

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 547-13: 544-72

**АДСОРБЦИЯ ЛИПОЕВОЙ КИСЛОТЫ НА ПОВЕРХНОСТИ СЕРЕБРА:
КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ И СТРОЕНИЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ
МОНОСЛОЕВ**

**Валентина Дмитриевна Должикова¹, Юлия Геннадиевна Богданова²,
Елена Кимовна Белоглазкина³**

¹⁻³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, химический факультет

Автор, ответственный за переписку: Юлия Геннадиевна Богданова, yulibogd@yandex.ru

Аннотация. Методами пьезоэлектрического микровзвешивания и смачивания изучена кинетика адсорбции липоевой кислоты на поверхности серебра. Установлен полислойный характер адсорбции. Определены оптимальные условия образования моно- и бислоя липоевой кислоты на твердой поверхности. Полученные результаты позволяют прогнозировать использование наночастиц серебра в качестве носителей лекарственных веществ в биомедицинских приложениях.

Ключевые слова: липоевая кислота, адсорбция, пьезоэлектрическое микровзвешивание, смачивание, поверхностная энергия

Финансирование. Работа выполнена по госбюджетной тематике НИР (Номер ЦИТИС: 121031300084-1).

Для цитирования: Должикова В.Д., Богданова Ю.Г., Белоглазкина Е.К. Адсорбция липоевой кислоты на поверхности серебра: кинетика образования и строение самоорганизующихся монослоев // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 3. С. 205–212.

ORIGINAL ARTICLE

**ADSORPTION OF LIPOIC ACID ON THE SURFACE OF SILVER:
THE KINETICS OF FORMATION AND STRUCTURE
OF SELF-ASSEMBLED MONOLAYERS**

Valentina D. Dolzhikova¹, Yulia G. Bogdanova², Elena K. Beloglazkina³

¹⁻³ Lomonosov Moscow State University, Chemistry Department

Corresponding author: Yulia G. Bogdanova, yulibogd@yandex.ru

Annotation. The kinetics of lipoic acid adsorption on the silver surface has been studied by the methods of quartz crystal microbalance and wetting. The multilayer nature of adsorption has been established. The optimal conditions for the formation of a mono- and bilayer of lipoic acid on a solid surface have been determined. The results obtained make it possible to predict the use of silver nanoparticles as carriers of lipophobic drugs in biomedical applications.

Keywords: lipoic acid, adsorption, quartz crystal microbalance, wetting, surface energy

Financial Support: The work was carried out on the state budget subject of research (CITIS number: 121031300084-1).

For citation: Dolzhikova V.D., Bogdanova Y.G., Beloglazkina E.K. Adsorption of Lipoic Acid on the Surface of Silver: the Kinetics of Formation and Structure of Self-Assembled Monolayers // Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. T. 63. N 3. P. 205–212.

Монослои тиолов и дисульфидов с различными терминальными функциональными группами, самоорганизующиеся на поверхности металлов, исследуются уже более 40 лет [1–3]. Интерес к их изучению связан с возможностью получать с помощью таких монослоев системы с заданными свойствами, от которых зависят транспорт заряда, а также биологическая, химическая и фотохимическая активность. Комплексообразование концевых групп алкантиолов с ионами переходных металлов дает возможность получить ион-селективные электроды и закрепленные катализаторы – металлокомплексные поверхности [4, 5]. С другой стороны, адсорбция тиолов и дисульфидов на поверхности наночастиц благородных металлов, в частности серебра, может быть использована для транспортной доставки нерастворимых в воде серо-содержащих лекарственных веществ в живой организм при лечении и диагностике различных заболеваний [6–8]. Доставка должна осуществляться в биодоступной форме, которая определяется растворимостью лекарственного вещества в воде и его способностью проникать через клеточные мембраны. Так как большинство лекарственных веществ плохо растворяется в воде, проблема доставки может быть решена с помощью наноразмерных носителей, в том числе и твердых. В свою очередь, эффективность иммобилизации лекарственного средства на твердый носитель во многом определяется его адсорбцией на поверхности носителя [8].

