



Научно-исследовательский журнал «**Chemical Bulletin**»

<https://cb-journal.ru>

2026, Том 9, № 2 / 2026, Vol. 9, Iss. 2 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 544.7; 546.57

DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-2

Поверхностная модификация порошков кремнезема и диоксида титана нано- и микрочастицами серебра термическим методом

¹ Яковлев Д.Д.,

¹ Ерасов В.С.*,

¹ *Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова,
МИРЭА – Российский технологический университет,*

* Ответственный автор E-mail: Vadim.ersv@yandex.ru

Аннотация: цели: модифицировать порошки кремнезема, синтезированного золь-гель методом, и коммерческого диоксида титана частицами серебра путём термического разложения нитрата серебра в оксидных матрицах. Провести сравнительное исследование морфологии и распределения серебра на различных носителях с точки зрения их возможного применения в фотокатализе и в качестве функциональных абразивных наполнителей зубных паст. Определить наноструктуру и удельную поверхность кремнезёма и оценить влияние пористой структуры носителя на дисперсность серебряной фазы.

Методы. Для получения кремнезема использован золь-гель синтез на основе тетраэтоксисилана. Модификация диоксида титана и кремнезема серебром проводилась пропиткой раствором нитрата серебра с последующим термическим разложением соли при 700 °С. Морфология и распределение серебра исследованы методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного элементного анализа с картированием. Наноструктура и пористость кремнезема охарактеризованы методом титрования по Сирсу и адсорбцией метиленового синего с расчётом констант уравнения Ленгмюра и удельной поверхности.

Результаты. Показано, что коммерческий диоксид титана представляет собой грубодисперсные частицы (средний диаметр 35 мкм), тогда как синтезированный золь-гель кремнезём имеет форму микросфер со средним диаметром около 1,4 мкм и состоит из первичных наночастиц размером ~3,7 нм. По данным адсорбции метиленового синего удельная поверхность кремнезема составляет около 10 м²/г, что соответствует мезопористой структуре. Установлено, что при модификации диоксида титана серебром на его поверхности формируются субмикронные и микронные частицы серебра (до ~2 мкм), тогда как на мезопористом кремнезёме образуется более высокодисперсная серебряная фаза, не разрешаемая по размеру в режиме СЭМ, но равномерно распределённая по поверхности по данным EDS-картирования.

Выводы. Морфология серебряной фазы существенно зависит от типа и структуры оксидного носителя. Мезопористый наноструктурированный кремнезём способствует формированию более высокодисперсных (наноразмерных) и равномерно распределённых частиц серебра по сравнению с коммерческим диоксидом титана, на поверхности которого преобладают субмикронные и микронные серебряные включения. Полученные данные могут быть использованы при оптимизации фотокаталитических и антибактериальных свойств серебряносодержащих композитов, а также при подборе состава абразивных наполнителей на основе SiO₂@Ag и TiO₂@Ag для зубных паст и других средств гигиены полости рта.

Ключевые слова: коллоидная химия, наночастицы, золь-гель технология, кремнезем, диоксид титана, серебро

Для цитирования: Яковлев Д.Д., Ерасов В.С. Поверхностная модификация порошков кремнезема и диоксида титана нано- и микрочастицами серебра термическим методом // Chemical Bulletin. 2026. Том 9. № 2. 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-2

Поступила в редакцию: 17 ноября 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 19 февраля 2026 г.; Принята к публикации: 23 апреля 2026 г.

Surface modification of silica and titanium dioxide powders with silver nano- and microparticles by a thermal method

¹Yakovlev D.D.,

¹Erasov V.S.*,

¹Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies,
MIREA – Russian Technological University,

* Corresponding author E-mail: Vadim.ersv@yandex.ru

Abstract: objectives: to modify silica powder synthesized by the sol–gel method and commercial titanium dioxide with silver particles via thermal decomposition of silver nitrate within oxide matrices. To carry out a comparative study of the morphology and distribution of silver on different supports in terms of their potential application in photocatalysis and as functional abrasive fillers in toothpastes. To determine the nanostructure and specific surface area of silica and to assess the influence of the porous structure of the support on the dispersion of the silver phase.

Methods. Silica was obtained by sol–gel synthesis based on tetraethoxysilane. Modification of titanium dioxide and silica with silver was performed by impregnation with a silver nitrate solution followed by thermal decomposition of the salt at 700 °C. The morphology and distribution of silver were investigated by scanning electron microscopy and energy-dispersive elemental analysis with mapping. The nanostructure and porosity of silica were characterized by Sears titration and methylene blue adsorption with calculation of Langmuir equation constants and specific surface area.

Results. It was shown that commercial titanium dioxide consists of coarse particles (medium size 35,4 μm), whereas the sol–gel synthesized silica has the form of microspheres with medium size 1,4 μm and is composed of primary nanoparticles of about ~3.7 nm. According to methylene blue adsorption data, the specific surface area of silica is about 10 m²/g, which corresponds to a mesoporous structure. It was found that, upon modification of titanium dioxide with silver, submicron and micron-sized silver particles (up to ~2 μm) are formed on its surface, whereas on mesoporous silica a more highly dispersed silver phase is produced, which is not size-resolvable in SEM mode but is uniformly distributed over the surface according to EDS mapping data.

Conclusions. The morphology of the silver phase strongly depends on the type and structure of the oxide support. Mesoporous nanostructured silica promotes the formation of more highly dispersed (nanosized) and uniformly distributed silver particles compared to commercial titanium dioxide, on the surface of which submicron and micron silver inclusions prevail. The obtained data can be used to optimize the photocatalytic and antibacterial properties of silver-containing composites, as well as to select the composition of abrasive fillers based on SiO₂@Ag and TiO₂@Ag for toothpastes and other oral hygiene products.

Keywords: colloid chemistry, nanoparticles, sol–gel technology, silica, titanium dioxide, silver

For citation: Yakovlev D.D., Erasov V.S. Surface modification of silica and titanium dioxide powders with silver nano- and microparticles by a thermal method. Chemical Bulletin. 2026. 9 (2). 2. DOI: 10.58224/2619-0575-2026-9-2-2

The article was submitted: November 17, 2025; Approved after reviewing: February 19, 2026; Accepted for publication: April 23, 2026.

