

Оригинальная статья

УДК 54.052

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.191-208>**Электрохимическое осаждение анизотропных металлических покрытий из систем, содержащих ионы металла (Fe(II), Ni(II), Co(II)) и каликс[4]резорцин****И.Р. Низамеев^{1,2}✉, Г.Р. Низамеева³, Э.М. Лебедева^{1,3}, И.Р. Миронова¹**¹*Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань, Россия*²*Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*³*Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия*✉ inizameyev@iopcr.ru**Аннотация**

В настоящее время поиск альтернативных источников энергии, в том числе электрохимических, представляет актуальную задачу. Важным конструктивным элементом устройств выделения энергии являются функциональные электроды, которые обладают высокой удельной активной поверхностью и поперечной электропроводностью. В работе рассмотрена модификация электродов методом электрохимического осаждения из жидкой фазы для получения альтернативных источников энергии. В процессе модификации образуются ориентированные металлические сетки нанопроволок с высокоразвитой поверхностью вследствие их высокой анизотропии. Осаждение из супрамолекулярных систем, содержащих ионы металла и каликс[4]резорцин, обеспечивает высокую однородность нанесенного слоя сетки. Электрохимическая атомно-силовая микроскопия (ЭХ-АСМ) позволяет наблюдать формирование *in situ* анизотропной сетки на поверхности электрода. В работе изучен ряд комплексов ионов металлов (Fe(II), Ni(II), Co(II)) с тиофосфорилированными каликс[4]резорцинами, для каждого из которых определены электрохимические потенциалы восстановления и время осаждения. Для большинства изученных систем процесс электрохимического осаждения протекает с образованием наночастиц, которые объединяются в крупные агрегаты, после чего формируется сплошная пленка.

Ключевые слова: супрамолекулярные системы, каликсарены, металлические сети, модификация электродов, электрохимическое осаждение, атомно-силовая микроскопия, циклическая вольтамперометрия

Благодарности. Исследование выполнено в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для реализации крупных научных проектов по приоритетным направлениям развития науки и техники (075-15-2024-646).

Для цитирования: Низамеев И.Р., Низамеева Г.Р., Лебедева Э.М., Миронова И.Р. Электрохимическое осаждение анизотропных металлических покрытий из систем, содержащих ионы металла (Fe(II), Ni(II), Co(II)) и каликс[4]резорцин // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2026. Т. 168, кн. 2. С. 191–208. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.191-208>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.191-208>

Electrochemical deposition of anisotropic metallic coatings from systems containing metal ions (Fe(II), Ni(II), Co(II)) and calix[4]resorcinol

I.R. Nizameev^{1,2}✉, G.R. Nizameeva³, E.M. Lebedeva^{1,3}, I.R. Mironova¹

¹*Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center,
Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia*

²*Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia*

³*Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia*

✉ inizameyev@iopc.ru

Abstract

The quest for alternative energy sources, including electrochemical ones, has never been more critical. The key components in energy-releasing devices are functional electrodes, which have a large specific active surface area and high lateral electrical conductivity. This article considers the modification of electrodes by electrochemical deposition from the liquid phase as a promising strategy to obtain alternative electrochemical energy sources. The modification resulted in oriented metal nanowire networks with a developed surface area due to their high anisotropy. Using the deposition from supramolecular systems containing metal ions and calix[4]resorcinol, a high homogeneity of the applied network layer was achieved. The method of electrochemical atomic force microscopy (EC-AFM) was employed for *in situ* observation of the formation of the anisotropic network on the electrode surface. Several complexes of metal ions (Fe(II), Ni(II), Co(II)) with thiophosphorylated calix[4]resorcinols were investigated, and the electrochemical reduction potentials and deposition times were determined for each of them. For most of the studied systems, the electrochemical deposition proceeded with the formation of nanoparticles, which combined into large aggregates, producing a continuous film.

Keywords: supramolecular systems, calixarenes, metal networks, electrode modification, electrochemical deposition, atomic force microscopy, cyclic voltammetry

Acknowledgments. This study was funded by a grant from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for large scientific projects in priority areas of scientific and technological development (no. 075-15-2024-646).