Экспериментальная часть

В работе изучена кинетика адсорбции липоевой кислоты (Лк) на поверхности серебра. Липоевая кислота (1,2-этиолианд-3-пентановая кислота) – нерастворимый в воде циклический дисульфид, обладающий антиоксидантными свойствами (рис. 1). Также Лк используется в качестве антидепрессанта и входит в состав многих витаминных комплексов. Биодоступность Лк при пероральном применении составляет ~30% [9].

В работе использовали липоевую кислоту производства «Sigma-Aldrich» (чистота $\geq 98,0\%$ (HPLC), молекулярная масса $M = 206,33$ г/моль). Адсорбцию Лк из ее растворов в метаноле определяли при концентрации $c = 10^{-3}$ М в зависимо-

сти от времени контакта поверхности серебра с раствором. Согласно литературным данным, эта концентрация оптимальна для изучения кинетики адсорбции алкилмеркаптанов из растворов на твердой поверхности, которая позволяет выявить разные стадии формирования адсорбционного слоя на подложке [10].

Для определения адсорбции Лк на поверхности серебра использовали разработанную нами ранее комплексную методику, которая включает измерение на одних и тех же образцах адсорбции на поверхности металла высокочувствительным методом пьезоэлектрического микровзвешивания и краевых углов различных жидкостей для контроля за формированием адсорбционного слоя на твердой поверхности (оценка степени заполнения поверхности, определение преимущественной ориентации молекул в адсорбционном слое и поверхностной энергии модифицирующих слоев) [11, 12].

Пьезоэлектрическое микровзвешивание (ПМ) – прямой гравиметрический метод, физическая основа которого заключается в том, что частота колебаний f кварцевой пластины резонатора (датчика пьезокварцевых микровесов) зависит от количества вещества m , нанесенного на его поверхность. При равномерном распределении вещества по поверхности резонатора зависимость частоты колебаний датчика микровесов от массы нанесенного определяется уравнением Зауэрбрея – ученого, классическая работа которого лежит в основании исследовании адсорбционных слоев методом ПМ [13]:

$$\Delta f = -C_f \cdot \Delta m, \quad (1)$$

где Δf – изменение частоты (Гц), Δm – изменение массы на единицу площади ($\text{г}/\text{см}^2$) чувствительной части резонатора (поверхности электрода), C_f – коэффициент массовой

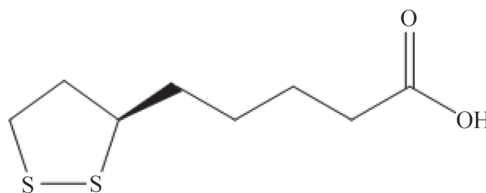


Рис. 1. Структурная формула липоевой кислоты

чувствительности, который находится расчетным путем, определяется свойствами кварца и собственной частотой колебаний резонатора f_0 . Пьезокварцевые резонаторы обычно выполняют в виде тонкого диска ($d = 5-16$ мм) из кристалла кварца, на обеих сторонах которого путем термического напыления сформированы электроды из различных металлов – золота, серебра, алюминия, хрома, платины. Чувствительная к массе область кварцевой пластинки ограничена площадью электрода. Высокая чувствительность (до 10^{-12} г) метода пьезоэлектрического микровзвешивания позволяет измерять адсорбцию в области малых концентраций растворов. Корректность метода ПМ при измерении адсорбции ПАВ на твердых поверхностях подтверждена другими методами определения адсорбции [11, 14].

В работе использовали кварцевые резонаторы АТ-среза с серебряными электродами толщиной 200 нм и собственной частотой колебаний $f_0 = 5$ МГц. Для таких резонаторов коэффициент массовой чувствительности $S_f = 2,27 \cdot 10^6 \cdot f_0^2 = 56,75 \cdot 10^6$, Гц·см²/г [11, 12]. Площадь поверхности электрода $\sim 0,5$ см².