Введение

Фотокаталитические процессы на основе металлических и полупроводниковых наночастиц привлекают значительное внимание в связи с возможностью использования солнечного излучения для очистки воды и воздуха, деградации органических загрязнителей и решения ряда энергетических и экологических задач [1]. Среди различных наноструктур особый интерес представляют наночастицы металлов, обладающих поверхностным плазмонным резонансом, которые способны эффективно поглощать свет в видимой области спектра и инициировать фотоиндуцированные процессы на своей поверхности.

Наночастицы серебра относятся к числу наиболее изученных плазмонных наночастиц и могут рассматриваться как самостоятельные активные компоненты фотокаталитических систем [2, 3, 7]. Ряд работ де-

монстрирует их эффективность в составе фотокаталитических композитов [4, 6]. Известно, что наночастицы серебра способны катализировать фотохимические превращения органических субстратов под действием ультрафиолетового и видимого излучения, а также усиливать фотокаталитическую активность композиционных материалов за счёт сочетания плазмонных и зарядо-транспортных эффектов.

Оксидные носители, не обладая собственной фотокаталитической активностью (как в случае диоксида кремния) или проявляя её лишь в определённых условиях (как диоксид титана), обеспечивают распределение, фиксацию и стабилизацию серебряной фазы, а также влияют на доступность активных центров и транспорт реагентов к поверхности наночастиц. Структура, пористость и дисперсность оксидного носителя во многом определяют распределение, размер и состояние внедрённой металлической фазы и, тем самым, функциональные свойства композиционного материала.

Помимо фотокаталитической активности наночастицы серебра проявляют выраженные антибактериальные свойства [3, 8, 9] и противогрибковые эффекты [16], что делает их перспективными компонентами функциональных материалов медицинского и бытового назначения. Их антибактериальное действие, а также применение серебросодержащих наночастиц и других наноматериалов в стоматологии и зубных пастах подробно рассмотрены в ряде обзоров [10-12]. Дополнительные данные по нанотехнологиям в профилактической стоматологии и использованию наночастиц в зубных пастах, включая серебросодержащие системы, приведены в [14, 15, 17]. Отдельные работы описывают также противогрибковую активность серебросодержащих нанокомпозитов в составе детских зубных паст [16]. В таких системах важную роль играют не только размер и форма самих наночастиц серебра, но и свойства твёрдой матрицы, в которой они сформированы. Кремнезём используется как мягкий абразивный компонент, обеспечивающий очищение твёрдых тканей зуба без их избыточного износа [18, 19]. Введение в такие оксидные матрицы наночастиц серебра позволяет рассматривать композиционные порошки на основе SiO_2 как потенциальные функциональные наполнители, сочетающие абразивные свойства с антибактериальной и противогрибковой активностью.

Для получения кремнезёма с контролируемой морфологией и пористой структурой широко используются золь-гель технологии на основе гидролиза и поликонденсации алкоксисоединений кремния [20-22]. Такие методы позволяют получать микросферические и мезопористые порошки кремнезёма, состоящие из нанодисперсных первичных частиц и обладающие развитой удельной поверхностью. Наличие мезопористой структуры и высокой дисперсности структурных единиц оказывает существенное влияние на процессы нуклеации и роста наночастиц металлов, формирующихся в матрице оксида при термическом разложении соответствующих солей.

Методы формирования наночастиц серебра на оксидных носителях описаны в литературе [7], однако сравнительные исследования влияния типа носителя, его дисперсности и пористой структуры на морфологию формирующейся серебряной фазы при одинаковых условиях введения серебра пока представлены ограниченно. В то же время именно морфология и распределение серебра на поверхности носителя в значительной степени определяют как фотокаталитические и оптические характеристики композиционных порошков, так и их потенциальную эффективность в качестве антибактериальных и абразивных наполнителей.

В связи с этим представляет интерес получение и исследование порошков диоксида титана и кремнезёма, содержащих частицы серебра ($\text{TiO}_2@Ag$ и $\text{SiO}_2@Ag$, соответственно), в условиях, когда способ введения серебра и режим термической обработки являются одинаковыми, а основным варьируемым параметром выступает структура оксидного носителя. Целью настоящей работы является экспериментальная иллюстрация влияния дисперсности и мезопористой структуры золь-гель кремнезёма по сравнению с грубодисперсным диоксидом титана на морфологию и распределение серебряной фазы при термическом разложении нитрата серебра, а также количественная оценка удельной поверхности и наноструктуры кремнезёма.

Материалы и методы исследований

В работе использовали коммерческий диоксид титана марки ЧДА, нитрат серебра (х.ч.), тетраэтоксисилан (ОСЧ), бутанол-1 (ЧДА), аммиак водный 25 % (ЧДА), соляную кислоту. Для проведения сканирующей электронной микроскопии применялся микроскоп Tescan VEGA3, оснащённый детекторами вторичных электронов (SE) и обратно отражённых электронов (BSE), а также энергодисперсионным (EDS) анализатором с возможностью картирования распределения элементов по поверхности образцов.

Удельную поверхность и адсорбционные характеристики кремнезёма определяли по адсорбции метиленового синего из водного раствора. Готовили серию растворов метиленового синего различной начальной концентрации, к каждому из которых добавляли навеску кремнезёма и выдерживали до установления адсорбционного равновесия. После отделения твёрдой фазы фильтрованием измеряли оптическую плотность растворов на спектрофотометре при длине волны 665 нм, соответствующей максимуму поглощения метиленового синего, и по калибровочному графику определяли равновесные концентрации красителя $c_{рав}$. По разности начальной и равновесной концентраций рассчитывали адсорбцию в пересчёте на единицу массы кремнезёма, затем строили изотерму адсорбции в координатах $c_{рав}/A = f(c_{рав})$ в соответствии с линейной формой уравнения Ленгмюра. Отсюда по полученному графику графически находили константы уравнения Ленгмюра (максимальная адсорбция A_{∞} и константа адсорбционного равновесия K). Затем определяли удельную поверхность кремнезёма по формуле:

$$s_{уд} = s_0 A_{\infty} N_A, \quad (3)$$

где s_0 – площадь, приходящаяся на молекулу метиленового синего, для которой было взято значение 0.69 нм^2 [23].