For citation: Nizameev I.R., Nizameeva G.R., Lebedeva E.M., Mironova I.R. Electrochemical deposition of anisotropic metallic coatings from systems containing metal ions (Fe(II), Ni(II), Co(II)) and calix[4]resorcinol. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2026, vol. 168, no. 2, pp. 191–208. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.2.191-208>. (In Russian)

Введение

Получение и практическое применение наноматериалов является активно развивающимся направлением в науке и технике. Повышенное внимание к наноразмерным структурам, особенно нанопроводам, обусловлено их физико-химическими свойствами [1]. За последние десятилетия достигнут значительный прогресс в получении нанопроводов различными химическими методами. Для синтеза нанопроводов с контролируемой морфологией используют методы жестких и мягких шаблонов. В качестве жестких шаблонов хорошо зарекомендовал себя анодированный оксид алюминия (АОА) [2–5]. По такому принципу, например, синтезированы нанопровода серебра [5]. В методе мягких шаблонов в основном используют поверхностно-активные вещества, биополимеры и ионные жидкости [6–8]. Эффективным является и полиольный метод, основанный на восстановлении солей металлов в среде полиольного растворителя, обычно этиленгликоля, в присутствии блокирующего агента и восстановителя, что обеспечивает возможность контролируемого синтеза нанопроводов [9–13].

Одним из наиболее распространенных методов получения нанопроводов является электрохимическое осаждение, благодаря его доступности, высокой чистоте получаемых материалов и возможности регулирования длины наноструктур [14–16], а также экологичности процесса по сравнению с химическим методом осаждения, поскольку не требует использования агрессивных химических соединений. В работе [15] электрохимическим осаждением из водного раствора AgNO_3 с использованием шаблона АОА получены высокоупорядоченные нанопровода Ag. Контроль диаметра и толщины нанопроволок осуществляется за счет варьирования времени электроосаждения. Синтезированы нанопровода Ni с контролируемыми кристаллографическими, морфологическими и магнитными свойствами путем изменения потенциала осаждения [17]. Проведено электроосаждение нанопроводов Ni, Co, Fe с диаметром 250–300 нм на АОА матрице [18], а также нанопроволок Co на платиновой подложке с использованием раствора этиленгликоля, содержащего соли – предшественники металла [19]. Показано, что, изменяя значение плотности тока, можно управлять направлением роста нанопроводов Ni на АОА шаблоне [20]. На примере нанопроводов Co установлено, что потенциал электроосаждения оказывает влияние на кристаллографическую структуру и магнитные свойства полученного материала [21]. В работах [22, 23] показана зависимость магнитных свойств электроосажденных на АОА нанопроводов Fe от их пространственных параметров, в частности, увеличение коэрцитивной силы с ростом длины нанопроволок.

Нанопровода из магнитных металлов (Ni, Co, Fe) представляют собой ферромагнитные одномерные наноструктуры, обладающие уникальными магнитными свойствами, высоким соотношением сторон, большой площадью поверхности, повышенной проводимостью и механической гибкостью [24–26], что обуславливает возможности их потенциального применения в электронике [27, 28], магнитно-силовой микроскопии в качестве зондов [29], медицине в составе систем биомаркировки [30] и доставки лекарств [31], сенсорных системах как перспективного электродного материала [32], устройствах для хранения энергии [33, 34], а также в энергетике в качестве катализаторов [35–38].

Представляет интерес электрохимическое осаждение ориентированных сетей металлов из систем, содержащих ионы металлов и каликс[4]резорцины. Каликсарены рассматриваются как супрамолекулярные соединения, содержащие внутреннюю полость [39], что представляет интерес с точки зрения стабилизации наночастиц металлов. Показана пер-

спективность применения систем типа «наночастица–каликсарен» в катализе [40], молекулярном распознавании [41, 42], сенсорики [43] и т. д. за счет управляемой калликсаренами морфологии наночастиц. Тиофосфорилированные каликс[4]резорцины проявляют высокую комплексообразующую способность по отношению к ионам переходных металлов. В литературе представлено достаточно много примеров инкапсуляции и стабилизации наночастиц в жидкой среде [44–57], в результате чего удается синтезировать наночастицы с формами, близкими к идеальной сфере. При этом в некоторых случаях на границе раздела жидкость–твердое тело может наблюдаться самоорганизация супрамолекулярных систем в нитевидные структуры [8, 48].