Измерения адсорбции проводили следующим образом. Вначале измеряли собственную частоту колебаний f_0 резонаторов до установления постоянного значения f_0 . Затем резонаторы

выдерживали в течение различных промежутков времени (от 1 мин до 24 ч) в растворах липоевой кислоты в метаноле (10^{-3} М), после чего образцы промывали несколько раз в метаноле и высушивали на воздухе в течение 2 ч. После высушивания измеряли частоту колебаний f резонаторов с адсорбционным слоем липоевой кислоты. Постоянное значение f устанавливалось в течение 2 ч. Затем рассчитывали величину адсорбции Γ (г/см²) по уравнению:

$$\Gamma = -1,76 \cdot \Delta f \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

используя величину $\Delta f = f - f_0$ (при адсорбции вещества на поверхности датчика микровесов его частота колебаний уменьшается). Измерения частоты колебаний резонаторов проводили с помощью электронно-счетного частотомера «ЧЗ 54» в термостатированной камере при температуре 20 °С с точностью ± 1 Гц. Точность определения адсорбции составляет $\pm 10^{-8}$ г/см² или (с учетом молекулярной массы Лк) $\pm 0,5$ моль/м².

Достаточно большая площадь поверхности электрода резонаторов ($\sim 0,5$ см²) позволяет на тех же образцах измерять краевые углы, с помощью которых можно получить информацию о состоянии твердой поверхности (степень заполнения адсорбционным слоем и преимущественная ориентация молекул в нем, удельная

Т а б л и ц а 1

Характеристики тестовых жидкостей, краевые углы и удельная свободная поверхностная энергия адсорбционных слоев Лк на поверхности серебра

Поверхностное натяжение тестовых жидкостей $\sigma_{жг}$, мДж/м ²			
Жидкость	$\sigma_{жг}$	$\sigma_{жг}^d$	$\sigma_{жг}^p$
H ₂ O	72,6	21,8	50,8
CH ₂ J ₂	50,8	2,3	48,5
Краевые углы θ , град.			
монослой		бислой	
θ (H ₂ O)	15	40	
θ (CH ₂ J ₂)	10	20	
Поверхностная энергия $\sigma_{тг}$, мДж/м ²			
$\sigma_{тг}^d$	35,2	35,6	
$\sigma_{тг}^p$	35,9	25,9	
$\sigma_{тг}$	71,1	61,5	

свободная поверхностная энергия модифицирующих слоев) [15, 16].

В работе измеряли краевые углы натекания θ_a – при нанесении с помощью микрошприца капли воды на поверхность и краевые углы оттекания θ_r – при подведении пузырька воздуха к поверхности, находящейся в воде. Объем капли (пузырька) составлял 2 мкл. Величина гистерезиса краевых углов $\Delta\theta = (\theta_a - \theta_r)$ при разной степени заполнения поверхности серебра адсорбционным слоем характеризует степень однородности подложки [17]. Измерение краевых углов проводили в закрытых кюветках при комнатной температуре для 2–3 капель (пузырьков).

Степень заполнения поверхности серебра адсорбционным слоем Лк рассчитывали на основании теории смачивания гетерогенных поверхностей по уравнению Ребиндера–Касси–Бакстера, в соответствии с которым величина краевого угла θ на гетерогенной поверхности определяется соотношением [16, 17]:

$$\cos \theta = X \cos \theta_1 + (1 - X) \cos \theta_2, \quad (3)$$

где θ_1 и θ_2 – краевые углы воды на однородных поверхностях типа 1 и 2; X и $(1 - X)$ – доля площади, занимаемой участками 1 и 2, соответственно. При расчете величины X принимали $\theta_1 = 10^\circ$ – краевой угол воды на монослое тиола с концевыми карбоксильными группами [18], $\theta_2 = 70^\circ$ – краевой угол воды на исходной поверхности серебряных электродов кварцевых резонаторов.

