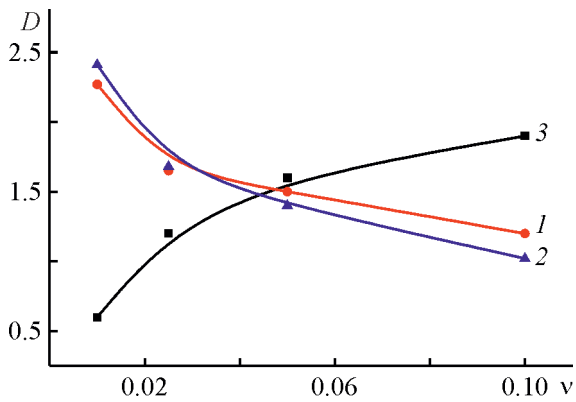


Рис. 3. Зависимость величины оптической плотности в точках максимумов характеристических полос поглощения от отношения концентраций серебра и сополимера в дисперсии: полоса I (1), полоса II (2) и полоса III (3).

вается тенденция возрастания величины оптической плотности D от v для полосы поглощения III на фоне падения интенсивности полос I и II (рис. 3).

На изображениях, полученных для дисперсии $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при $v = 0.01$ (рис. 4), визуализируются структуры двух морфологических типов: сферические наноструктуры диаметром до 50 нм (радиусом до 25 нм) (табл. 2) и высотой над поверхностью подложки ~ 3 нм; тонкие ажурные кольцевые структуры размером $\sim 200\text{--}300$ нм, имеющие высоту над поверхностью подложки не более 1 нм. Радиусы сферических наноструктур, оцененные методом АСМ (табл. 2), достаточно хорошо коррелируют с геометрическими размерами наноструктур, полученными методом динамического светорассеяния, $R_{\text{sp}} = 16$ нм ($R_{\text{sp}} = 1.29R_{\text{h}}$ — соотношение, выполняемое для сферической модели наноструктуры). Для пленки, отлитой из дисперсии $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при $v = 0.01$ (рис. 4, в), характерна островковая морфология: наночастицы

