

НАНОРАЗМЕРНЫЕ И НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

УДК 544.77.051.5:544.773.433

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ $\text{SiO}_2@\text{NPs}$ ($\text{NPs} = \text{Ag}, \text{Au}, \text{CdS}$) ИЗ ДЕКАНОВЫХ ОРГАНОГЕЛЕЙ НА ПРЕДМЕТНЫХ СТЕКЛАХ В ПРИСУТСТВИИ АОТ

© 2024 г. Т. Ю. Подлипская^{1,*}, Н. О. Шапаренко¹, А. И. Булавченко¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
“Институт неорганической химии им. А.В. Николаева” Сибирского отделения РАН,
проспект Ак. Лаврентьева, 3, Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: tatyana@niic.nsc.ru

Поступила в редакцию 07.08.2023 г.

После доработки 17.09.2023 г.

Принята к публикации 22.04.2024 г.

В работе продемонстрирована возможность выделения гелей из органоzeлей диоксида кремния высокоскоростным центрифугированием. В качестве окрашивающих добавок использовали органоzeли наночастиц (NPs) Ag, Au и CdS, синтезированные в обратных эмульсиях АОТ. Пористые шероховатые покрытия из гелей формировали методом Doctor Blade с последующей сушкой и термолизом при 500°C. Полученные покрытия перспективны для медико-биологического, фотовольтаического и фотокаталитического применений.

Ключевые слова: органоzeли, органоzeли, диоксид кремния, наночастицы, золото, серебро, сульфид кадмия, АОТ, бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия

DOI: 10.31857/S0044185624010051, EDN: OPBPJA

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в рамках клинического биохимического анализа интенсивно развивается технология “сухой химии” [1, 2]. Она включает в себя фактически твердофазную или гелеобразную пленку реагента-красителя на подложке (например, на предметном стекле) и прибор-анализатор. Несмотря на общепринятый термин “сухая химия”, биохимические реакции происходят в жидкой фазе, т.к. жидкость для реакции составляет сам образец. Применение технологии “сухой химии” актуально в случаях, когда требуется скорость, простота эксплуатации и наличие автономных источников питания (полевые мобильные госпитали, реанимобили, экспресс-лаборатории, сельские лаборатории и вет. клиники). Кроме биохимического анализа поверхностные пленки активно применяются и в гистологическом анализе [3]; в этом случае важно надежно зафиксировать биологический образец на предметном стекле. Клеточные мембраны в изотонических растворах обычно заряжены отрицательно; поэтому поверхностное покрытие на предметном стекле должно быть

заряжено положительно (так называемые “адгезионные” покрытия [4]). Кроме заряда в случаях и биохимического и гистологического анализов важна смачиваемость подложки биологическими жидкостями. Смачиваемость, в свою очередь, определяется химическим составом, шероховатостью и наличием пор [5, 6].

Помимо медицины пористые поверхностные пленки с адсорбированными красителями активно используются в фотогальванических преобразователях солнечной энергии (ячейки Гретцеля [7]). Фотокаталитические устройства на их основе также перспективны для электрохимического выделения водорода из воды [8]. Для усиления действия природных и синтетических красителей в пленки дополнительно вводятся самые разнообразные наночастицы [9]. Чаще всего это наночастицы серебра и золота, обладающие четко выраженным поверхностным плазмонным резонансным поглощением [10]. Локальные усиления электромагнитных полей в их присутствии способствуют значительному увеличению чувствительности самых разнообразных аналитических методик [11, 12].

В отличие от физических способов нанесения покрытий, таких как плазменные, магнетронные и др. [13, 14], осаждение из золей и гелей предварительно синтезированных наночастиц не требует дорогостоящих установок, отличается простотой, гибкостью и возможностью комбинирования самых необычных смесевых сочетаний наночастиц, в том числе для формирования на поверхности микрогальванических пар (металл–металл), кислород-генерирующих (металл–оксид), фотоактивных (сульфид–оксид) и др. [15]. Кроме того, дает возможность формировать на одной подложке несколько зон покрытий с различными свойствами. Исходные стабильные золи наночастиц могут быть синтезированы в прямых и обратных микроэмульсиях, стабилизированных различными поверхностно-активными веществами (ПАВ) [16]. В наших работах разработан новый эмульсионный метод синтеза стабильных золей наночастиц Ag [17, 18], Au [19, 20] и SiO₂ [21]. Метод сохраняет преимущества микроэмульсионного синтеза, значительно превосходя его по производительности [17].

Цель представленной работы заключалась в разработке методик выделения гелей на основе диоксида кремния из исходных органонозелей высокоскоростным центрифугированием и получении из них покрытий на предметных стеклах. В качестве добавок использовали органонозоли наночастиц Ag, Au и CdS, синтезированные в обратных эмульсиях АОТ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Реагенты

В работе использовали порошок диоксида кремния, полученный испарением кварца релятивистским пучком электронов в лаборатории профессора Бардаханова С.П. [22], *n*-декан (99%), бис(2-этилгексил)сульфосукцинат натрия (АОТ, 97%, Sigma-Aldrich). Для приготовления водных растворов применяли дистиллированную воду, нитрат серебра (99.9%), сульфат натрия (99.5%), хлорид кадмия (CdCl₂·2.5H₂O; 99.7%), сульфид натрия (Na₂S·22H₂O; 97%), моногидрат гидразина (99%). Раствор H₂AuCl₄ (0.274 М в 3М HCl) был приготовлен из золотой проволоки (99.9 %).

