

СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ГИБРИДНЫХ ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН И ИХ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ СЕНСОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© И. Н. Фадейкина^{1,2}, Е. В. Андреев², Д. И. Юренков¹, В. К. Кабарухин¹, А. Н. Нечаев^{1,2}

¹ Государственный университет «Дубна»,
141980, г. Дубна Московской обл., ул. Университетская, д. 19

² Объединенный институт ядерных исследований,
141980, г. Дубна Московской обл., ул. Жолио-Кюри, д. 6
E-mail: i.fadeikina@yandex.ru

Поступила в Редакцию 27 июня 2024 г.

После доработки 23 июля 2024 г.

Принята к публикации 2 августа 2024 г.

Синтезированы наночастицы серебра сферической и несферической формы. Проведена их иммобилизация на полиэтилентерефталатные трековые мембраны, модифицированные полиэтиленгликолем. Присутствие наночастиц серебра на поверхности трековых мембран было доказано спектроскопией поглощения света в ультрафиолетовой и видимой области, растровой электронной микроскопией. На полученных образцах гибридных трековых мембран обнаружен эффект гигантского комбинационного рассеяния света с использованием тестового вещества 4-аминотиофенола, что позволит использовать их в качестве сенсорного материала.

Ключевые слова: наночастицы серебра; гибридные трековые мембраны; гигантское комбинационное рассеяние света; сенсоры

DOI: 10.31857/S0044461824030071; EDN: TFIPMQ

Сенсоры с эффектом гигантского комбинационного рассеяния света могут быть использованы для обнаружения многих органических веществ и биологических объектов в низких концентрациях [1]. Данный эффект проявляется за счет явления плазмонного резонанса на поверхности наночастиц металлов, при котором происходит усиление сигнала комбинационного рассеяния света. Агрегация металлических наночастиц на плоской подложке приводит к усилению электрического поля и образованию большого количества областей детектирования, за счет этого планарные системы проявляют высокую чувствительность к определяемым объектам [2].

Трековые мембраны представляют собой тонкую полимерную пленку с гладкой поверхностью, по-

этому их удобно применять в качестве подложки. Для создания селективных мембран, позволяющих избирательно адсорбировать отдельные молекулы, используются следующие методы модификации: радиационная прививка, обработка низкотемпературной плазмой, обработка водорастворимыми полимерами. Иммобилизация наночастиц на поверхности мембран также является одним из широко используемых приемов направленной модификации. Для создания структур с эффектом гигантского комбинационного рассеяния света часто используют наночастицы серебра, поскольку они имеют большее значение коэффициента усиления комбинационного рассеяния света по сравнению с наночастицами других металлов [3].

Существует множество методов синтеза наночастиц серебра: восстановление солей серебра в водных и неводных растворах [4], диспергирование металлического серебра импульсным высокочастотным разрядом [5], с использованием микроорганизмов [6] и др.

Электроискровой метод синтеза относительно прост и позволяет получать устойчивые водные коллоидные растворы наночастиц серебра в больших объемах. Источником наночастиц являются серебряные электроды, погруженные в воду, между которыми проходит электрический разряд [5].

Простым и удобным способом получения наночастиц серебра является цитратный метод [7], который основан на восстановлении серебра из нитрата серебра при добавлении цитрата натрия. За счет регулирования концентрации цитрат-ионов, выступающих в роли восстановителя и стабилизатора, можно получать наночастицы размером 20–200 нм.

При получении наночастиц металлов все чаще начинают использовать наиболее экологичные варианты и методы «зеленой» химии [8]. К ним относится способ получения и стабилизации наночастиц восстановлением ионов серебра циклическим олигомером глюкозы — β -циклодекстрином.

Форма также влияет на физические и химические свойства наночастиц серебра, в частности, на проявление эффекта гигантского комбинационного рассеяния света. Уменьшение размеров и переход от сферической к различным угловатым или анизотропным формам частиц ведет к увеличению сигнала гигантского комбинационного рассеяния света. Например, наночастицы серебра в форме плоских треугольников имеют локализованные на углах участки с повышенной электронной плотностью, что повышает эффективность использования их в химическом анализе [9]. В синтезах несферических наночастиц используют добавки, регулирующие рост отдельных граней частицы.