Полученный комплекс данных (СЭМ-изображения, EDS-картирование, результаты титрования по Сирсу и адсорбции метиленового синего) использовали для сравнительного анализа морфологии и дисперсности серебряной фазы на коммерческом диоксиде титана и кремнезёме, полученным золь-гель методом, а также для оценки влияния наноструктуры и пористой структуры кремнезёма на характер распределения частиц серебра в оксидной матрице.

Результаты и обсуждения

По данным сканирующей электронной микроскопии коммерческий диоксид титана представляет собой сравнительно крупные частицы (рис. 2, а и б) со средним эффективным диаметром 35,4 мкм. В отличие от него кремнезём, синтезированный золь-гель методом, образует агрегаты из микросфер (рис. 2, с) со средним диаметром 1,4 мкм.

На основании дисперсионного анализа микрофотографий СЭМ были построены гистограммы распределения частиц по размерам для золь-гель кремнезёма и коммерческого диоксида титана. Для диоксида титана распределение частиц по размерам, является широким и выражено полидисперсным (рис.3, а). Численный максимум наблюдается в области 20-30 мкм, тогда как по объёмной доле существенный вклад вносят также более крупные фракции 43-55 мкм. Таким образом, TiO_2 представляет собой грубодисперсный порошок с широким распределением по фракциям.

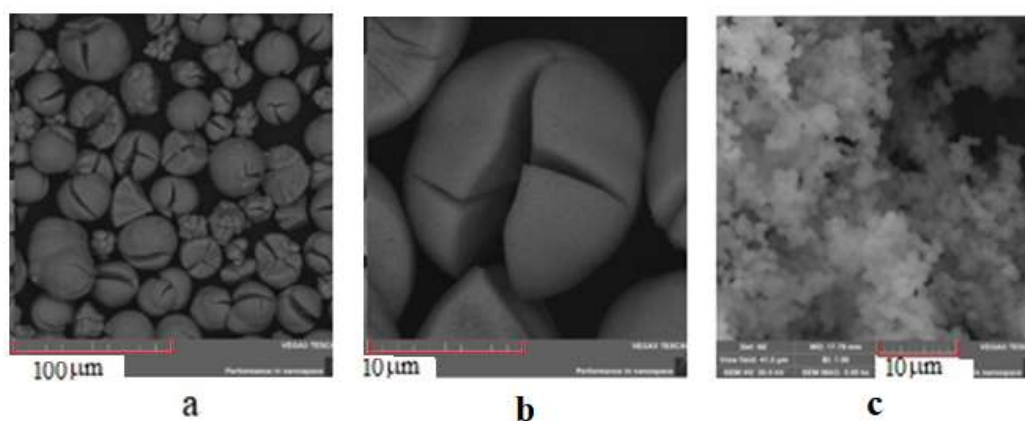


Рис. 2. Микрофотографии исходных порошков: а и б – диоксид титана (при различном увеличении); в – кремнезем.

Fig. 2. Microphotographs of the initial powders: a and b – titanium dioxide (at different magnifications); c – silica.

Для кремнезёма (рис. 3, b) распределение частиц по диаметру, напротив, носит узкий, близкий к монодисперсному характер: максимум численного распределения приходится на диапазон 1,3-1,5 мкм, причём как численная, так и объёмная доля этих фракций достигает по ~20-30 %. Основная масса частиц лежит в интервале 1,1-1,7 мкм, тогда как содержание частиц меньших 1,0 мкм и более крупных 2,0 мкм не превышает нескольких процентов. Это количественно подтверждает высокую однородность по размеру частиц SiO₂.

Согласно [21, 22] микросферы кремнезема, получаемого золь-гель методом, состоят из агрегированных первичных наночастиц. Оценка по данным щелочного титрования по методу Сирса показала, что удельная поверхность таких первичных наночастиц кремнезёма составила 743 м²/г, чему соответствует размер 3,7 нм.

Изотерма адсорбции метиленового синего на кремнеземе показана на рис. 4. Как видно, она имеет ленгмюровский вид. Константы уравнения Ленгмюра, определенные графически по изотерме адсорбции в координатах, линеаризующих уравнение Ленгмюра, составили следующие значения: $A_{\infty} = 5,77 \cdot 10^{-6}$ моль/г и $K = 1,16 \cdot 10^5$, соответственно. Рассчитанная по (3) удельная поверхность составила около 10 м²/г, что характерно для мезопористых материалов. Подобные значения удельной поверхности характерны для мезопористых материалов и позволяют предположить наличие на поверхности кремнезёма пор в диапазоне 2-50 нм.