Методики получения и характеристики органонозелей и гелей

Эмульсионный синтез наночастиц серебра, золота и сульфида кадмия проводили в обратных эмульсиях АОТ в *n*-декане (методики их синтеза детально описаны в работах [17–20]). Отметим, что эмульсионный способ дает возможность получить стабильные органонозоли прямым синтезом (без выделения и последующего ультразвукового редиспергирования порошка) только для органонозелей наночастиц серебра и золота. В случае CdS в процессе эмульсионного синтеза частицы выделяются в виде ультрадисперсного порошка уже при смешении исходных реагентов, поэтому органонозоли CdS получали ультразвуковым диспергированием выделившихся агрегатов и агломератов в растворах АОТ в *n*-декане.

Органонозоли SiO₂, а также смешанные органонозоли SiO₂@NPs (NPs = Ag, Au и CdS) получали на основе ультрадисперсного порошка SiO₂, синтезированного в лаборатории профессора Бардаханова С.П., ультразвуковым диспергированием в чистом *n*-декане, в растворах АОТ в *n*-декане или в органонозолях соответствующих наночастиц.

Для всех систем ультразвуковую обработку проводили в течение 20 мин в ванне УЗВ-9/100-МП-РЭЛТЕК (Россия, частоты 22 и 44 кГц, акустическая мощность 190 Вт). Гели из полученных органонозелей выделяли высокоскоростным центрифугированием при 15 000 об/мин (15 520 g) в течение 30 мин в центрифуге ПЭ-6926 (“Экрос”, Россия).

Наночастицы в полученных органонозолях характеризовали методами фотон-корреляционной спектроскопии (ФКС, определение эффективного гидродинамического диаметра) и спектрофотометрии (определение концентрации наночастиц). Для каждой системы проводили по 30 измерений; в таблицах приведены средние значения. Методики и оборудование ФКС детально описаны в наших работах [23, 24]. Электронные спектры поглощения органонозелей регистрировали на спектрофотометре UV-1700 (Shimadzu, Япония) в кварцевых кюветах толщиной 1 см. Для получения изображений частиц в высушенных золях использовали просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ, микроскоп JEM 2010, JEOL, Japan).

Методики получения и характеристики пленок

Для формирования пленок гели наносили на стеклянные подложки методом Doctor Blade,

сушили при 50–60°C в течение 1 часа. Затем пленки подвергались термической обработке для удаления АОТ, присутствие которого в гелях необходимо для обеспечения адгезии частиц к подложке и формирования пористого слоя. Термолиз пленок осуществлялся по следующей программе: нагрев от комнатной температуры до 500°C в течение 1 часа; выдерживание при заданной температуре в течение 2 часов; медленное охлаждение в закрытой муфельной печи L03-15/12 (LAC Ltd., Чехия) до комнатной температуры (около 15 часов).

Краевые углы смачивания на пленках измеряли на приборе OCA 15 PRO (DataPhysics, Германия) в режиме сидячей капли.

Исследование шероховатости образцов проводили на атомно-силовом микроскопе Ntegra Prima II (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме. Для работы использовали зонд NSG01. Длина зонда 125 мкм, ширина 25 мкм, толщина 2.0 мкм, силовая константа 5.1 Н/м, резонансная частота 150 кГц, угол раствора конуса зонда 40°, радиус закругления зонда ≤ 10 нм, форма зонда четырехгранная, последние 500 нм от вершины наконечника имеют коническую форму. 2D-шероховатость определяли по горизонтали (ось X) и вертикали (ось Y). Профиль шероховатости брался по сечению сканируемого участка. Расчет параметров шероховатости проводили с помощью программного обеспечения Nova SPM согласно стандарту ISO 4287-1 (параметры ГОСТ 25142–82) [25].

Для описания 2D-шероховатости использовали следующие параметры:

R_a – средняя арифметическая шероховатость (arithmetical mean deviation of profile):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l Z(x) dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Z_i(x)|$$

R_q – средняя квадратичная шероховатость (root-mean-square deviation of profile):

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x) dx}$$

R_z – высота неровностей по 10 точкам (ten-point height of irregularities). Шероховатость поверхности по выбранным десяти максимальным высотам и впадинам, т.е. среднее абсолютное значение пяти самых высоких пиков и пяти самых глубоких впадин:

$$R_z = \left(\sum_{i=1}^5 |H_{i \max}| + \sum_{i=1}^5 |H_{i \min}| \right) / 5$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Свойства исходных органонозелей

Спектры поглощения исходных *n*-декановых органонозелей приведены на рис. 1. Они аналогичны спектрам плазмонного (Ag и Au) и экситонного (CdS) поглощения наночастиц, широко представленных в литературе [26, 27].

ПЭМ изображения некоторых полученных частиц приведены на рис. 2, а эффективные гидродинамические диаметры – в табл. 1. Отметим, что размер частиц (CdS , SiO_2), полученных ультразвуковым диспергированием, на порядок и более превышает размер частиц металлов (Ag, Au), полученных прямым синтезом.

После характеристики органонозелей проведено их тестирование на предмет возможности формирования из них гелей. Известно, что одно из условий перехода золь $\rightarrow$ гель заключается в резком увеличении численной концентрации частиц [28]. Для концентрирования мы использовали два способа: неводный электрофорез (для частиц, проявивших электрофоретическую подвижность [29]) и высокоскоростное центрифугирование.