Одним из востребованных направлений исследований является поиск альтернативных источников энергии, в том числе электрохимических, связанных с выделением водорода. Для этого необходимы функциональные электроды с высокой удельной активной поверхностью и поперечной электропроводностью. Для их создания следует обеспечить удельную каталитическую поверхность верхнего слоя и способность эффективного переноса заряда в поверхностном слое. С этой точки зрения интерес представляют анизотропные покрытия в виде ориентированных металлических сеток с высокоразвитой поверхностью [8, 48, 49]. В данной работе рассматривается модификация электродов методом электрохимического осаждения ориентированных металлических сеток с высокоразвитой поверхностью из жидкой фазы, содержащей комплекс иона металла с каликс[4]резорцином. Такой подход является масштабируемым и стандартизируемым способом получения модифицированных электродов. Электроосаждение осуществляли при различных потенциалах под контролем атомно-силовой микроскопии (АСМ), позволяющей наблюдать протекающие в приэлектродном пространстве процессы в высоком разрешении.

1. Материалы и методы

1.1. Объекты исследования. Для контролируемого роста ориентированных систем комплексов Co(II), Fe(II) и Ni(II) с калликсаренами использовали супрамолекулярную самосборку каликс[4]резорцинов, модифицированных тиофосфорильными группами [50, 51].

В работе использовали два типа каликс[4]резорцинов (рис. 1):

1) $01_CH_3-SPO_6-2CH_3$ с двумя гидроксильными и одной метильной группами по верхнему ободу и шестичленной тиофосфорильной группой в *n*-, *m*- или *o*-положениях по нижнему ободу ($01_CH_3-p-SPO_6-2CH_3$, $01_CH_3-m-SPO_6-2CH_3$, $01_CH_3-o-SPO_6-2CH_3$);

2) $02_CH_3-SPO_5$ с двумя гидроксильными и одной метильной группами по верхнему ободу и пятичленной тиофосфорильной группой в *n*-, *m*- или *o*-положениях по нижнему ободу ($02_CH_3-p-SPO_5$, $02_CH_3-m-SPO_5$, $02_CH_3-o-SPO_5$).

Каждый тип каликс[4]резорцинов смешивали в диметилформамиде (ДМФА) с солью металла ($Ni(BF_4)_2$, $Fe(BF_4)_2$, $CoCl_2$) в соотношении 1 : 1 для образования комплексов металл–каликс[4]резорцин ($c = 5$ мМ). Для первого типа каликс[4]резорцинов характерно образование двух конформаций: «конус» и «кресло», каждая из которых рассмотрена отдельно (табл. 1).

1.2. Циклическая вольтамперометрия (ЦВА). ЦВА-исследования проводили на потенциостате Р-45Х (Electrochemical Instruments, Россия) в стеклянной трехэлектродной ячейке. В качестве рабочего электрода использовали полированный стеклоуглеродный электрод диаметром 3 мм. Вспомогательным электродом служил платиновый электрод диаметром 1 мм, а электродом сравнения – насыщенный хлоридсеребряный электрод (Ag/AgCl).

Регистрацию циклических вольтамперограмм проводили в ДМФА на фоне 0.1 М тетрабутиламмоний тетрафторбората ($(C_4H_9)_4N^+BF_4^-$) в среде аргона при комнатной температуре и скорости развертки потенциала 50 мВ/с.