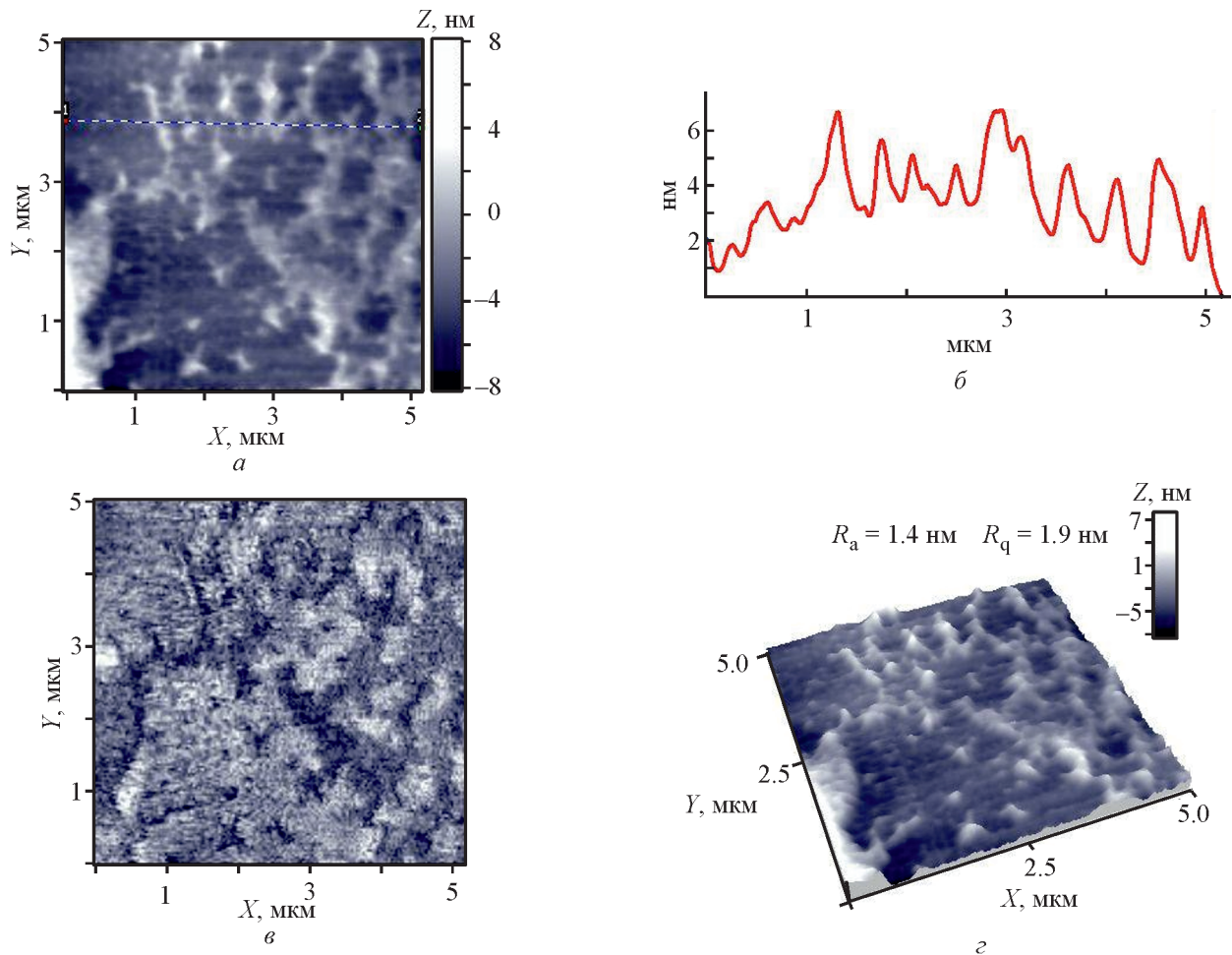


Рис. 4. Изображения поверхности тонкой пленки из дисперсии $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при отношении концентраций серебра и сополимера в дисперсии, равном 0.01, полученные методом атомно-силовой микроскопии.

a — топография поверхности, *б* — профиль выделенного участка, *в* — контраст латеральных сил, *г* — 3D-изображение.

Таблица 2

Размеры наноструктур и параметры отклонений (R_a , R_q), определенные при варьировании отношения ν концентраций серебра и сополимера в серебросодержащих дисперсиях $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ методом динамического светорассеяния (R_h) для дисперсий и методом атомно-силовой микроскопии ($R_{\text{АСМ}}$) для пленок, полученных на слюде из соответствующих дисперсий

Отношение концентраций серебра и сополимера в дисперсии ν	Гидродинамический радиус наноструктуры R_h , нм	Радиус наноструктуры, $R_{\text{АСМ}}$, нм	Среднеарифметическое отклонение профиля R_a , нм	Среднеквадратичное отклонение профиля R_q , нм
0.01	13	25	1.4	1.9
0.025	16	—	—	—
0.05	20	25 и 80–100	4.8	6.8
0.1	8	25 и 200–400	0.4	0.9

серебра находятся в органической матрице, однако их «погружение» в матрицу весьма неоднородно.

На АСМ-изображениях пленок, отлитых из растворов $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при $\nu = 0.05$ (рис. 5, *a–г*), фиксируются

сферические сферы двух типов: большинство имеют размеры (радиус) до 25 нм, но также присутствуют отдельные наноструктуры диаметром $\sim 80\text{--}100$ нм [соответственно радиусом $\sim 40\text{--}50$ нм (табл. 2)]. Размеры