Высокоскоростное концентрирование *n*-декановых органонозелей наночастиц серебра и золота (табл. 1, системы № 1 и 2) не приводило к

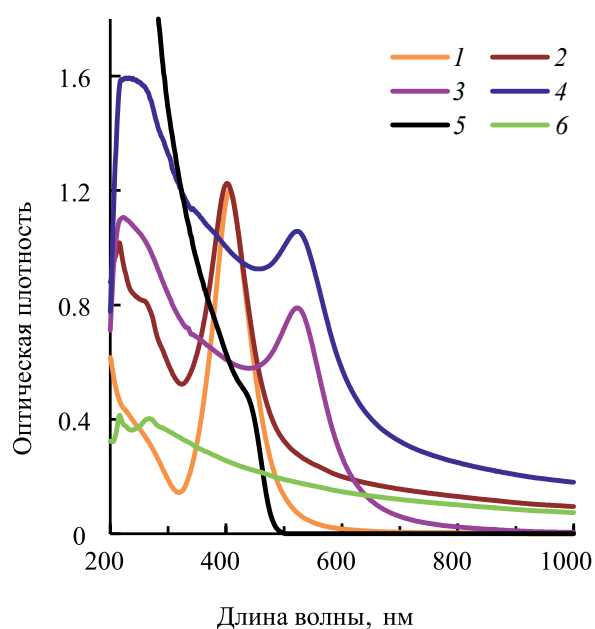


Рис. 1. Спектры поглощения *n*-декановых органонозелей наночастиц: 1 – Ag, 2 – $\text{SiO}_2\text{@Ag}$, 3 – Au, 4 – $\text{SiO}_2\text{@Au}$, 5 – CdS в 0.25 М АОТ, 6 – SiO_2 (10 мг/мл).

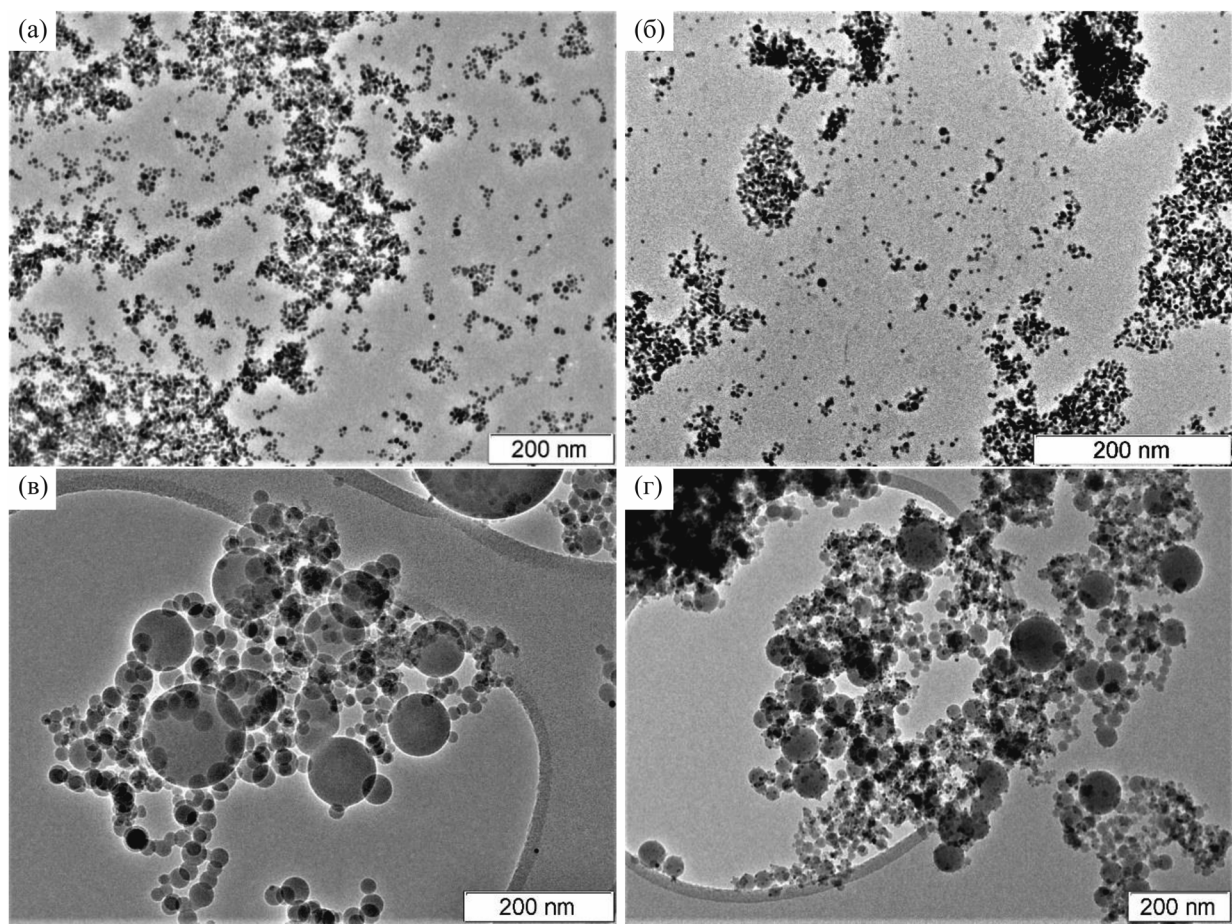


Рис. 2. ПЭМ изображения наночастиц серебра (а), золота (б), диоксида кремния (в) и диоксида кремния с адсорбированными наночастицами серебра (г).

Таблица 1. Характеризация частиц в органозолях и вид концентрата при высокоскоростном препаративном центрифугировании.