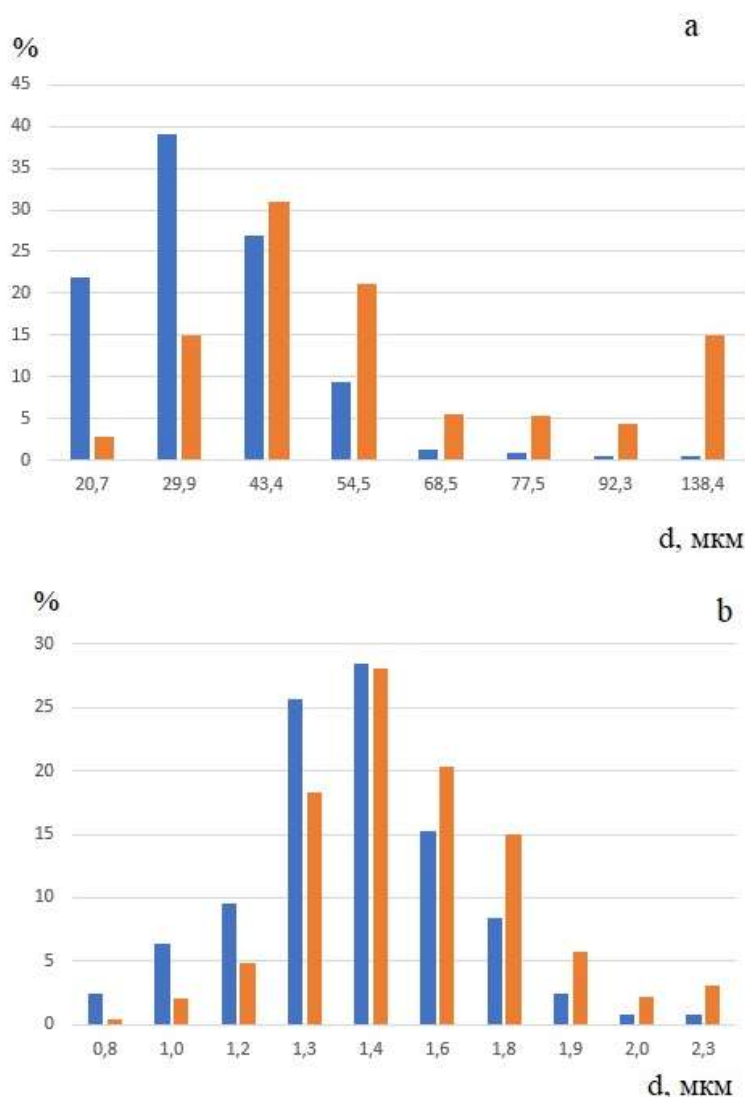


Рис. 3. Численное (левый столбец) и объемное (правый столбец) распределение частиц по размерам для порошков: а – диоксид титана; б – кремнезем.

Fig. 3. Number (left bars) and volume (right bars) particle size distributions for the powders: а – titanium dioxide; б – silica.

Таким образом, полученный золь-гель кремнезём представляет собой мезопористый наноструктурированный материал: наночастицы SiO_2 агрегированы в микросферы микрометрового размера. Полученные результаты согласуются с литературными данными для аналогичных систем [18, 20, 21].

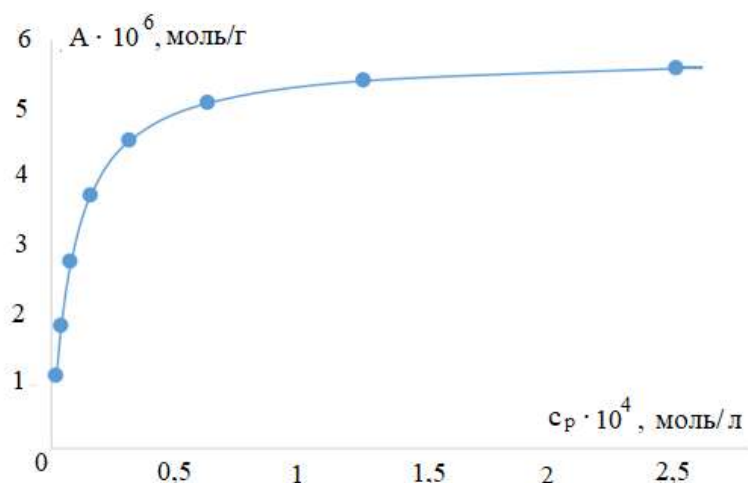


Рис. 4. Изотерма адсорбции метиленового синего на порошке кремнезема, полученного золь-гель методом.

Fig. 4. Adsorption isotherm of methylene blue on silica powder obtained by the sol-gel method.

Модификация диоксида титана и кремнезёма серебром путём пропитки раствором нитрата серебра с последующим термическим разложением соли при $700\text{ }^\circ\text{C}$ приводит к формированию на поверхности обоих носителей серебросодержащих частиц, однако их морфология существенно различается. На поверхности частиц диоксида титана отчётливо видны отдельные микронные и субмикронные включения серебра, большинство из которых лежат в диапазоне примерно $1,5\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 5, а и б), по форме близкие к сферическим. Более подробный дисперсионный анализ затруднён из-за трёхмерной формы частиц TiO_2 и различного положения частиц серебра по глубине относительно плоскости съёмки. В режиме детектора BSE эти области проявляются как участки повышенной яркости, что указывает на присутствие элемента с большим атомным номером (рис. 5, б). Элементный анализ (рис. 5, с-е) подтверждает, что данные включения соответствуют металлическому серебру. Как видно из сопоставления рис. 5, а и б, с рис. 5с, микровключениям на поверхности частиц диоксида титана соответствуют участки серебра на EDS-карте.

В случае модифицированного кремнезёма на микрофотографиях СЭМ в режиме BSE наблюдаются отдельные более яркие включения радиусом порядка $0,2\text{--}0,55\text{ }\mu\text{m}$, которые можно отнести к наиболее крупным частицам серебра на внешней поверхности микросфер (рис. 6). Результаты элементного микроанализа образца $\text{SiO}_2\text{@Ag}$ представлены в табл. 1. EDS-карты для кремнезема показаны на рис.7. Они показывают сравнительно равномерное распределение серебра по площади наблюдаемой области и не позволяют однозначно сопоставить сигнал Ag (рис. 7, с) только с этими яркими частицами (рис. 6). Это указывает на наличие, помимо выделенных субмикронных включений, более мелкодисперсной фазы серебра, вероятно частично локализованной в поровом пространстве мезопористого кремнезёма и не разрешимой по размеру при использованных условиях съёмки.