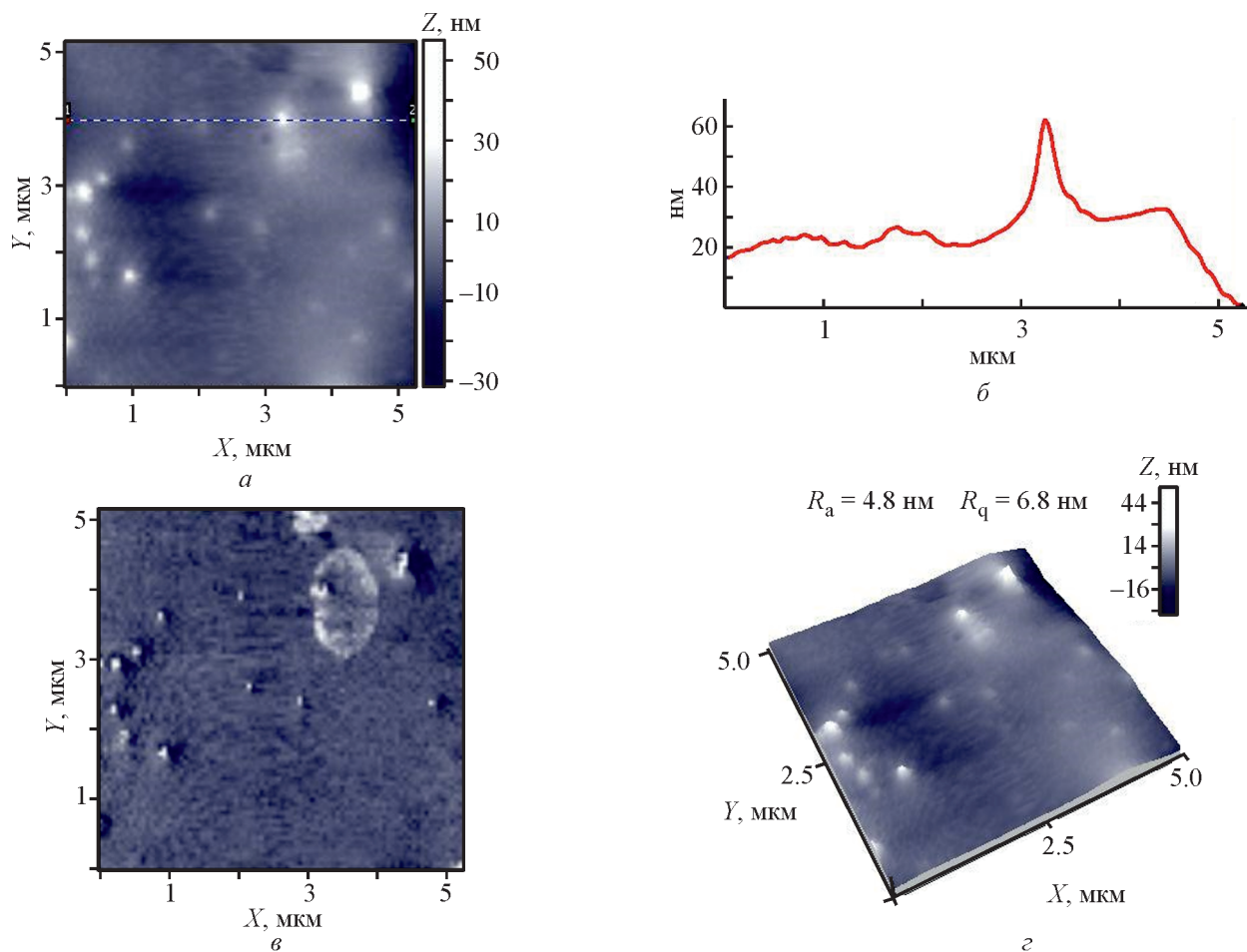


Рис. 5. Изображения поверхности тонкой пленки из дисперсии $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при отношении ν концентраций серебра и сополимера в дисперсии, равном 0.05, полученные методом атомно-силовой микроскопии.

a — топография поверхности, *б* — профиль выделенного участка, *в* — контраст латеральных сил, *г* — 3D-изображение.

меньших наноструктур, оцененные методом АСМ, $R_{АСМ} = 25$ нм (табл. 2), хорошо коррелируют с размерами наноструктур $R_{sp} = 26$ нм, полученными методом динамического светорассеяния. Высота мелких наноструктур над поверхностью подложки ~ 1 – 2 нм, высота более крупных наноструктур над поверхностью подложки приблизительно 10 – 14 нм (рис. 5, *з*). Параметры среднеарифметического R_a и среднеквадратичного R_q отклонений профиля поверхности пленки в этом случае имеют большие величины, чем в предыдущем случае, и составляют: $R_a = 4.8$ нм и $R_q = 6.8$ нм (табл. 2; рис. 5, *з*).