№	NPs	Свойства наночастиц в органозоле			Вид выделившегося концентрата
		d_n , нм (ПЭМ)	d_{hm} , нм (ФКС)	λ_{max} , нм	
1.	Ag	6.2	11.5	406	—
2.	Au	6.7	13.5	523	—
3.	CdS	—	95	460 (плечо)	порошок
4.	SiO ₂	30	164	216, 262	гель
5.	SiO ₂ @Ag	30	—	216, 260, 401	гель
6.	SiO ₂ @Au	30	—	520	гель
7.	SiO ₂ @CdS	30	—	460 (плечо)	гель

выделению концентратов наночастиц, по-видимому, это связано с их маленькими размерами (по ПЭМ и ФКС). Редиспергированный CdS из органоэолей концентрировался в виде порошка (табл. 1, система № 3). Образование гелевых фаз было обнаружено только для эолей, содержащих SiO_2 (табл. 1, системы № 4–7), причем диоксид кремния полностью переходил в гелевую фазу, а выделение наночастиц металлов и сульфида кадмия зависело от концентрации АОТ в органоэоле. Отметим, что электрофоретическое концентрирование не приводило к образованию гелей.

Таким образом, установлено, что диоксид кремния, полученный испарением кварца релятивистским пучком электронов, может быть использован в качестве структурообразующей основы для формирования бесцветных или окрашенных *n*-декановых органоэелей с помощью высокоскоростного центрифугирования.

Органоэели SiO_2

Рассмотрим более подробно условия формирования гелей в зависимости от концентраций диоксида кремния и АОТ в исходных *n*-декановых органоэолях.

На рис. 3 представлены зависимости объема выделившегося органоэеля SiO_2 . Было показано, что гели SiO_2 образуются в интервале кон-

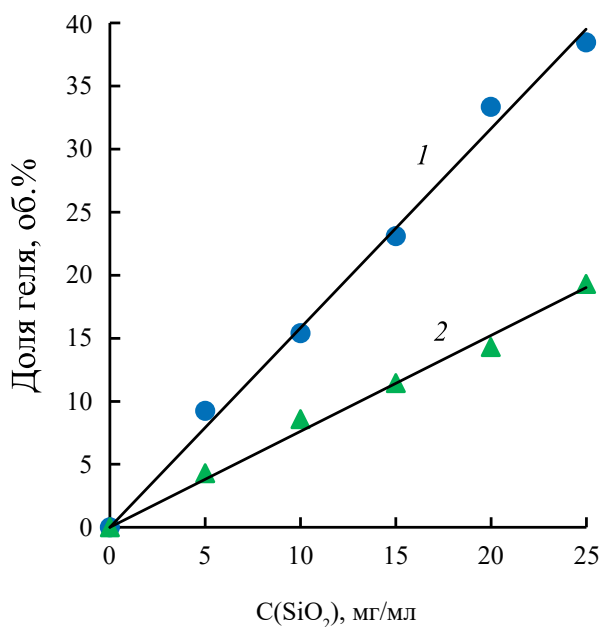


Рис. 3. Объемная доля геля, выделившегося в центрифугате при высокоскоростном центрифугировании, в зависимости от концентрации диоксида кремния в *n*-декановых органоэолях состава: 1 — SiO_2 , 2 — $\text{SiO}_2 + 0.25$ М АОТ.

центраций от 5 до 25 мг/мл. Чем выше концентрация частиц SiO_2 в органоэоле, тем больший объем геля получался. Так, в исследуемом диапазоне концентраций объемная доля геля увеличивалась от 9 до 39 об. % для *n*-декановых органоэолей. Кроме того, гели диоксида кремния формируются и в растворах АОТ в *n*-декане. Однако при добавлении 0.25 М АОТ в органоэоли во всем диапазоне исследуемых концентраций SiO_2 объемная доля геля уменьшалась примерно в два раза.

Спектры поглощения органоэолей диоксида кремния в зависимости от его концентрации приведены на рис. 4. Полосы поглощения в области 200–300 нм (рис. 4а) характерны для наноразмерного диоксида кремния [30] и обусловлены дефектами (кислородными или кремневыми вакансиями) в тетраэдрической сетке Si-O-Si на поверхности частиц [31]. В этой области SiO_2 в *n*-декановых органоэолях показывает два пика (216 и 262 нм), которые не проявляются в присутствии АОТ (рис. 4б). Последнее может быть связано с адсорбцией молекул АОТ на частицах диоксида кремния [26], или, возможно, обе полосы, а не только 216 нм, закрываются интенсивным поглощением самих молекул АОТ в УФ-области (ниже 245 нм). Зависимости оптической плотности от концентрации диоксида кремния линейны (рис. 4в) как для *n*-декановых органоэолей, так и в присутствии 0.25 М АОТ.

Добавление АОТ к исходным эолям SiO_2 обусловлено следующими причинами. Во-первых, предварительными экспериментами было показано, что покрытия из гелей, не содержащих ПАВ, имеют слабую адгезию к стеклянным подложкам и незначительную боковую когезию. Во-вторых, порошок сульфида кадмия диспергировался в *n*-декане только в присутствии АОТ.

Органоэели $\text{SiO}_2\text{@NPs}$ ($\text{NPs} = \text{Ag}, \text{Au}$ и CdS)

Далее были получены смешанные “цветные” гели, содержащие кроме SiO_2 и АОТ наночастицы Ag, Au и CdS. Для их приготовления смешивали исходные органоэоли, смесь затем подвергали высокоскоростному центрифугированию.

При одинаковой исходной концентрации наночастиц серебра в *n*-декане чем выше концентрация SiO_2 , тем больший объем гелевой фазы формируется, но тем менее интенсивной становится окраска геля (рис. 5а).