Удельную свободную поверхностную энергию $\sigma_{\text{тр}}$ поверхности серебра, модифицированной адсорбционными слоями Лк, с учетом вклада дисперсионной ($\sigma_{\text{тр}}^d$) и недисперсионной ($\sigma_{\text{тр}}^p$) составляющих $\sigma_{\text{тр}} = \sigma_{\text{тр}}^d + \sigma_{\text{тр}}^p$ [19] рассчитывали на основе молекулярной теории смачивания в рамках приближения Оуэнса–Вендта–Кабли [20] с использованием краевых углов θ_1 и θ_2 двух тестовых жидкостей (воды и йодистого метилена, CH_2I_2) с известными значениями поверхностного натяжения $\sigma_{\text{жг}(1)}$ и $\sigma_{\text{жг}(2)}$, а также его дисперсионной $\sigma_{\text{жг}}^d$ и полярной $\sigma_{\text{жг}}^p$ составляющих [21] (табл. 1). Расчет проводили путем решения системы уравнений (4) [19]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{жг}} (1 + \cos \theta_1) &= \\ &= 2(\sigma_{\text{жг}(1)}^d \cdot \sigma_{\text{тр}}^d)^{1/2} + 2(\sigma_{\text{жг}(1)}^p \cdot \sigma_{\text{тр}}^p)^{1/2}; \\ \sigma_{\text{жг}} (1 + \cos \theta_2) &= \\ &= 2(\sigma_{\text{жг}(2)}^d \cdot \sigma_{\text{тр}}^d)^{1/2} + 2(\sigma_{\text{жг}(2)}^p \cdot \sigma_{\text{тр}}^p)^{1/2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Точность определения поверхностной энергии ($\sigma_{\text{тр}}$) составляет $\pm 0,8$ мДж/м².

Этот подход широко используется для определения поверхностной энергии твердых тел, адсорбционных слоев поверхностно-активных веществ на твердых подложках, самоорганизующихся монослоев органических молекул на твердой поверхности, органических пленок [12, 17, 22].

Обсуждение результатов

На поверхности серебряных электродов краевые углы натекания и оттекания воды составили 70° и 68° соответственно. Наблюдаемый незначительный гистерезис смачивания ($\Delta\theta = (\theta_a - \theta_r) = 2^\circ$), свидетельствует о чистоте и однородности поверхности серебряного электрода.

Исследования кинетики адсорбции алкантиолов и дисульфидов на поверхности металлов показали, что процесс образования монослоев на твердой поверхности условно можно разделить на два этапа: первый – адсорбция Ленгмюра на поверхности, и второй – структурирование слоя на поверхности, когда алкильные цепочки выстраиваются в определенном порядке (упорядочивание монослоя). При этом в зависимости от типа лиганда и концентрации раствора продолжительность первого этапа может составлять от одной минуты до одного часа и более, а продолжительность второго этапа – десятки часов [10].

Адсорбция Лк на поверхность серебра происходит за счет дисульфидного фрагмента, входящего в пятичленный цикл (рис. 1). В результате взаимодействия образуется ковалентная связь Me–S с одновременным разрывом связи S–S в цикле дисульфида Лк [2].

Зависимость адсорбции Лк на поверхности серебра от времени контакта с раствором представлена на рис. 2. При $t < 10$ мин заметной самоорганизации дисульфида на поверхности серебра не обнаружено (табл. 2): датчик микровесов не фиксирует изменения частоты его колебаний. Это означает, что существует инкубационный период, в течение которого адсорбции Лк на поверхности серебра не происходит или она чрезвычайно мала (меньше предела чувствительности метода при измерении адсорбции в этих условиях). При $t \geq 10$ мин происходит увеличение адсорбции, кинетическая кривая имеет точку перегиба при $t = 3$ ч и выходит на плато при $t = 5$ ч, что свидетельствует о полислоном характере адсорбции (рис. 2).