При $v = 0.1$ регистрируются изолированные сферические наноструктуры диаметром ~ 50 нм (соответственно радиусом ~ 25 нм) и высотой над поверхностью подложки около 1 нм (рис. 5, *а–з*; табл. 2), однако отсутствует корреляция размеров наноструктур, определенных методом АСМ, с размерами нано-

структур, определенными методом ДСР (табл. 2). Для наносистемы с максимальным содержанием серебра хорошо визуализируются достаточно крупные образования неправильной формы, для которых характерна заметная разница в коэффициенте трения с полимерной матрицей, из чего можно сделать вывод, что эти образования покрыты стабилизатором не полностью (рис. 6, *в*). По-видимому, при достаточно большой концентрации серебра в растворе сравнительно короткие цепи сополимера не способны эффективно препятствовать агрегации наночастиц. Это предположение подтверждается данными просвечивающей электронной микроскопии. Сформировавшиеся при $v = 0.05$ наночастицы Ag^0 образуют конгломераты неправильной формы размером 50 – 100 нм, частично покрытые тройным сополимером (рис. 7, *а*). С увеличением концентрации серебра в растворе ($v = 0.1$) тенденция к агрегированию наночастиц серебра уси-

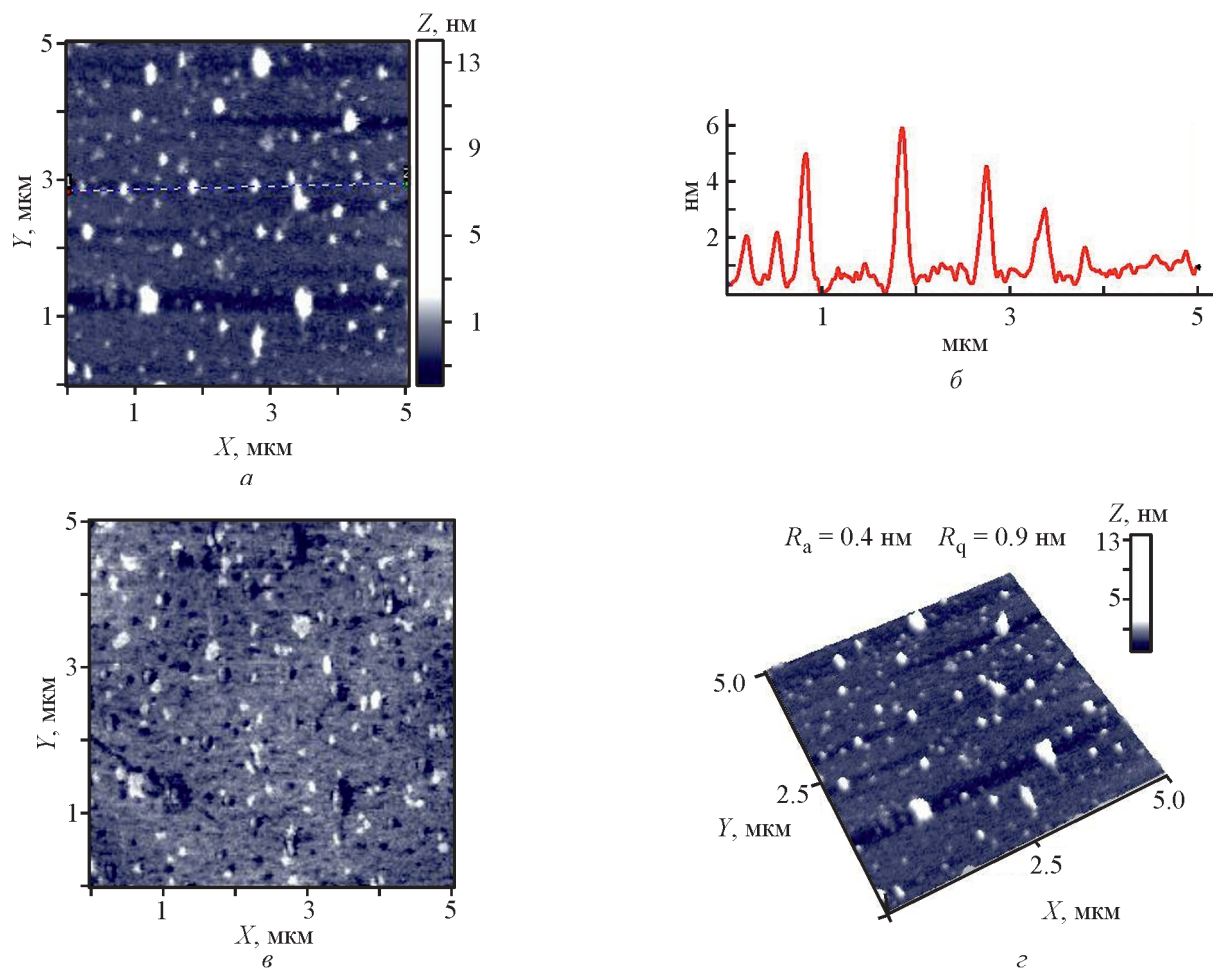


Рис. 6. Изображения поверхности тонкой пленки из дисперсии Ag^0 /ТСП при отношении концентраций серебра и сополимера в дисперсии, равном 0.1 , полученные методом атомно-силовой микроскопии.

а — топография поверхности, *б* — профиль выделенного участка, *в* — контраст латеральных сил, *г* — 3D-изображение.

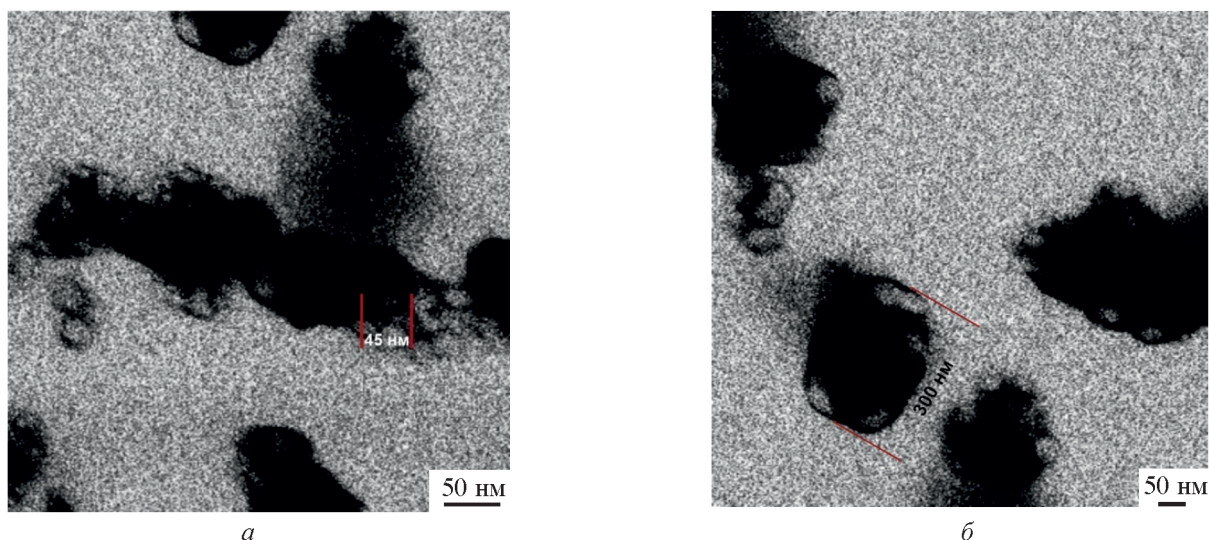


Рис. 7. Микрофотографии дисперсий $\text{Ag}^0/\text{ТСП}$ при отношении концентраций серебра и сополимера в дисперсии, равном 0.05 (а) и 0.1 (б) (данные просвечивающей электронной микроскопии).

ливается, и размеры конгломератов достигают уже 200–400 нм (рис. 7, б).