Наночастицы серебра, синтезированные перечисленными способами, будут различаться по размеру, форме, составу стабилизирующей оболочки, оптическим свойствам, взаимодействию с трековой мембраной.

Таким образом, изучение и разработка подходов к модификации трековых мембран, способов синтеза и стабилизации наночастиц серебра для дальнейшей иммобилизации на мембранах является важной научной задачей, решение которой позволит создавать сенсоры с эффектом гигантского комбинационного рассеяния света, определять многие органические вещества и биологические объекты в достаточно низких концентрациях [10].

Цель работы — синтез и иммобилизация наночастиц серебра на трековых мембранах для использования данных гибридных мембран в качестве сенсорного материала с эффектом гигантского комбинационного рассеяния света.

Экспериментальная часть

В работе использовали следующие реагенты: цитрат натрия 5.5-водный (98%, PanReac, кат. № 121656.1211); полиэтиленимин разветвленный ($M_n = 60\ 000$, 50%-ный водный раствор, Acros Organics, кат. № 178572500); 4-аминотиофенол (>97%, Sigma-Aldrich, кат. № 422967); этанол (99.9%, Merck, кат. № 1.03450.0001); изопропанол (ос.ч., АО «ЭКОС-1»); HCl (37%, PanReac, кат. № 141020); KCl (>99.0%, Sigma-Aldrich, кат. № P4504); AgNO₃ (х.ч., АО «ЛенРеактив»); NaBH₄ (99%, Acros Organics, кат. № 200051000); H₂O₂ (ос.ч., АО «Химреактивснаб»); поливинилпирролидон ($M_w = 55\ 000$, Sigma-Aldrich, кат. № 856568); сплав платины и палладия (полоса ПлПд80-20 Т 0.2 × 60 × 180, АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов»); деионизованную воду (Milli-Q, Millipore) с удельным сопротивлением 18 МОм·см при 22°C.

В эксперименте использовали трековые мембраны из полиэтилентерефталата, изготовленные в Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований. Толщина мембраны составляла 19 мкм, плотность пор $2.7 \cdot 10^8/\text{см}^2$, диаметр пор 0.4 мкм.

Для характеристики формы и распределения наночастиц серебра по размерам использовали метод просвечивающей электронной микроскопии (Thermo Scientific Talos F200iS/TEM). В качестве подложки использовали медные сетки с тонкой пленкой аморфного углерода (SPI supplies). Для осаждения наночастиц подложку погружали в коллоидный раствор наночастиц серебра и затем высушивали на воздухе. При помощи программы JMicroVision 1.3.4 по микрофотографиям были рассчитаны размеры наночастиц и стандартное отклонение. Для каждого образца проводился анализ выборки, включающей не менее 50 частиц.

Степень осаждения наночастиц серебра на модифицированных трековых мембранах оценивали по спектрам поглощения коллоидного раствора в ультрафиолетовой и видимой областях, полученным на двухлучевом спектрофотометре Evolution 600 (Thermo Scientific), длина оптического пути составляла 1 см. Значение pH коллоидных растворов наночастиц серебра и растворов реагентов для синтеза измеряли на pH-метре SG2-ELK (Mettler Toledo).

ζ -Потенциал трековых мембран определяли при измерении зависимости разности потенциалов (ΔE) от давления при пропускании 0.01 М раствора KCl (рН 6.8) через мембрану. Величину ΔE определяли цифровым вольтметром В7-78/1 (ООО «Акип») с чувствительностью 1 мкВ. Численное значение рассчитывали по формуле Смолуховского. ζ -Потенциал синтезированных наночастиц определяли методом лазерного доплеровского микроэлектрофореза Zetasizer Nano ZSP (Malvern). Для измерения использовали U-образную кювету со встроенными золотыми электродами DTS1070 (Malvern).