Можно полагать, что монослойное заполнение поверхности серебра дисульфидом завер-

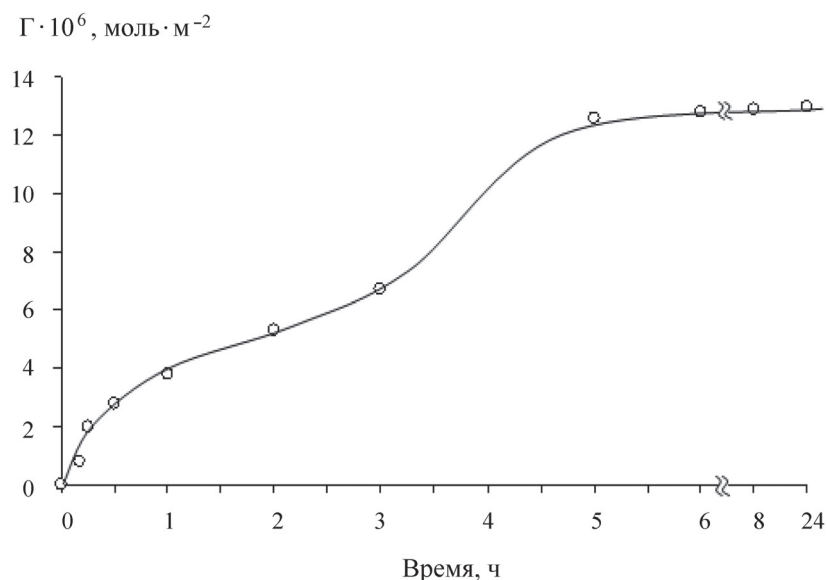


Рис. 2. Зависимость адсорбции Лк на поверхности серебра от времени

Таблица 2

Адсорбция липоевой кислоты на поверхности серебра в зависимости от времени (t) контакта поверхности с раствором

Время (t)	5 мин	10 мин	15 мин	30 мин	1 ч	2 ч	3 ч	5 ч	6 ч	8 ч	24 ч
–Δf, Гц	–	0,9	2,3	3,3	4,5	6,2	7,8	14,8	14,8	14,9	15,1
$\Gamma \cdot 10^8, \text{ г/см}^2$	–	1,6	4,1	5,8	7,9	10,9	13,7	26,0	26,0	26,2	26,6
$\Gamma \cdot 10^6, \text{ моль/м}^2$	–	0,8	2,0	2,8	3,8	5,3	6,7	12,6	12,6	12,6	12,9

шается через три часа после контакта твердой поверхности с раствором. При $t = 3$ ч величина адсорбции Лк $\Gamma = 6,7 \cdot 10^{-6}$ моль/м², что соответствует величине площади на 1 молекулу Лк в адсорбционном слое $S_m = 1/(\Gamma \cdot N_A) = 0,26 \text{ нм}^2$, которая близка по значению к размерам площади дисульфидной (S–S) группы. Таким образом, на поверхности серебра образуется насыщенный монослой Лк. Эти результаты согласуются с расчетом степени заполнения поверхности серебра дисульфидом (табл. 3). При $t = 3$ ч практически вся поверхность серебра заполнена адсорбционным слоем, степень заполнения поверхности $X = 97\%$. Это означает, что при $t = 3$ ч на поверхности серебра образуется плотный монослой липоевой кислоты, при этом наружная часть монослоя образована полярными карбоксильными группами, которые хорошо смачиваются водой: $\theta = 15^\circ$ (табл. 1).

При $t > 3$ ч начинает формироваться второй слой липоевой кислоты за счет образования водородных связей между концевыми карбоксильными группами молекул монослоя на поверхности серебра и карбоксигруппами молекул Лк в растворе (рис. 3). Формирование бислоя завершается через 5 ч, его наружная часть образована SH-группами, которые смачиваются водой хуже, чем карбоксильные группы: краевой угол воды составляет 40° (табл. 1). Эти результаты согласуются с данными работы [18]: формирование бислоев вследствие возникновения водородных связей установлено при самоорганизации тиолов с концевыми карбоксильными и аминокислотными группами на поверхности золота. При бислойном заполнении поверхности серебра величина адсорбции в 2 раза превышает значение предельной адсорбции Лк при монослойном заполнении подложки.