Установлено, что АОТ оказывает влияние не только на формирование гелей SiO_2 , но и на пе-

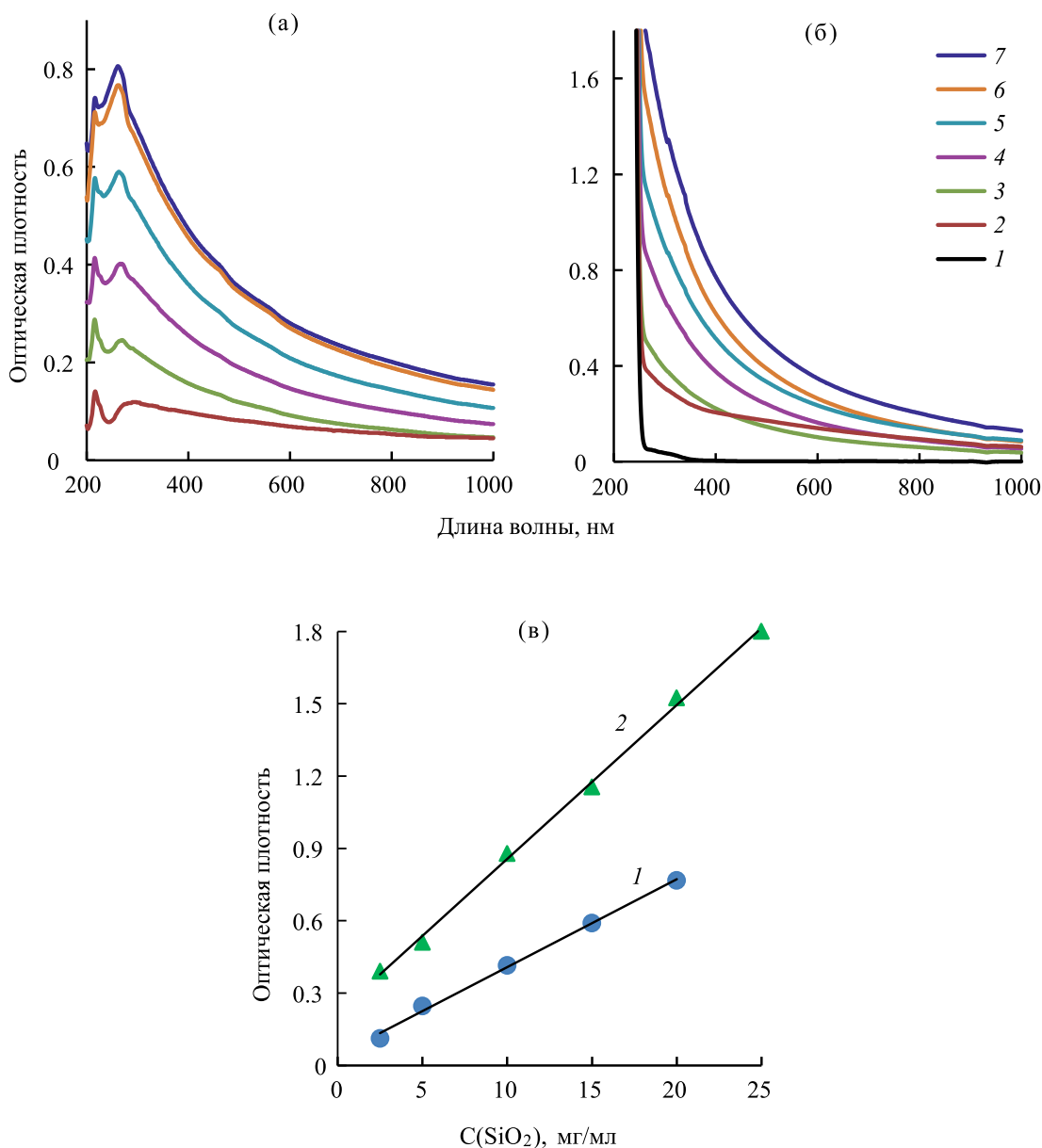


Рис. 4. Спектры поглощения n -декановых органоэолой состава: (а) SiO_2 и (б) $\text{SiO}_2 + 0.25$ М АОТ. Концентрация SiO_2 в органоэолях: 1 – 0, 2 – 2.5, 3 – 5, 4 – 10, 5 – 15, 6 – 20, 7 – 25 мг/мл. Оптическая плотность (в) на длине волны 262 нм в зависимости от концентрации SiO_2 : 1 – SiO_2 , 2 – $\text{SiO}_2 + 0.25$ М АОТ.

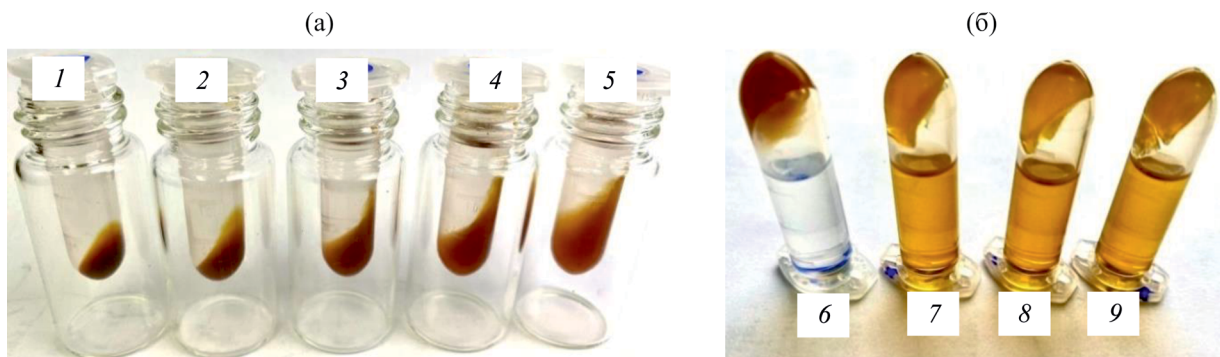


Рис. 5. Фото гелей $\text{SiO}_2@\text{Ag}$ в зависимости от концентрации SiO_2 (а) и АОТ (б) в исходных n -декановых органоэолях. Состав органоэолой: 1 – 5, 2 – 10, 3 – 15, 4 – 20, 5 – 25 мг/мл SiO_2 ; 6 – 0, 7 – 0.05, 8 – 0.15, 9 – 0.25 М АОТ.