Для изучения морфологии поверхности образцов трековых мембран с осажденными наночастицами серебра использовали метод растровой электронной микроскопии с применением микроскопа высокого разрешения SU 8020 (Hitachi) с холодным полевым катодом. Предварительно на образцы напыляли 5 нм слой сплава платины и палладия для повышения уровня электропроводности исследуемой поверхности.

В качестве дополнительного подтверждения осаждения наночастицы серебра на трековых мембранах и оценки возможности применения полученных подложек для детектирования тестового вещества применяли спектроскопию комбинационного рассеяния света, которую проводили на спектрометре Инспектр (ООО «Спектр-М»). Длина волны возбуждающего лазера 532 (сферические наночастицы) и 638 нм (несферические наночастицы). В качестве тестового вещества использовали раствор 4-аминотиофенола в концентрации 10^{-5} М в этаноле. Для измерения наносили 2 мкл раствора 4-аминотиофенола на модифицированную мембрану и давали полностью высохнуть. Измерения проводили в трех точках образца, полученные данные усредняли. Рассчитывали относительный коэффициент усиления сигнала комбинационного рассеяния полученных подложек при сравнении с подложкой с известным коэффициентом усиления.

В работе получали наночастицы серебра сферической и несферической формы. Электроискровой синтез, цитратный синтез, синтез с использованием циклодекстрина использовали для получения сферических частиц. Синтез с борогидридом натрия и добавками, ориентирующими рост граней зародыша, использовали для получения несферических наночастиц в виде плоских треугольников. Далее, в соответствии с вышеперечисленными методами, наночастицы серебра будут называться: электроискровые, цитратные, циклодекстриновые, треугольные наночастицы.

Электроискровой синтез. Коллоидный раствор электроискровых наночастиц серебра получали методом импульсного электрического разряда между серебряными электродами, погруженными в деминерализованную воду. Принцип действия установки для генерации разрядов в жидкой среде и свойства получаемых наночастиц описаны в работе [5]. Скорость потока воды, подаваемой с помощью насоса, составляла $0.5 \text{ л} \cdot \text{мин}^{-1}$. Расстояние между электродами составляло 100 мкм.

Цитратный синтез. Синтез сферических цитратных наночастиц серебра проводили, основываясь на методике [7], при этом изменили температуру и рН. Для синтеза были приготовлены растворы нитрата серебра 10^{-3} М и цитрата натрия 10^{-3} М. Перед синтезом раствор цитрата натрия доводили до рН 9.8 раствором гидроксида натрия 1 М. Далее в нагретый до 95°C раствор цитрата натрия объемом 50 мл медленно вводили раствор нитрата серебра объемом 12.5 мл при постоянном перемешивании. Синтез проходил в течение 30 мин.

Синтез с циклодекстрином. Для получения циклодекстриновых наночастиц серебра к раствору β -циклодекстрина 10^{-3} М с рН 11 при перемешивании по каплям добавляли раствор нитрата серебра 10^{-3} М при температуре 70°C при соотношении растворов по объему 1:5. Далее выдерживали в таких условиях 30 мин. Затем оставляли при комнатной температуре на 1 сут.

Синтез треугольных наночастиц серебра. Синтез треугольных наночастиц серебра основывался на методике, описанной в [10], при этом были изменены концентрации реагентов. К 0.5 мл раствора AgNO_3 10^{-2} М последовательно приливали при интенсивном перемешивании 4.1 мл воды, 2.3 мл раствора цитрата натрия 1%-ного, 0.6 мл раствора поливинилпирролидона 2%-ного и 1.2 мл раствора H_2O_2 3%-ного. Затем к полученной реакционной смеси быстро добавляли 1 мл 0.035 М свежеприготовленного раствора NaBH_4 . Синтез проходил при комнатной температуре в течение 30 мин. Поливинилпирролидон играет роль ограничителя роста некоторых направлений зародыша наночастиц серебра из-за избирательной сорбции на отдельных гранях. Добавление пероксида водорода способствует анизотропному росту благодаря частичному окислению поверхности наночастиц серебра и переносу в зону роста наночастицы получившихся ионов серебра. Цитрат действует как стабилизатор поверхности наночастиц серебра.