При микробиологическом тестировании *in vitro* было обнаружено, что образцы, не содержащие серебра (№ 1), и серебрясодержащая дисперсия ($v = 0.05$, $c_{\text{Ag}} = 0.005$ мас%, $c_{\text{ТСП}} = 0.1$ мас%, № 2) не обладают антибактериальной активностью. По-видимому, содержание в образце № 1 хелатообразующих звеньев N-кротил-N-аминосалицилата натрия (1.8 мол%) ниже, чем требуется для проявления антибактериальной активности ТСП, а образец № 2 не содержит достаточного количества серебра. Тем не менее серебрясодержащая дисперсия с большей концентрацией серебра (образец № 3, $v = 0.05$, $c_{\text{Ag}} = 0.01$ мас%, $c_{\text{ТСП}} = 0.2$ мас%) обнаруживает антибактериальную активность в отношении как грамположительных бактерий *S. aureus*, так и грамотрицательных бактерий *E. coli*, причем диаметр задержки роста идентичен.

Выводы

Путем варьирования содержания серебра в серебрясодержащей дисперсии на основе тройного сополимера N-винилпирролидона с N-кротил-N-аминосалицилатом натрия и кротилловым спиртом можно целенаправленно управлять размерами и формой образующихся наноструктур. В частности, восстановление в водном растворе ионов серебра в присутствии указанного сополимера при массовом отношении реагентов v , не превышающим 0.05, позволяет получать стабильные серебрясодержащие дисперсии, состоящие из наноструктур преимущественно сферической формы. Показано, что концен-

трация серебра $c_{\text{Ag}} = 0.01$ мас% в дисперсии является наименьшей концентрацией антибактериального препарата, при которой наблюдается подавление роста микрофлоры.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (грант № 13.1902.21.0011).

Конфликт интересов

Е. Ф. Панарин является заместителем главного редактора Журнала прикладной химии. Остальные авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Информация о вкладе авторов

С. В. Валуева — организация экспериментальной работы, анализ, систематизация и описание результатов экспериментальных исследований серебрясодержащих нанодисперсий на основе тройного сополимера N-винилпирролидона с N-кротил-N-аминосалицилатом натрия и кротилловым спиртом методами атомно-силовой (АСМ) и просвечивающей электронной (ПЭМ) микроскопии, динамического светорассеяния, УФ/видимой спектроскопии; М. Э. Вылегжанина — исследование серебрясодержащих нанодисперсий методом АСМ; Л. Н. Боровикова — синтез серебрясодержащих нанодисперсий и их исследование методом УФ/видимой спектроскопии; К. А. Митусова — исследование

серебросодержащих нанодисперсий методом ПЭМ; Н. А. Нестерова — проведение и описание синтеза ТСП; А. В. Караваева — проведение микробиологического тестирования ТСП и серебросодержащих нанодисперсий на основе ТСП *in vitro*; Е. Ф. Панарин — постановка задачи.

Информация об авторах

Валуева Светлана Валерьевна, к.ф.-м.н., с.н.с.
ИВС РАН,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9446-4233>

Вылегжанина Милана Эрнестовна, н.с. ИВС РАН,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4334-7595>

Митусова Ксения Андреевна, м.н.с. ИВС РАН,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3820-4899>

Боровикова Людмила Николаевна, н.с. ИВС РАН,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1034-6713>

Караваева Анна Владимировна, к.б.н., СПХФУ,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8231-6364>

Нестерова Наталья Александровна, м.н.с. ИВС
РАН, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5459-3513>

Панарин Евгений Федорович, д.х.н., проф., науч-
ный руководитель ИВС РАН,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7005-5838>