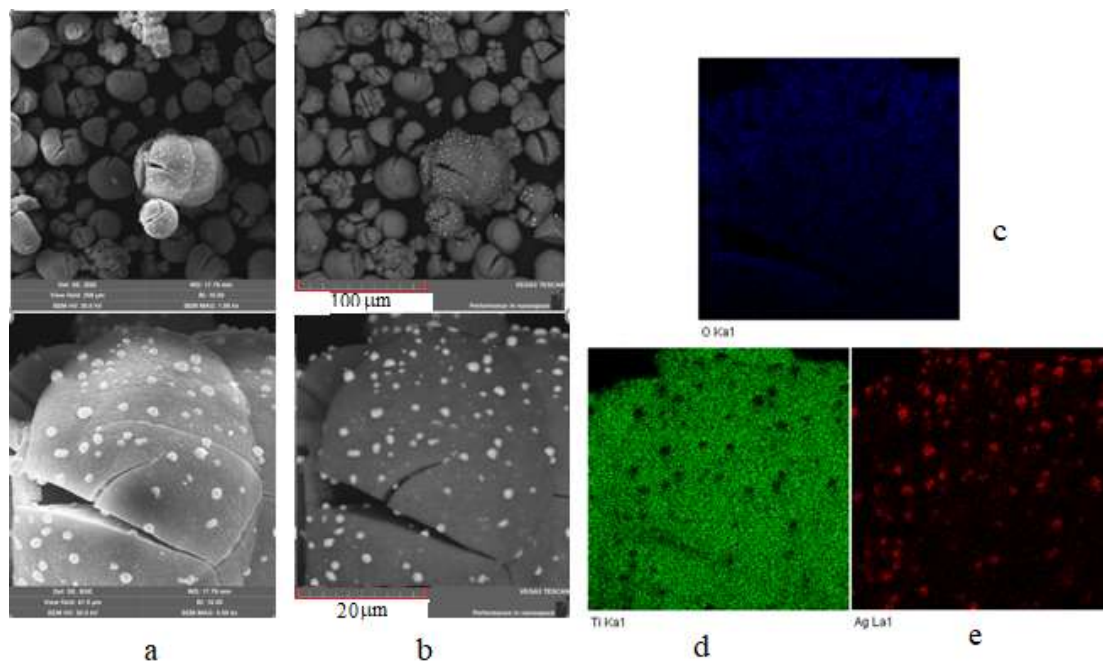


Рис. 5. Структура и элементный анализ порошка $\text{TiO}_2@Ag$: а и б – микрофотографии: детектор SE (а) и детектор BSE (б); с, d, e – результаты картирования поверхности по распределению: кислорода (с), титана (d) и серебра (е).

Fig. 5. Structure and elemental analysis of $\text{TiO}_2@Ag$ powder: a and b – microphotographs: SE detector (a) and BSE detector (b); c, d, e – results of surface mapping for the distribution of oxygen (c), titanium (d), and silver (e).

Таким образом, на мезопористом золь-гель кремнезёме формируется комбинация отдельных субмикронных частиц серебра на внешней поверхности и более высокодисперсной фазы, распределённой по поверхности и в порах носителя, тогда как на крупнодисперсном диоксиде титана преобладают более крупные серебряные включения микронного размера.

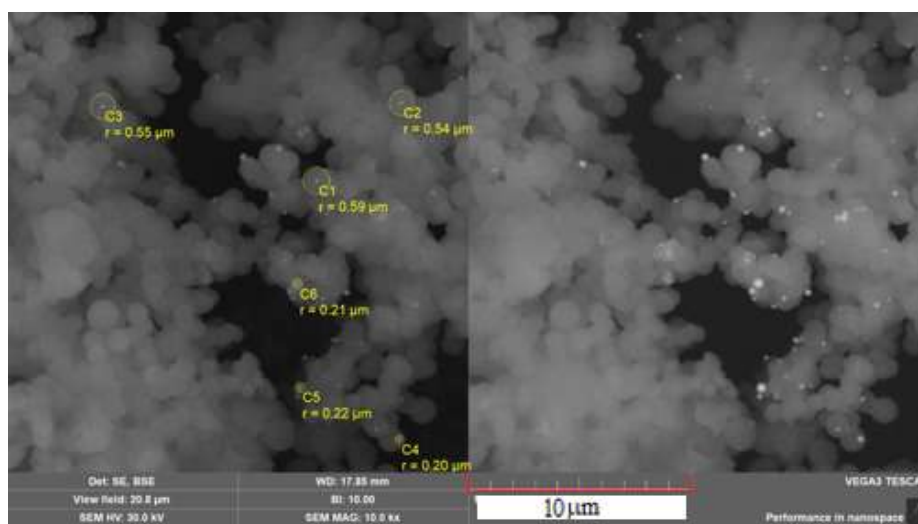


Рис. 6. Микрофотография порошка $\text{SiO}_2@Ag$, детектор BSE.

Fig. 6. BSE micrograph of the $\text{SiO}_2@Ag$ powder.

Полученные данные позволяют связать характер формирования серебряной фазы с особенностями структуры оксидного носителя. Для крупнодисперсного диоксида титана с ограниченной удельной поверхностью число потенциальных центров нуклеации и закрепления серебра относительно невелико. При термическом разложении нитрата серебра на такой поверхности высвобождающиеся атомы и кластеры сереб-

ра склонны к более интенсивной агрегации, что приводит к образованию субмикронных и микронных частиц. В то же время мезопористый кремнезём с удельной поверхностью порядка $10 \text{ м}^2/\text{г}$ и нанодисперсной структурой стенок микросфер обеспечивает значительно большее число потенциальных центров зарождения и фиксации серебряных частиц. Наличие пор в мезодиапазоне и наноструктурированных стенок способствует формированию множества мелких зародышей и препятствует их укрупнению, вследствие чего серебряная фаза остаётся более высокодисперсной и равномерно распределённой.

Таблица 1

Результаты элементного микроанализа образца $\text{SiO}_2@\text{Ag}$ по данным EDS.

Table 1

Results of elemental microanalysis of the $\text{SiO}_2@\text{Ag}$ sample using EDS data.