Модификация трековых мембран и иммобилизация наночастиц серебра. Трековые мембраны предварительно промывали в деионизованной воде и в

изопропиловом спирте. Модификацию проводили в 0.1%-ном растворе полиэтиленimina в течение 30 мин на шейкере, после чего отмывали в течение 5 мин в деионизованной воде для удаления избытка полиэтиленimina.

Для иммобилизации наночастиц серебра на модифицированных трековых мембранах проводили фильтрацию полученных коллоидных растворов в ячейке Amicon Stirred Cells (Millipore).

Обсуждение результатов

В процессе изготовления трековых мембран на поверхности полиэтилентерефталата образуются карбоксильные группы, придающие поверхности отрицательный заряд при $\text{pH} > 4$ [11]. ζ -Потенциал исходной мембраны составил -36 ± 2 мВ. Для закрепления отрицательно заряженных наночастиц серебра поверхность мембраны необходимо перезарядить, поэтому требуется модификация поверхности трековой мембраны веществом с положительно заряженными функциональными группами. Как правило, в качестве химического мостика, связывающего серебро и полимерную поверхность, используют вещества, содержащие аминогруппы, способные образовывать комплекс с серебром. В работе в качестве такого модификатора использовался полиэтиленimin, имеющий NH_x^+ функциональные группы [12]. Важным преимуществом полиэтиленimina перед другими модификаторами является высокая растворимость в воде [13], что позволяет легко модифицировать поверхность трековых мембран. После обработки полиэтиленимином ζ -потенциал мембраны составил $+64 \pm 17$ мВ.

На спектрах поглощения коллоидных растворов наночастиц серебра присутствует характерный пик плазмонного резонанса в области 400 нм [14]. Максимальный пик фиксируется в случае цитратных и циклодекстриновых наночастиц серебра (рис. 1, *a*, *в*), что свидетельствует о достаточно высокой концентрации наночастиц. Пик плазмонного резонанса электроискровых наночастиц (рис. 1, *б*) имеет меньшую интенсивность, а также уширенное плечо, что может говорить о полидисперсности коллоидной системы [5]. Для треугольных наночастиц (рис. 1, *г*) на спектре поглощения появляется новая полоса поглощения в области 600 нм.

Можно отметить монодисперсность и практически правильную сферическую форму цитратных (рис. 2, *a*) и циклодекстриновых наночастиц (рис. 2, *в*); значительный разброс по размерам для электроискровых частиц (рис. 2, *б*), что подтверждает

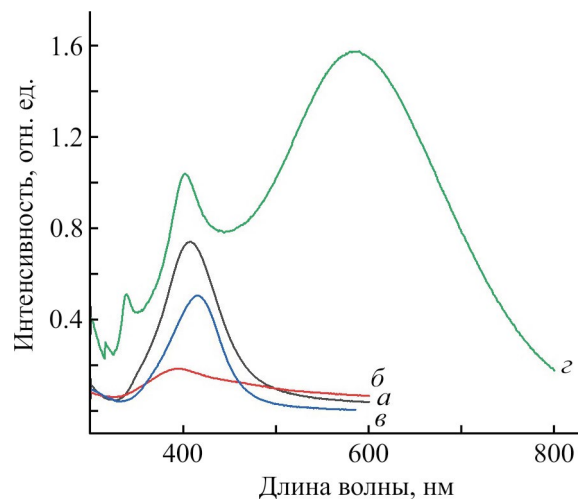


Рис. 1. Спектры поглощения коллоидных растворов наночастиц серебра в ультрафиолетовой и видимой областях.

Образцы сферических наночастиц получены методом: *a* — цитратного синтеза, *б* — электроискрового синтеза; *в* — в присутствии циклодекстрина; *г* — образец с частицами треугольной формы получен в присутствии борогидрида натрия.