Результаты измерений краевых углов воды (θ_a и θ_r) на поверхности серебра и расчета степени ее заполнения X адсорбционным слоем при увеличении времени контакта серебра с раствором Лк представлены в табл. 3. По мере заполнения поверхности серебра адсорбционным слоем гистерезис краевых углов $\Delta\theta = (\theta_a - \theta_r)$ уменьшается и практически равен нулю при времени модифицирования $t = 3$ ч. Зависимость $\Delta\theta(t)$ демонстрирует увеличение степени однородности адсорбционных слоев Лк при переходе от небольших степеней модифицирования к монослойному заполнению поверхности серебра. При этом по мере формирования монослоя на поверхности серебра происходит гидрофилизация подложки.

Удельная свободная поверхностная энергия серебряной подложки при моно- и бислойном заполнении ее поверхности адсорбционным слоем Лк была рассчитана в рамках приближения Вендта–Оуэнса–Кабли (ур. 4, табл. 1).

Поверхностная энергия адсорбционных слоев Лк (моно- и бислой) отличается за счет разницы вкладов в ее величину полярной состав-

ляющей, что связано с различной химической природой концевых групп слоев: полярные карбоксильные группы лучше смачиваются по сравнению с $-\text{SH}$ -группами. Однако в обоих случаях при формировании адсорбционных слоев происходит значительное снижение удельной свободной поверхностной энергии серебра, которая, согласно литературным данным, составляет 1140 мДж/м^2 [23].

Заключение

Полученные результаты показывают, что поверхность серебра эффективно адсорбирует липовую кислоту, при этом в зависимости от времени контакта с модифицирующим раствором может быть реализовано монослойное и даже бислойное заполнение поверхности твердого носителя адсорбционным слоем. Эти результаты могут быть востребованы в связи с широким применением наночастиц благородных металлов (Au, Ag) в медицине и фармацевтике в качестве носителей лекарств при диагностике и лечении болезней [6, 7]. Для адресной доставки лекарственных веществ возможно использова-