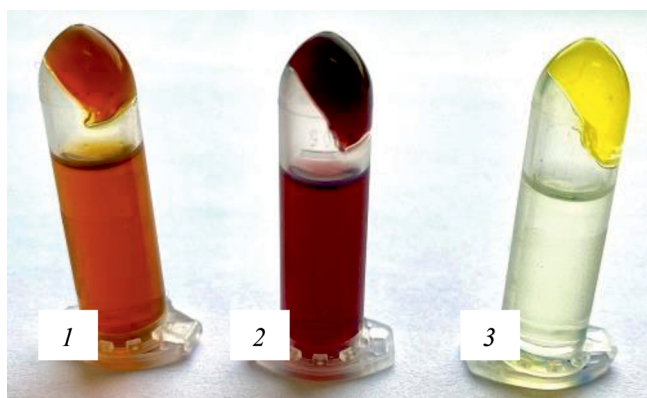


Рис. 6. Фото цветных гелей $\text{SiO}_2\text{@NPs}$: 1 – $\text{SiO}_2\text{@Ag}$, 2 – $\text{SiO}_2\text{@Au}$, 3 – $\text{SiO}_2\text{@CdS}$. Концентрации SiO_2 и АОТ в исходных органозолях: 10 мг/мл SiO_2 и 0.25 М АОТ.

реход наночастиц в гели. Так, наночастицы Ag из органозолей в *n*-декане практически полностью (на 99%) переходят в гели SiO_2 в отсутствие АОТ; такая высокая степень извлечения обусловлена адсорбцией наночастиц серебра на поверхности наночастиц SiO_2 (рис. 2г). При добавлении АОТ (0.05–0.25 М) в органозоли $\text{SiO}_2\text{@Ag}$ постоянного состава (10 мг/мл SiO_2 , $1.4 \cdot 10^{-4}$ М Ag) степень извлечения серебра резко падает до 5–10% (рис. 5б), что, по-видимому, объясняется более предпочтительной адсорбцией молекул АОТ на поверхности наночастиц SiO_2 [26] и их более высокой (на 2–3 порядка) концентрацией по сравнению с наночастицами серебра. Значительное увеличение концентрации Ag в органозолях в присутствии АОТ также не приводит к заметному увеличению содержания наночастиц в гелях.

При образовании гелей $\text{SiO}_2\text{@Au}$ имеют место такие же закономерности, как и для гелей $\text{SiO}_2\text{@Ag}$, в то время как гели $\text{SiO}_2\text{@CdS}$ формировались только в присутствии АОТ (0.05–0.25 М); к тому же частицы CdS полностью переходили в гель, по-видимому, благодаря своему размеру (табл. 1). Фотографии гелей $\text{SiO}_2\text{@NPs}$ приведены на рис. 6. В зависимости от концентрации наноча-

стиц окраска гелей может изменяться от желтой до темно-коричневой в случае наночастиц серебра и от розовой до бордовой для золота.

Таким образом, подобраны условия образования гелей SiO_2 , содержащих наночастицы Ag, Au и CdS. Далее гели были использованы для формирования покрытий на предметных стеклах.

Формирование и характеристика покрытий

Для формирования пленок гели, полученные из органозолей с постоянным составом по SiO_2 и АОТ (10 мг/мл SiO_2 и 0.25 М АОТ), наносили на стеклянные подложки методом Doctor Blade, сушили (50–60°C) и прокаливали (500°C). Отметим, что термолит высушенных пленок при температурах ниже 500°C приводил к образованию более “мягких” пленок, не подходящих для исследования методом АСМ из-за размазывания кантилевером поверхности образцов.

На рис. 7 представлены изображения высушенных гелевых пленок до и после термолита. После прокаливания пленки становились более прозрачными, при этом интенсивность их окраски немного уменьшилась для $\text{SiO}_2\text{@Au}$ и $\text{SiO}_2\text{@Ag}$, а в случае $\text{SiO}_2\text{@CdS}$ пленки визуально стали похожи на пленки SiO_2 .

После термолита приготовленные пленки исследовали методами краевых углов смачивания и атомно-силовой микроскопии (АСМ). Краевые углы у всех исследованных пленок были равны нулю, капли воды растекались по поверхности образцов, что свидетельствует о полной смачиваемости и супергидрофильности пленок. Известно, что шероховатость поверхности способствует улучшению смачиваемости пленок (при условии, что краевой угол смачивания гладких пленок из того же материала был меньше 90°) [32]. Результаты исследования шероховатости пленок методом АСМ приведены на рис. 8. Из представленных данных следует, что на пред-

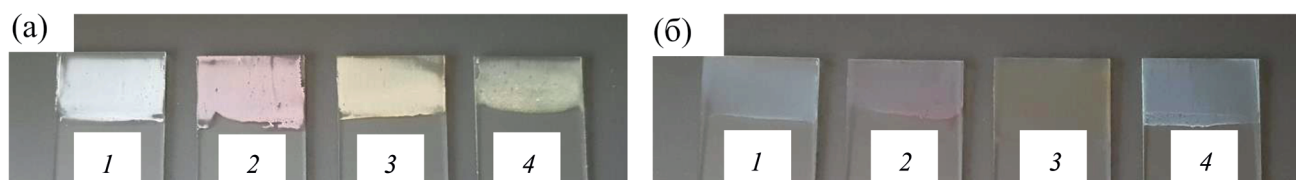


Рис. 7. Фото высушенных гелевых пленок до (а) и после (б) термолита (500°C, 2 часа). Пленки получены нанесением гелей: 1 – SiO_2 , 2 – $\text{SiO}_2\text{@Ag}$, 3 – $\text{SiO}_2\text{@Au}$, 4 – $\text{SiO}_2\text{@CdS}$.