форму спектра поглощения; наличие частиц плоской треугольной формы, собранных в стопки, с небольшой примесью сферических частиц (рис. 2, *г*).

ζ -Потенциал всех наночастиц серебра имеет отрицательный знак и значение меньше -20 мВ, что позволяет отнести все полученные коллоидные растворы к устойчивым или условно-устойчивым системам (см. таблицу) [5].

На поверхности всех образцов трековых мембран можно отметить достаточно плотное заполнение наночастицами (рис. 3). Циклодекстриновые наночастицы серебра имеют наиболее равномерное распределение по фронтальной поверхности мембраны (рис. 3, *в*).

Плотности заполнения наночастиц серебра на всех образцах оказалось достаточно для обнаружения эффекта гигантского комбинационного рассеяния света (рис. 4).

Средний размер и ζ -потенциал наночастиц

Наночастицы	Размер, нм		ζ -Потенциал, мВ
	Диаметр	Ребро	
Цитратные	Диаметр	24 ± 10	-25
Электроискровые	»	20 ± 3	-51
Циклодекстриновые	»	28 ± 4	-35
Треугольные	Ребро	42 ± 12	-29

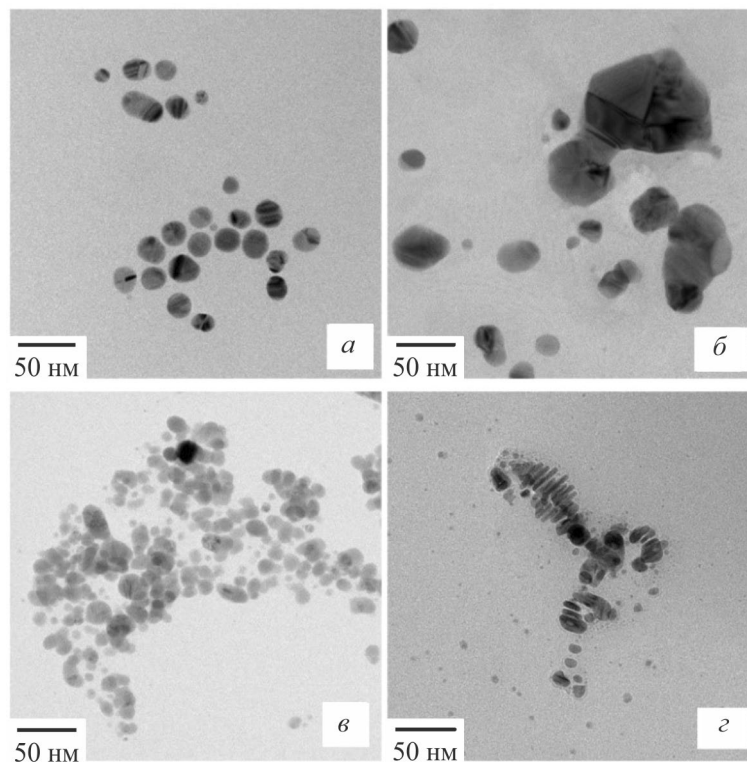


Рис. 2. Микрофотографии наночастиц серебра, полученные методом просвечивающей электронной микроскопии. Образцы сферических наночастиц получены методом: *а* — цитратного синтеза, *б* — электроискрового синтеза, *в* — в присутствии циклодекстрина; *г* — образец с частицами треугольной формы получен в присутствии борогидрида натрия.