Список литературы

- [1] Валуева С. В., Вылегжанина М. Э., Боровикова Л. Н., Назарова О. В., Безрукова М. А., Золотова Ю. И., Панарин Е. Ф. Синтез, морфология и спектральные характеристики медь-, серебро- и селенсодержащих гибридных наносистем на основе сополимера 2-деокси-2-метакриламидо-D-глюкозы с 2-диметил-аминоэтилметакрилатом // ЖФХ. 2020. Т. 94. № 8. С. 1248–1255. <https://doi.org/10.31857/S0044453720080294> [Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Borovikova L. N., Nazarova O. V., Bezrukova M. A., Zolotova Yu. I., Panarin E. F. Synthesis, morphology, and spectral characteristics of copper, silver, and selenium-containing hybrid nanosystems based on 2-deoxy-2-metacrylamido-D-glucose copolymer with 2-dimethylaminoethyl methacrylate // Russ. J. Phys. Chem. Ser. A+. 2020. V. 94. N 8. P. 1663–1670. <https://doi.org/10.1134/S0036024420080294>].
- [2] Tran Q., Nguyen V. Q., Le Anh-Tuan. Silver nanoparticles: Synthesis, properties, toxicology, applications and perspectives // Adv. Natur. Sci.: Nanosci. Nanotech. 2013. V. 4. N 3. P. 1–20. <https://doi.org/10.2147/IJN.S200254>
- [3] Mohammed F. A., Ao Z., Girila M., Chen L., Xiao X., Kalachelvan P. T., Yao X. Inactivation of microbial infectiousness by silver nanoparticles-coated condom: A new approach to inhibit HIV- and HSV-transmitted infection // Int. J. Nanomed. 2012. N 7. P. 5007–5018. <https://doi.org/10.2147/IJN.S34973>
- [4] Пат. РФ 2542280 (опубл. 2015). Способ получения пленок с наноструктурным серебром.
- [5] Валуева С. В., Вылегжанина М. Э., Митусова К. А., Безрукова М. А., Назарова О. В., Золотова Ю. И., Панарин Е. Ф. Структурно-морфологические и спектральные характеристики гибридных биоактивных медь-, селен- и серебросодержащих наносистем на основе поли-4-акрилоилморфолина // Поверхность. Рентген. синхротр. и нейтрон. исслед. 2021. № 2. С. 15–26. <https://doi.org/10.31857/S1028096021020151> [Valueva S. V., Vylegzhanina M. E., Mitusova K. A., Bezrukova M. A., Nazarova O. V., Zolotova Yu. I., Panarin E. F. Structural, morphological, and spectral characteristics of hybrid bioactive copper-, selenium- and silver-containing nanosystems based on poly-4-acryloylmorpholine // J. Surf. Investig.-X-RA. 2021. V. 15. N 1. P. 110–120. <https://doi.org/10.1134/S102745102101033X>].
- [6] Платэ Н. А., Васильев А. Е. Физиологически активные полимеры. Л.: Химия, 1986. С. 12–14.
- [7] Ушаков С. Н., Трухманова Л. Б., Маркелова Т. М., Кропачёв В. А. О сополимеризации кротонного альдегида с винилпирролидоном // Высокомолекуляр. соединения. 1967. Т. 9А. № 5. С. 999–1004.
- [8] Павлов Г. М., Панарин Е. Ф., Корнеева Е. В., Курочкин К. В., Байков В. Е., Ушакова В. Н. Гидродинамические свойства молекул поливинилпирролидона по данным седиментационно-диффузионного анализа и вискозиметрии // Высокомолекуляр. соединения. 1990. Т. 32А. № 6. С. 1190–1196.
- [9] Brown W. Dynamic Light Scattering: The Method and Some Applications. Oxford: Clarendon Press, 1993. P. 305–307.
- [10] Низамов Т. Р., Евстафьев И. В., Оленин А. Ю., Лисичкин Г. В. Формирование моно- и биметаллических зародышевых частиц, содержащих серебро // Коллоид. журн. 2014. Т. 76. № 4. С. 513–517. <https://doi.org/10.7868/S0023291214040120> [Nizamov T. R., Evstaf'ev I. V., Olenin A. Yu., Lisichkin G. V. The formation of mono- and bimetallic silver-containing seed nanoparticles // Colloid J. 2014. V. 76. N 4. P. 471–475. <https://doi.org/10.1134/S1061933X14040127>].
- [11] Moores A., Goettmann F. The plasmon band in noble metal nanoparticles: An introduction to theory and applications // New J. Chem. 2006. V. 30. N 8. P. 1121–1132. <https://doi.org/10.1039/B604038C>