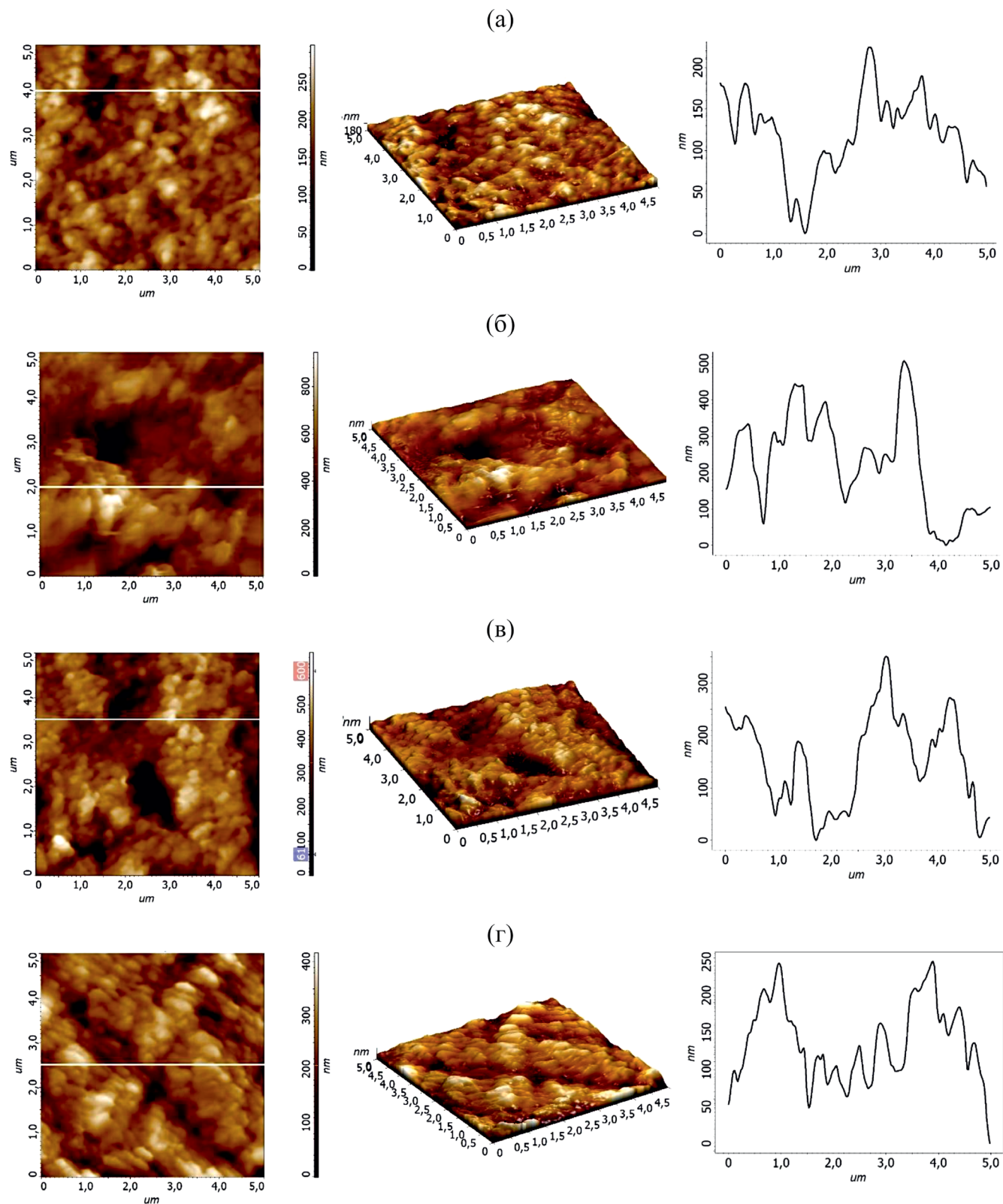


Рис. 8. 2D и 3D АСМ изображения и профили рельефа (по белым линиям на 2D) гелевых пленок после прокаливании при 500°C: (а) SiO_2 , (б) $\text{SiO}_2@\text{Ag}$, (в) $\text{SiO}_2@\text{Au}$, (г) $\text{SiO}_2@\text{CdS}$.

Таблица 2. Параметры шероховатости пленок ($n = 10$, $P = 0.95$)

№	Образец	R_a (нм)	R_q (нм)	R_z (нм)
1.	SiO_2	33 ± 3	41 ± 5	320 ± 22
2.	$\text{SiO}_2\text{@Ag}$	97 ± 9	124 ± 12	780 ± 50
3.	$\text{SiO}_2\text{@Au}$	70 ± 7	90 ± 9	650 ± 40
4.	$\text{SiO}_2\text{@CdS}$	63 ± 8	80 ± 7	620 ± 45

метных стеклах формируются пористые шероховатые пленки из гелей диоксида кремния, причем шероховатость пленок с добавлением наночастиц (Ag, Au, CdS) имеет более высокие значения (табл. 2) по сравнению с пленками без добавления наночастиц. Наибольшее значение шероховатости получено для системы $\text{SiO}_2\text{@Ag}$: среднеарифметическая шероховатость составила 97 нм, а среднеквадратичная – 124 нм.