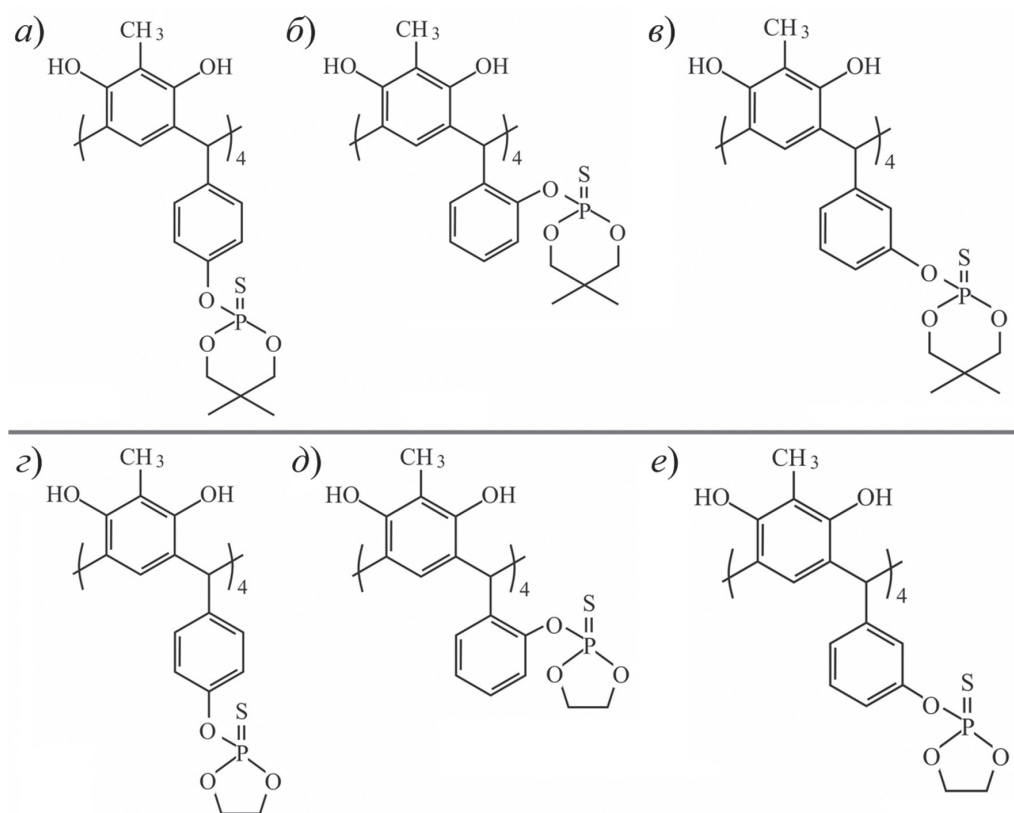


Рис. 1. Химические формулы каликс[4]резорцинов: 01_СН₃-*p*-SPO₆-2СН₃ (а); 01_СН₃-*o*-SPO₆-2СН₃ (б); 01_СН₃-*m*-SPO₆-2СН₃ (в); 02_СН₃-*p*-SPO₅ (г); 02_СН₃-*o*-SPO₅ (д); 02_СН₃-*m*-SPO₅ (е)

Fig. 1. Chemical formulas of calix[4]resorcinols: 01_СН₃-*p*-SPO₆-2СН₃ (а); 01_СН₃-*o*-SPO₆-2СН₃ (б); 01_СН₃-*m*-SPO₆-2СН₃ (в); 02_СН₃-*p*-SPO₅ (г); 02_СН₃-*o*-SPO₅ (д); 02_СН₃-*m*-SPO₅ (е)

Табл. 1. Краткое обозначение используемых каликс[4]резорцинов

Table 1. Abbreviations for calix[4]resorcinols used in this study

Краткое обозначение	Описание структуры каликс[4]резорцина
C1	01_СН ₃ - <i>o</i> -SPO ₆ -2СН ₃
C2	02_СН ₃ - <i>o</i> -SPO ₅
C3	02_СН ₃ - <i>p</i> -SPO ₅
C4	02_СН ₃ - <i>m</i> -SPO ₅
C5	01_СН ₃ - <i>m</i> -SPO ₆ -2СН ₃ (кресло)
C6	01_СН ₃ - <i>m</i> -SPO ₆ -2СН ₃ (конус)
C7	01_СН ₃ - <i>p</i> -SPO ₆ -2СН ₃ (конус)
C8	01_СН ₃ - <i>p</i> -SPO ₆ -2СН ₃ (кресло)

1.3. Метод электрохимической АСМ (ЭХ-АСМ) предполагает наличие совместимой с АСМ трехэлектродной электрохимической ячейки и потенциостата с аналого-цифровым преобразователем и цифровым интерфейсом управления, синхронизированного с микроскопом

с кадровой разверткой системы получения изображения. При выполнении измерений использовали сканирующий зондовый микроскоп MultiMode V (Veeco, США) с программным обеспечением “Nanoscope 7.30”, потенциостат «di NanoScope Universal Bipotentiostat» (Veeco, США), ячейку для ЭХ-АСМ (модель ММТМЕС), оптический микроскоп с увеличением 400×, подложку из высокоориентированного пирографита (ВОПГ). Схема ЭХ-АСМ ячейки представлена на рис. 2. Она сконструирована по трехэлектродной схеме: подложка, которая визуализируется методом АСМ, выступает в роли рабочего электрода; вспомогательный электрод – платиновая проволока; электрод сравнения – насыщенный хлоридсеребряный электрод (Ag/AgCl). Рабочий объем используемой электрохимической ячейки составлял 1 мл.