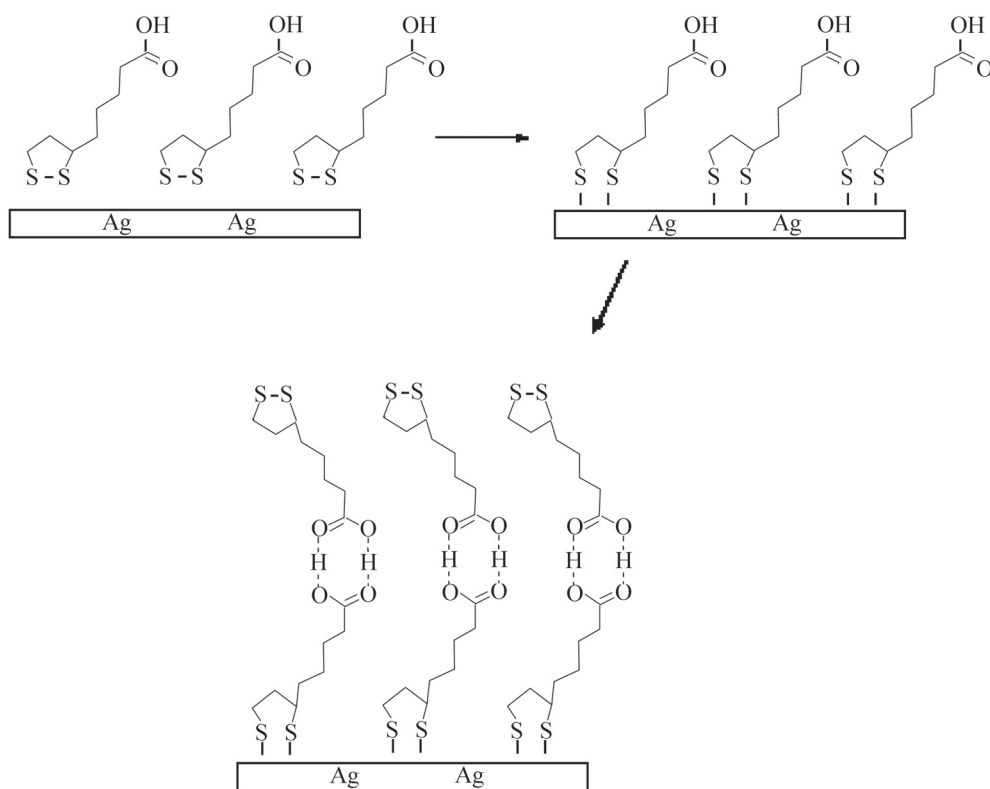


Рис. 3. Схема формирования адсорбционных слоев Лк на поверхности серебра (пунктиром обозначены водородные связи)

Т а б л и ц а 3

Краевые углы воды на модифицированной поверхности серебра при разном времени ее контакта с поверхностью

Показатель	Ag	Краевые углы θ , град. при разном времени контакта					
		10 мин	15 мин	30 мин	1 ч	2 ч	3 ч
θ_a	70	67	58	52	45	32	15
θ_r	68	55	51	47	42	30	14
$\Delta\theta = \theta_a - \theta_r$	2	12	7	5	3	2	1
X, %	0	8	30	42	58	78	97

ние ферромагнитных наночастиц серебра типа ядро – оболочка. Такого типа магнитные наночастицы были получены с широким спектром металлов [24], однако серебро и золото являют-