Отметим, что нам не удалось получить однородные пленки с равномерным распределением наночастиц непосредственно из исходных n -декановых органоzeлей состава $\text{SiO}_2\text{@Ag} + \text{АОТ}$. Кроме того, попытки увеличения гидрофильности различных поверхностей с помощью zeлей наночастиц диоксида кремния обычно приводят к более скромным результатам увеличения гидрофильности пленок. Например, модифицирование поверхности ПВХ пленок гидрозольми диоксида кремния с предварительной активацией в коронном разряде способствовало уменьшению краевого угла смачивания от 88° до 48° [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе методом скоростного центрифугирования из n -декановых органоzeлей выделены органоzeли на основе частиц SiO_2 . Показана возможность формирования из них супергидрофильных шероховатых покрытий, содержащих наночастицы Ag, Au и CdS. В дальнейшем мы планируем сорбировать на них красители различного типа для медико-биологического, фотовольтаического и фотокаталитического приложений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-03-00017) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 121031700315-2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mao X., Mao D., Jiang J. et al. // Lab. Chip. 2021. V. 21. P. 154.
2. Liang Y., Xue K., Shi Y. et al. // Anal. Chem. 2023. V. 95. P. 3434.
3. Grande Tovar C.D., Castro J.I., Valencia Llano C.H. et al. // Molecules. 2020. V. 25. P. 1688.
4. Park S., Lee C., Lee J. et al. // Biotechnol. Bioproc. E. 2020. V. 25. P. 646.
5. Jothi Prakash C.G., Prasanth R. // J. Mater. Sci. 2021. V. 56. P. 108.
6. Darmanin T., Guittard F. // Prog. Polym. Sci. 2014. V. 39. P. 656.
7. Kokkonen M., Talebi P., Zhou J. et al. // J. Mater. Chem. A. 2021. V. 9. P. 10527.
8. Yao B., Zhang J., Fan X. et al. // Small. 2019. V. 15. 1803746.
9. Kumar D.K., Kříž J., Bennett N. et al. // Mater. Sci. Energy Technol. 2020. V. 3. P. 472.
10. Popov O., Zilbershtein A., Davidov D. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. 191116.
11. Huang K.J., Zhang J.Z., Liu Y.J. et al. // Sens. Actuators B: Chem. 2014. V. 194. P. 303.
12. Miao Z., Wang P., Zhong A. et al. // J. Electroanal. Chem. 2015. V. 756. P. 153.
13. Fattah-alhosseini A., Molaei M., Babaei K. // Surf. Interfaces. 2020 V. 21. P. 100659.
14. Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Цыркoв Р.А. и др. // Вестник машиностроения. 2023. Т. 102. № 1. С. 65.
15. Parashar M., Shukla, V.K., Singh R. // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2020. V. 31. P. 3729.
16. Eastoe J., Hollamby M.J., Hudson L. // Adv. Colloid Interface Sci. 2006. V. 128. P. 5.
17. Bulavchenko A.I., Arymbaeva A.T., Demidova M.G. et al. // Langmuir. 2018. V. 34. P. 2815.
18. Поповецкий П.С., Арымбаева А.Т., Борзиловский Д.С. и др. // Коллоидн. журн. 2019. Т. 81. № 4. С. 501.

19. *Podlipskaya T. Yu., Shaparenko N.O., Demidova M.G. et al.* // Colloids Surf. A. 2022. V. 649. P. 129452.
20. *Шапаренко Н.О., Арымбаева А.Т., Демидова М.Г. и др.* // Коллоидн. журн. 2019. Т. 81. № 4. С. 532.
21. *Shaparenko N.O., Demidova M.G., Erlygina L.A. et al.* // Colloids Surf. A Physicochem. Eng. Asp. 2023. V. 669. P. 131505.
22. *Bardakhanov S.P., Korchagin A.I., Kuksanov N.K. et al.* // Mater. Sci. Eng. B. 2006. V. 132. P. 204.
23. *Shaparenko N.O., Kompan'kov N.B., Demidova M.G. et al.* // Electrophoresis. 2020. V. 41. № 18–19. P. 1592.
24. *Shaparenko N.O., Demidova M.G., Bulavchenko A.I.* // Electrophoresis. 2021. V. 42. № 16. P. 1648.
25. ГОСТ 25142–82. Межгосударственный стандарт “Шероховатость поверхности: Термины и определения”. М.: Стандартинформ, 2018.
26. *Демидова М.Г., Булавченко А.И., Подлипская Т.Ю. и др.* // Коллоидн. журн. 2016. Т. 78. № 2. С. 139.
27. *Булавченко А.И., Сапьяник А.А. Демидова М.Г.* // Журн. физ. химии. 2014. Т. 88. № 3. С. 502.
28. *Danks A.E., Hall S.R., Schnepf Z.* // Mater. Horiz. 2016. V. 3. P. 91.
29. *Bulavchenko A.I., Pletnev D.N.* // J. Phys. Chem. C. 2008. V. 112. № 42. P. 16365.
30. *Qasim M., Ananthaiah J., Dhara S. et al.* // Adv. Sci. Eng. Med. 2014. V. 6. № 9. P. 965.
31. *Rahman I.A., Vejayakumaran P., Sipaut C.S. et al.* // Mater. Chem. Phys. 2009. V. 114. P. 328.
32. *Бойнович Л.Б., Емельяненко А.М.* // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 7. С. 619.
33. *Жуков Г.В., Колерт К., Малыгин А.А.* // Известия СПбГТИ (ТУ). 2010. № 8. С. 37.