Рассчитанные относительные коэффициенты усиления составили: для цитратных наночастиц серебра $2 \cdot 10^6$, для электроискровых $3 \cdot 10^5$, для циклодекстри-

новых $7 \cdot 10^5$. Наибольшее значение коэффициента усиления $5 \cdot 10^6$ получено на образцах с треугольными наночастицами. При этом на спектре уменьшается

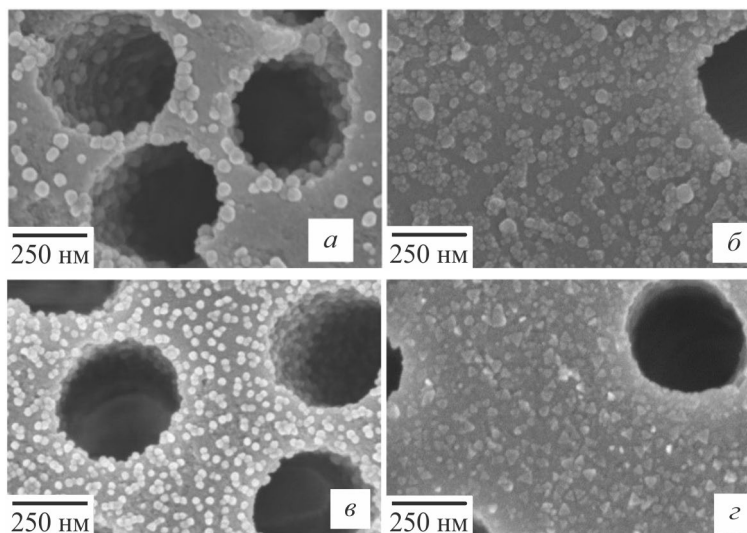


Рис. 3. Микрофотографии наночастиц серебра, полученные методом растровой электронной микроскопии. Образцы со сферическими наночастицами получены методом: *а* — цитратного синтеза, *б* — электроискрового синтеза, *в* — в присутствии циклодекстрина; *г* — образец с частицами треугольной формы получен в присутствии борогидрида натрия.

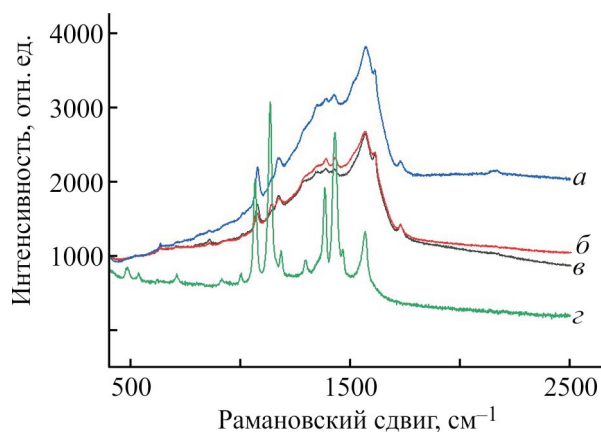


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света 4-аминофенола на поверхности трековой мембраны с наночастицами серебра.

Образцы со сферическими наночастицами получены методом: *a* — цитратного синтеза, *b* — электроискрового синтеза, *в* — в присутствии циклодекстрина; *г* — образец с частицами треугольной формы получен в присутствии борогидрида натрия.

общий фон и увеличивается аналитический сигнал тестового вещества (рис. 4, *г*) относительно спектров других образцов (рис. 4, *a–в*).

Выводы

Комбинация синтезированных наночастиц серебра и трековых мембран, модифицированных полиэтиленимином, позволила получить композитный материал, способный проявлять эффект гигантского комбинационного рассеяния света. Наибольшие значения относительного коэффициента усиления были получены для образцов со сферическими наночастицами, синтезированными цитратным методом, и на образцах с треугольными наночастицами серебра. Таким образом, полученные гибридные трековые мембраны могут быть с успехом использованы в качестве подложки при создании сенсорных устройств.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-65-00015, <https://rscf.ru/project/24-65-00015/> в рамках проекта Объединенного института ядерных исследований «Радиационное материаловедение, нанотехнологические и биомедицинские исследования с пучками тяжелых ионов» (шифр 07-5-1131-2017).

Конфликт интересов

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

Информация о вкладе авторов

В. К. Кабарухин и Д. И. Юренков проводили синтез и спектральные исследования наночастиц серебра; Е. В. Андреев и И. Н. Фадейкина получали образцы сенсорного материала на основе трековых мембран и наночастиц серебра, проводили исследования этих образцов; А. Н. Нечаев предложил идею, разработал концепцию работы и схему эксперимента, проводил обобщение результатов исследований.