ся наиболее подходящими, что определяется их биодоступностью и возможностью функционализации поверхности серосодержащими лигандами [25].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Nuzzo R.G.; Allara D.L. // *J. Am. Chem. Soc.* 1983. Vol. 105. P.4481–4483. doi:10.1021/ja00351a063
- Ulman A. // *Chem. Rev.* 1996. Vol. 96. P. 1533–1554 (DOI:10.1021/cr9502357).
- Love J.Ch., Estroff L.A., Knebel J.K., Nuzzo R.G., Whitesides G.M. // *Chem. Rev.* 2005. Vol. 105. P. 1103–1170 (DOI: 10.1021/cr0300789).
- Wang N., Zhu L., Lei M., She Y., Gao M., Tang H. // *ACS Catal.* 2011. N 1. P. 1193–1202 (DOI: 10.1021/cs2002862).
- Должикова В.Д., Богданова Ю.Г., Мажуга А.Г., Белоглазкина Е.К., Кудринский А.А. // *Журн. физ. химии.* 2017. Т. 91. N. 3. С. 241–246 [Dolzhikova V.D., Bogdanova Yu.G., Maguga A.G., Beloglazkina E.K., Kudrinsky A.A.// *Rus. J. of Phys. Chem.* 2017. Vol. 91. N 2. P. 240–246] (DOI: 10.1134/S003602441702008X).
- Lah NAC, Samykano M., Trigueros S. // *Nanomed Res.* 2016. Vol. 4. N 2. P. 2202–2208 (doi: 10.15406/jnmr.2016.04.00086).
- Станишевская И.Е., Стойнова А.М., Марахова А.И., Станишевский Я.М. Разработка и регистрация лекарственных средств. 2016. N 14. С. 66–69.
- Задимова Н.М., Должикова В.Д., Харлов А.Е. // *Коллоид. журн.* 2020. Т. 82. N 4. С. 423–431 [Zadytova N. M., Dolzhikova V. D., Kharlov A. E. // *Colloid Journal.* 2020. Vol. 82. N 4. P. 376–383] (DOI: 10.1134/S1061933X20030151).
- Тутельян В.А., Махова А.А., Погожева А.С., Ших Е.В., Елизарова Е.В., Хотимченко С.А. // *Вопросы питания.* 2019. Vol. 88. N 4. P. 6–11.
- Bain C.D., Troughton E.B. // *J. Am. Chem. Soc.* 1989. Vol. 111. P. 321–335 (DOI:10.1021/ja00183a049).
- Богданова Ю.Г., Должикова В.Д., Бадун Г.А., Сумм Б.Д. // *Изв. АН. Сер. хим.* 2003. N 11. С. 2226–2232 [Bogdanova Yu.G., Dolzhikova V.D., Summ B.D. // *Chem. Bull.* 2003. T. 52. N 11. P. 2352–2359] (DOI: 10.1023/B:RUCB.0000012355.12717.86).
- Dolzhikova V.D., Bogdanova Yu.G. // *J. Colloid and Polymer Sci.* 2019. Vol. 297. N 3. P. 469–473 (DOI: 10.1007/s00396-018-4446-0).
- Sauerbrey G. // *Z. Physik.* 1959. Vol. 155. 206–222 (DOI: doi:10.1007/BF01337937).
- Крехова М.Г., Должикова В.Д., Сумм Б.Д., Богданова Ю.Г. // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 2. Химия.* 1995. Т. 36. N 6. С. 578–582.
- Laibinis P.E., Whitesides G.M., Allara D.L., Tao Yu-T., Parikh A.N., Nuzzo R.G. // *J. Am. Chem. Soc.* 1991. Vol. 115. P. 7152–7167 (DOI:10.1021/ja00019a011).
- Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В. *Физико-химические основы смачивания и растекания*, М.: Химия, 1979, 444 с.
- Genzer J., Efimenko K. // *Biofouling.* 2006. Vol. 22. P. 339–360 (DOI: 10.1080/08927010600980223).
- Wang H., Chen S., Li L., Jiang S. // *Langmuir.* 2005. Vol. 21. P. 2633–2636 (DOI: 10.1021/la046810w).
- Fowkes F.M. // *J. Colloid Interface Sci.* 1968. Vol. 28. P. 493–505 (DOI:10.1016/0021-9797(68)90082-9).
- Vojtechovska J., Kvitek L. // *Acta Univ. Palacky. Olomouc. Chemica* 44. 2005. P. 25–48.
- Carre A. // *J. Adhesion Sci. Technol.* 2007. Vol. 21. P. 961–981 (DOI: 10.1163/156856107781393875).
- Kloubek J. // *Adv. In Colloid and Interface Sci.* 1992. Vol. 38. P. 99–142 (DOI: doi.org/10.1016/0001-8686(92)80044-X).
- Wojciechowski K.F. // *Surf. Sci.* 1999. Vol. 437. P. 285–288 (DOI:10.1016/S0039-6028(99)00741-4).
- Garza-Navarro M., Torres-Castro A. // *J. of Solid State Chemistry.* 2010. N 1. P. 99–104 (DOI: 10.1016/j.jssc.2009.10.019).

25. Rudakovskaya P.O., Beloglazkina T.K., Majouga A.G., Zyk N.V. // *Mendeleev Commun.* 2010.

Vol. 20. N 3. P. 158–160 (DOI: 10.1016/j.mencom.2010.05.012).

Информация об авторах

Должикова Валентина Дмитриевна – вед. науч. сотр. кафедры коллоидной химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент, канд. хим. наук, valentinadolzh@mail.ru;

Богданова Юлия Геннадиевна – ст. науч. сотр. кафедры коллоидной химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, доцент, канд. хим. наук, yulibogd@yandex.ru;

Белоглазкина Елена Кимовна – профессор кафедры органической химии химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, докт. хим. наук, beloglazki@mail.ru.

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.09.2021;
одобрена после рецензирования 12.10.2021;
принята к публикации 14.10.2021.

Для цитирования: Бумагин Н.А. Магнитно-отделяемые многоразовые палладиевые катализаторы на основе никеля Ренея для реакции Соногаширы в водных средах // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 63. № 2. С. 213–221.*

For citation: Bumagin N.A. Magnetically Separated Reusable Palladium Catalysts Based on Renei Nickel for the Sonogashira Reaction in Aqueous Media // *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 2. Chemistry. T. 63. N 2. P. 213–221.*