Элемент	Весовой %	Атомный%
O	56,34	71,36
Si	38,31	27,64
Ag	5,36	1,01
Итоги	100,00	100,00

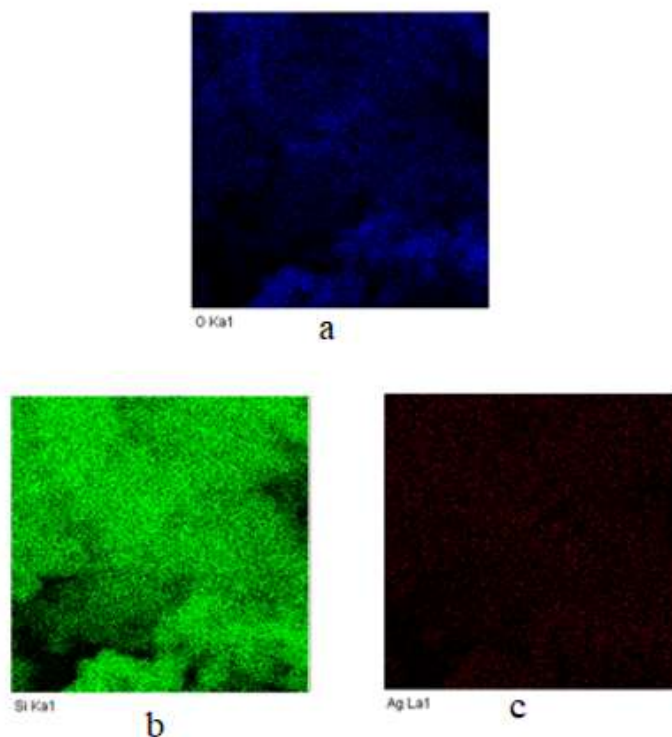


Рис. 7. Структура и элементный анализ порошка $\text{SiO}_2@\text{Ag}$: а – микрофотография; б, с, d – результаты картирования поверхности по распределению: кислорода (b), кремния (c) и серебра (d).

Fig. 7. Structure and elemental analysis of the $\text{SiO}_2@\text{Ag}$ powder: a – microphotograph; b, c, d – results of surface mapping for the distribution of oxygen (b), silicon (c), and silver (d).

Различия в морфологии и распределении серебра на TiO_2 и SiO_2 должны отражаться на функциональных свойствах композитов. Более крупные частицы серебра на диоксиде титана обеспечивают меньшую суммарную поверхность металлической фазы и более неоднородное распределение активных центров, что, вероятно, менее благоприятно для фотокаталитических процессов и проявления антибактериальной активности. В случае мезопористого кремнезёма более равномерно распределённые наноразмерные частицы серебра обеспечивают большую доступную поверхность контакта с реагентами и средой, что может усилить плазмонные и поверхностные эффекты серебра.

С точки зрения возможного применения полученных материалов в качестве абразивных наполнителей для зубных паст и других средств гигиены полости рта важными являются как размер и форма частиц носителя, так и дисперсность и распределение серебряной фазы. Микросферический кремнезём с размером

частиц порядка 1-2 мкм может обеспечивать мягкое абразивное действие, а локализация наночастиц серебра на его поверхности и в порах создаёт предпосылки для проявления антибактериального эффекта в приповерхностном слое. Более крупные частицы диоксида титана с осаждёнными на поверхности микронными включениями серебра могут быть использованы в составах, где необходимо более выраженное абразивное действие и сохранение белого цвета наполнителя; при этом вклад антибактериального эффекта будет в основном связан с локальными областями, обогащёнными серебром.

Таким образом, на примере двух оксидных носителей – мезопористого золь-гель кремнезёма и крупнодисперсного диоксида титана видно, как структура матрицы влияет на дисперсность и распределение серебряной фазы при одинаковых условиях модификации нитратом серебра и термической обработкой.

Выводы

Получены композиционные порошки $\text{TiO}_2@Ag$ и $\text{SiO}_2@Ag$ путём пропитки оксидных носителей раствором нитрата серебра с последующим термическим разложением соли при 700 °С. Показано, что коммерческий диоксид титана представляет собой крупные частицы (средний размер 35,4 мкм), тогда как золь-гель кремнезём образует микросферы со средним размером 1,4 мкм, состоящие, по данным титрования по методу Сирса, из первичных наночастиц среднего размера ~3,7 нм. По данным адсорбции метиленового синего при помощи уравнения Ленгмюра рассчитана удельная поверхность кремнезёма ~10 м²/г, что соответствует мезопористой структуре.

Установлено, что на поверхности TiO_2 формируются преимущественно субмикронные и микронные частицы серебра (до ~2 мкм). На мезопористом кремнезёме, полученном золь-гель методом, формируется комбинация отдельных субмикронных частиц серебра на внешней поверхности и более высокодисперсной фазы, распределённой по поверхности и в порах носителя.

Мезопористый кремнезём, полученный золь-гель методом, с развитой удельной поверхностью и нанодисперсной структурой стенок микросфер, формируется с порами в мезодиапазоне. Большое число центров нуклеации и ограниченное поровое пространство способствует образованию более мелких частиц серебра. Грубодисперсный, слабо пористый диоксид титана, напротив, не препятствует укрупнению серебряных частиц, что приводит к формированию субмикронных и микронных включений. Эти данные демонстрируют влияние дисперсности и пористой структуры носителя на морфологию металлической фазы. Таким образом, мезопористый наноструктурированный кремнезём обеспечивает более высокодисперсную и равномерно распределённую серебряную фазу по сравнению с крупнодисперсным диоксидом титана.

Полученные результаты подтверждают существенное влияние структуры оксидного носителя на морфологию серебряной фазы и могут быть использованы при разработке серебросодержащих фотокаталитических и абразивных материалов. Они представляются полезными для обсуждения роли структуры носителя при формировании металлических наночастиц на оксидных матрицах

Композиты $\text{SiO}_2@Ag$ и $\text{TiO}_2@Ag$ целесообразно далее исследовать с точки зрения фотокаталитической активности и антибактериальных свойств в составе зубных паст и других средств гигиены полости рта. Они могут использоваться при выборе оксидных носителей для задач фотокатализа и создания функциональных абразивных наполнителей.