Информация об авторах

Фадейкина Ирина Николаевна, к.т.н.
ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5094-6760>
Андреев Евгений Валерьевич
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6924-2622>
Юренков Даниил Игоревич
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6306-7528>
Кабарухин Василий Константинович
ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4134-7019>
Нечаев Александр Николаевич, к.х.н.
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5138-4265>

Список литературы

- [1] *Еремينا О. Е., Семенова А. А., Сергеева Е. А., Браже Н. А., Максимов Г. В., Шеховцова Т. Н., Гудилин Е. А., Веселова И. А.* Спектроскопия комбинационного рассеяния в современном химическом анализе: достижения и перспективы использования // *Успехи химии*. 2018. Т. 87. № 8. С. 741–770. <https://doi.org/10.1070/RCR4804>
[*Eremina O. E., Semenova A. A., Sergeeva E. A., Brazhe N. A., Maksimov G. V., Shekhovtsova T. N., Goodilin E. A., Veselova I. A.* Surface-enhanced Raman spectroscopy in modern chemical analysis: Advances and prospects // *Russ. Chem. Rev.* 2018. V. 87 (8). P. 741–770. <https://doi.org/10.1070/RCR4804>].
- [2] *Yaraki M., Tan Y.* Metal nanoparticles-enhanced biosensors: Synthesis, design and applications in fluorescence enhancement and surface-enhanced Raman scattering // *Chemistry — An Asian J.* 2020. V. 15. N 20. P. 3180–3208. <https://doi.org/10.1002/asia.202000847>
- [3] *Криставчук О. В., Никифоров И. В., Кукушкин В. И., Нечаев А. Н., Анель П. Ю.* Имобилизация наночастиц серебра электроискровым методом на поверх-