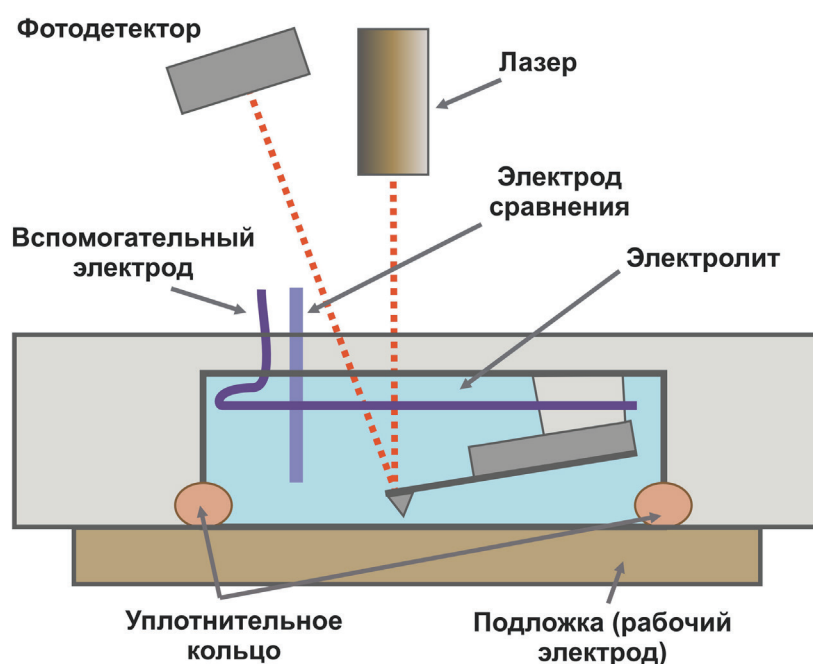


Рис. 2. Схема электрохимической ячейки для ЭХ-АСМ

Fig. 2. Schematic diagram of the EC-AFM electrochemical cell

Измерения проводили в инертной атмосфере аргона. Для этого в ячейку вносили исследуемый раствор и выдерживали в течение 20 мин до установления равновесия в системе. Затем проводили сканирование поверхности рабочего электрода в контактном режиме АСМ, после чего на рабочий электрод-подложку накладывали определенный потенциал и проводили повторное АСМ-сканирование в течение всего процесса электрохимического осаждения. Для сканирования использовались кантилеверы NP-S10 (Veeco instruments Inc., США) с номинальным коэффициентом жесткости 0.12 Н/м.

2. Результаты и их обсуждение

Электроосаждение металлов из комплексов осуществляли потенциостатически под контролем АСМ. Особенность электроосаждения нанопроводов металлов заключается в образовании поликристаллических структур при низких и высоких потенциалах электровосстановления и формировании преимущественно (или в наибольшем количестве) монокристаллов при промежуточных потенциалах (примерно -1.5 В ... -1.7 В отн. Ag/AgCl). Аналогичные результаты получены при электроосаждении нанопроводов магнитных металлов [45]. При электрохимическом синтезе структур с заданной морфологией важную

роль играет время электролиза. Малое время осаждения приводит к неравномерному и неполному заполнению целевой подложки-электрода рассматриваемыми комплексами, а при большом времени электролиза образуется сплошное покрытие без морфологической анизотропии. Поэтому для оптимизации времени электроосаждения необходим *in situ* мониторинг процесса. Для контролируемого роста ориентированных систем комплексов Co(II), Fe(II) и Ni(II) использована супрамолекулярная самосборка систем на основе тиофосфоридированных каликс[4]резорцинов. С целью установления условий формирования ориентированных металлических покрытий предварительно были зарегистрированы циклические вольтамперограммы для рассматриваемых комплексов (рис. 3).