Список источников

1. Ameta R., Solanki M.S., Benjamin S., Ameta S.C. Photocatalysis. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Academic Press, 2018. 428 p.
2. Belessiotis G., Kontos A.G. Plasmonic silver (Ag)-based photocatalysts for H₂ production and CO₂ conversion: Review, analysis and perspectives // Renewable Energy. 2022. Vol. 195. P. 497 – 515. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.044>
3. Крутяков Ю.А., Кудринский А.А., Оленин А.Ю., Лисичкин Г.В. Синтез и свойства наночастиц серебра: достижения и перспективы // Успехи химии. 2008. Т. 77. С. 242 – 269.
4. Wang Y., Pan F., Dong W., Xu L., Wu K., Xu G., Chen W. Recyclable silver-decorated magnetic titania nanocomposite with enhanced visible-light photocatalytic activity // Applied Catalysis B: Environmental. 2016. Vol. 189. P. 192 – 198. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.057>
5. Li Z., Meng X. Recent development on palladium enhanced photocatalytic activity: A review // J. Alloys Compd. 2020. Vol. 830. Article ID 154669. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154669>
6. Chen X., Zheng Z., Ke X., Jaatinen E., Xie T., Wang D., Guo Ch., Zhao J., Zhu H. Supported silver nanoparticles as photocatalysts under ultraviolet and visible light irradiation // Green Chem. 2010. Vol. 12 (3). P. 414 – 419. <https://doi.org/10.1039/B921696K>

7. Yeschenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk O. Size and temperature effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles // *Plasmonics*. 2012. Vol. 7. P. 685 – 694. <https://doi.org/10.1007/S11468-012-9359-Z>
8. Bruna T., Maldonado-Bravo F., Jara P., Caro N. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22 (13). Article ID 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
9. Егорова Е.М., Кубатиев А.А., Швец В.И. Биологические эффекты наночастиц металлов. М.: Наука, 2014. 350 с.
10. Yin I.X., Zhang J., Zhao I.S., Mei M.L., Li Q., Chu CH.-H. The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry // *Int. J. Nanomedicine*. 2020. Vol. 17. P. 2555 – 2562. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>
11. Ahmed O.A.K., Sibuyi N.R.S., Oluwaseun F.A., Maboza E. Prospects of Using Gum Arabic Silver Nanoparticles in Toothpaste to Prevent Dental Caries // *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15 (3). P. 871. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030871>
12. Abedi M., Ghasemi Y., Nemati M.M. Nanotechnology in toothpaste: Fundamentals, trends, and safety // *Heliyon*. 2024. Vol. 10. Article ID e24949. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24949>
13. Mallineni S.K., Sakhamuri S., Kotha S.L., AlAsmari A.R.G.M., AlJefri G.H., Almotawah F.N., Mallineni S., Sajja R. Silver nanoparticles in dental applications: A descriptive review // *Bioengineering*. 2023. Vol. 10. P. 327 – 243. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10030327>
14. Divyashri S., Hannah R., Vishnu Priya V. Nanotechnology in toothpaste – a review // *Cuest. Fisioter.* 2025. Vol. 54 (3). P. 2552 – 2563.
15. Борисенко Е.А., Бутова С.Н. Преимущества использования коллоидного серебра в зубной пасте // *ХИПС*. 2018. № 4. С. 109 – 117.
16. Fazli F., Babaei A., Moazeni M., Fazli H., Nahvi A., Ebrahimnejad P., Nokhodchi A. Biofabrication of silver nanoparticles with *Feijoa sellowiana* tailored by Box-Behnken design: An eco-friendly approach to enhance antifungal properties in children’s toothpaste // *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2024. Vol. 92. Article ID 105361. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105361>
17. Блинова А.В. Нанотехнологии: поиски новых решений для профилактической стоматологии // *Вестник Авиценны*. 2021. Т. 23 (1). С. 78 – 84. <https://doi.org/10.25005/2074-0581-2021-23-1-78-84>
18. Ерасов В.С., Галимова А.З., Соловьева Т.С., Плетнев М.Ю. Структура и свойства коллоидального кремнезема, используемого в зубных пастах // *Журнал прикладной химии*. 2013. Т. 86 (5). С. 680 – 685.
19. Sampaio F.C., Oliveira A.F.B.d., Fernandes N.L.S., Gentile A.C.C., Marinho G.B., Bönecker M.J.S., Paschoal M.A.B., D’Alpino P.H.P., Vilhena F.V. Silicon-, silica-, and silicate-toothpastes for remineralization and repair of teeth: a scoping review // *Oral*. 2024. Vol. 4. P. 467 – 486. <https://doi.org/10.3390/oral4040038>
20. Ерасов В.С. Золь-гель технология: практикум. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2023. 61 с.
21. Шабанова Н.А., Саркисов П.Д. Золь-гель технологии. Нанодисперсный кремнезем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 328 с.
22. Мошников В.А., Таиров Ю.М., Хамова Т.В., Шилова О.А. Золь-гель технология микро- и наноконпозитов: учебное пособие. СПб.: Лань, 2013. 304 с.
23. Седанова А.В., Корниенко Н.В., Делягина М.С., Пьянова Л.Г., Дроздов В.А., Лавренов А.В. Совместная адсорбция красителей метиленового синего и метанилового желтого на углеродных сорбентах // Сорбционные и ионообменные процессы. 2024. Т. 97. С. 70 – 76. <https://doi.org/10.31857/S0044461824010092>

References

1. Ameta R., Solanki M.S., Benjamin S., Ameta S.C. Photocatalysis. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. Academic Press, 2018. 428 p.
2. Belessiotis G., Kontos A.G. Plasmonic silver (Ag)-based photocatalysts for H₂ production and CO₂ conversion: Review, analysis and perspectives. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 195. P. 497 – 515. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.044>
3. Krutyakov Yu.A., Kudrinsky A.A., Olenin A.Yu., Lisichkin G.V. Synthesis and properties of silver nanoparticles: achievements and prospects. *Uspekhi Chem.* 2008. Т. 77. P. 242 – 269.
4. Wang Y., Pan F., Dong W., Xu L., Wu K., Xu G., Chen W. Recyclable silver-decorated magnetic titanium nanocomposite with enhanced visible-light photocatalytic activity. *Applied Catalysis B: Environmental*. 2016. Vol. 189. P. 192 – 198. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.057>