- ности трековых мембран // Коллоид. журн. 2017. Т. 79. № 5. С. 596–605.
<https://doi.org/10.7868/S0023291217050093>
 [Kristavchuk O. V., Nikiforov I. V., Nechaev A. N., Apel P. Y., Kukushkin V. I. Immobilization of silver nanoparticles obtained by electric discharge method on a track membrane surface // Colloid J. 2017. V. 79. N 5. P. 637–646.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X17050088>].
- [4] Pryshchepa O., Pomastowski P., Buszewski B. Silver nanoparticles: Synthesis, investigation techniques, and properties // Adv. Colloid Interface Sci. 2020. V. 284. ID 102246. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102246>
- [5] Криставчук О. В., Сохацкий А. С., Козловский В. И., Ской В. В., Куклин А. И., Трофимов В. В., Слепцов В. В., Нечаев А. Н., Апель П. Ю. Структурные характеристики и ионный состав коллоидного раствора наночастиц серебра, полученного методом электроискрового разряда в воде // Коллоид. журн. 2021. Т. 83. № 4. С. 423–435.
<https://doi.org/10.31857/S0023291221040042>
 [Kristavchuk O. V., Sohaty A. S., Skoi V. V., Kuklin A. I., Trofimov V. V., Nechaev A. N., Apel P. Y., Kozlovskiy V. I., Sleptsov V. V. Structural characteristics and ionic composition of a colloidal solution of silver nanoparticles obtained by electrical-spark discharge in water // Colloid J. 2021. V. 83. N 4. P. 448–460.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X21040049>].
- [6] Оленин А. Ю., Лисичкин Г. В. Получение и применение химически модифицированных наночастиц благородных металлов (обзор) // ЖПХ. 2018. Т. 91. № 9. С. 1219–1240.
<https://doi.org/10.1134/S0044461818090013>
 [Olenin A. Y., Lisichkin G. V. Preparation and use of chemically modified noble metal nanoparticles // Russ. J. Appl. Chem. 2018. V. 91. N 9. P. 1393–1411.
<https://doi.org/10.1134/S107042721809001X>].
- [7] Lee P. C., Meisel D. Adsorption and surface-enhanced Raman of dyes on silver and gold sols // J. Phys. Chem. 1982. V. 86. N 17. P. 3391–3395.
<https://doi.org/10.1021/j100214a025>
- [8] Bi S., Zhang F., Yang B., Liu J., Liu X., Niu Sh., Wang Y. Novel silver nanoparticles modified by β -cyclodextrin and TiO_2 as a SERS substrate for ultrasensitive detection of sisomicin // J. Mol. Struct. 2024. V. 1301. ID 137402. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.137402>
- [9] Фурлетов А. А., Апыри В. В., Гаршев А. В., Толмачева В. В., Дмитриенко С. Г., Волков П. А. Сорбция треугольных нанопластинок серебра на пенополиуретане // ЖФХ. 2018. Т. 92. № 2. С. 318–322.
<https://doi.org/10.7868/S0044453718020061>
 [Furletov A. A., Apyari V. V., Garshev A. V., Tolmacheva V. V., Dmitrienko S. G., Volkov P. A. Sorption of triangular silver nanoplates on polyurethane foam // J. Phys. Chem. A. 2018. V. 92. N 2. P. 357–360.
<https://doi.org/10.1134/S0036024418020061>].
- [10] Niemeyer C. M. Nanoparticles, proteins, and nucleic acids: Biotechnology meets materials science // Angewandte Chemie. Int. Ed. 2001. V. 40. N 22. P. 4128–4158. [https://doi.org/10.1002/1521-3773\(20011119\)40:22<4128::AID-ANIE4128>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/1521-3773(20011119)40:22<4128::AID-ANIE4128>3.0.CO;2-S)
- [11] Саббатковский К. Г., Виленский А. И., Соболев В. Д., Кочнев Ю. К., Мchedlishvili Б. В. Электроповерхностные и структурные свойства трековых мембран на основе полиэтилентерефталата // Коллоид. журн. 2012. Т. 74. № 3. С. 353–358.
<https://doi.org/10.1134/S1061933X12010139>
 [Sabbatovskii K. G., Sobolev V. D., Vilenskii A. I., Kochnev Y. K., Mchedlishvili B. V. Electrosurface and structural properties of poly(ethylene terephthalate) track membranes // Colloid J. 2012. V. 74. N 3. P. 328–333. <https://doi.org/10.1134/S1061933X12010139>].
- [12] Tiwari A., Gupta M., Pandey G., Pandey Sh. Pandey P. Amine-functionalized silver nanoparticles: A potential antiviral-coating material with trap and kill efficiency to combat viral dissemination (COVID-19) // Biomed. Mater. & Devices. 2022. V. 1. P. 618–632.
<https://doi.org/10.1007/s44174-022-00044-x>
- [13] Морозов А. С., Бессонов И. В., Даванков В. А. Экстрагенты ионов тяжелых металлов на основе сшитого полиэтиленimina // ЖФХ. 2019. Т. 93. № 7. С. 1089–1096.
<https://doi.org/10.1134/S0044453719070197>
 [Morozov A. S., Bessonov I. V., Davankov V. A. Heavy-metal ion extracting agents based on crosslinked polyethylenimine // Russ. J. Phys. Chem. 2019. V. 93. N 7. P. 1382–1388.
<https://doi.org/10.1134/S0036024419070197>].
- [14] Терентьева Е. А., Апыри В. В., Кочук Е. В., Дмитриенко С. Г., Золотов Ю. А. Применение наночастиц серебра в спектрофотометрии // ЖАХ. 2017. Т. 72. № 11. С. 978–999.
<https://doi.org/10.7868/S0044450217110020>
 [Terenteva E. A., Apyari V. V., Kochuk E. V., Dmitrienko S. G., Zolotov Y. A. Use of silver nanoparticles in spectrophotometry // J. Anal. Chem. 2017. V. 72. N 11. P. 1138–1154.
<https://doi.org/10.1134/S1061934817110107>].