5. Li Z., Meng X. Recent development on palladium enhanced photocatalytic activity: A review. *J. Alloys Compd.* 2020. Vol. 830. Article ID 154669. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154669>
6. Chen X., Zheng Z., Ke X., Jaatinen E., Xie T., Wang D., Guo Ch., Zhao J., Zhu H. Supported silver nanoparticles as photocatalysts under ultraviolet and visible light irradiation. *Green Chem.* 2010. Vol. 12(3). P. 414 – 419. <https://doi.org/10.1039/B921696K>
7. Yeschenko O.A., Dmitruk I.M., Alexeenko A.A., Kotko A.V., Verdal J., Pinchuk O. Size and temperament effects on the surface plasmon resonance in silver nanoparticles. *Plasmonics.* 2012. Vol. 7. P. 685 – 694. <https://doi.org/10.1007/S11468-012-9359-Z>
8. Bruna T., Maldonado-Bravo F., Jara P., Caro N. Silver Nanoparticles and Their Antibacterial Applications. *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22 (13). Article ID 7202. <https://doi.org/10.3390/ijms22137202>
9. Egorova E.M., Kubatiev A.A., Shvets V.I. Biological effects of metal nanoparticles. Moscow: Nauka, 2014. 350 p.
10. Yin I. X., Zhang J., Zhao I. S., Mei M. L., Li Q., Chu C.-H. The Antibacterial Mechanism of Silver Nanoparticles and Its Application in Dentistry. *Int. J. Nanomedicine.* 2020. Vol. 17. P. 2555 – 2562. <https://doi.org/10.2147/IJN.S246764>
11. Ahmed O.A.K., Sibuyi N.R.S., Oluwaseun F.A., Maboza E. Prospects of Using Gum Arabic Silver Nanoparticles in Toothpaste to Prevent Dental Caries. *Pharmaceutics.* 2023. Vol. 15 (3). P. 871. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030871>
12. Abedi M., Ghasemi Y., Nemati M.M. Nanotechnology in toothpaste: Fundamentals, trends, and safety. *Heliyon.* 2024. Vol. 10. Article ID e24949. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24949>
13. Mallineni S.K., Sakhamuri S., Kotha S.L., AlAsmari A.R.G.M., AlJefri G.H., Almotawah F.N., Mallineni S., Sajja R. Silver nanoparticles in dental applications: A descriptive review. *Bioengineering.* 2023. Vol. 10. P. 327 – 243. <https://doi.org/10.3390/bioengineering10030327>
14. Divyashri S., Hannah R., Vishnu Priya V. Nanotechnology in toothpaste – a review. *Cuest. Fisioter.* 2025. Vol. 54 (3). P. 2552 – 2563.
15. Borisenko E.A., Butova S.N. Advantages of using colloidal silver in toothpaste. *HIPS.* 2018. No. 4. P. 109 – 117.
16. Fazli F., Babaei A., Moazeni M., Fazli H., Nahvi A., Ebrahimnejad P., Nokhodchi A. Biofabrication of silver nanoparticles with Feijoa sellowiana tailored by Box-Behnken design: An eco-friendly approach to enhance antifungal properties in children's toothpaste. *Journal of Drug Delivery Science and Technology.* 2024. Vol. 92. Article ID 105361. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2024.105361>
17. Blinova A.V. Nanotechnology: Search for New Solutions for Preventive Dentistry. *Avicenna Bulletin.* 2021. Vol. 23 (1). P. 78 – 84. <https://doi.org/10.25005/2074-0581-2021-23-1-78-84>
18. Yerasov V.S., Galimova A.Z., Solovieva T.S., Pletnev M.Yu. Structure and properties of colloidal silica used in toothpastes. *Journal of Applied Chemistry.* 2013. Vol. 86 (5). P. 680 – 685.
19. Sampaio F.C., Oliveira A.F.B.d., Fernandes N.L.S., Gentile A.C.C., Marinho G.B., Bönecker M.J.S., Paschoal M.A.B., D'Alpino P.H.P., Vilhena F.V. Silicon-, silica-, and silicate-toothpastes for remineralization and repair of teeth: a scoping review. *Oral.* 2024. Vol. 4. P. 467 – 486. <https://doi.org/10.3390/oral4040038>
20. Yerasov V.S. Sol-gel technology: practical training. Moscow: MIREA – Russian Technological University, 2023. 61 p.
21. Shabanova N.A., Sarkisov P.D. Sol-gel technologies. Nanodispersed silica. Moscow: BINOM. Knowledge Laboratory, 2012. 328 p.
22. Moshnikov V.A., Tairov Yu.M., Khamova T.V., Shilova O.A. Sol-gel technology of micro- and nanocomposites: a tutorial. St. Petersburg: Lan, 2013. 304 p.
23. Sedanova A.V., Kornienko N.V., Delyagina M.S., Pyanova L.G., Drozdov V.A., Lavrenov A.V. Joint adsorption of methylene blue and methanil yellow dyes on carbon sorbents. Sorption and ion-exchange processes. 2024. Vol. 97. P. 70 – 76. <https://doi.org/10.31857/S0044461824010092>

Информация об авторах

Яковлев Д.Д., Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет

Ерасов В.С., кандидат химических наук, доцент, Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова, МИРЭА – Российский технологический университет, Vadim.ersv@yandex.ru

© Яковлев Д.Д., Ерасов В.С., 2026

Information about the authors

Yakovlev D.D., M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University

Erasov V.S., Candidate of Chemical Sciences (PhD), Associate Professor, Lomonosov Institute of Fine Chemical Technology, MIREA – Russian Technological University, Vadim.ersv@yandex.ru

© Yakovlev D.D., Erasov V.S., 2026