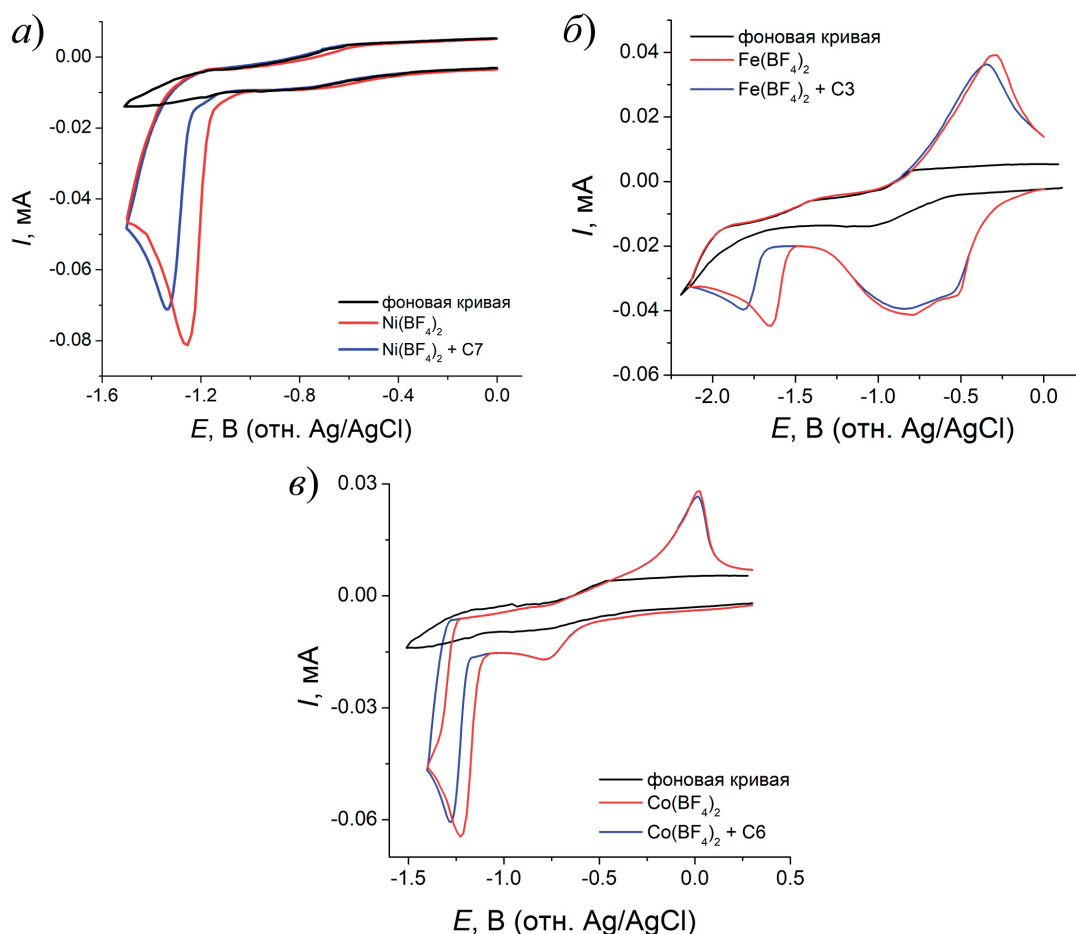


Рис. 3. Типичные циклические вольтамперограммы комплексов на примере Ni(II) + C7 (а), Fe(II) + C3 (б) и Co(II) + C6 (в) ($c = 5$ mM) в 0.1 M $(C_4H_9)_4N^+BF_4^-$ в ДМФА, скорость сканирования потенциала 50 мВ/с

Fig. 3. Typical cyclic voltammograms of the complexes, using Ni(II) + C7 (a), Fe(II) + C3 (b), and Co(II) + C6 (c) as examples ($c = 5$ mM), in 0.1 M $(C_4H_9)_4N^+BF_4^-$ in DMF, potential scan rate 50 mV/s

На циклических вольтамперограммах $Ni(BF_4)_2$ наблюдается двухэлектронный необратимый пик восстановления $Ni^{2+} \rightarrow Ni^0$ при потенциале -1.25 В. Для комплексов Ni(II) с тиофосфорилированными каликс[4]резорцинами на вольтамперограммах наблюдается некоторое смещение потенциала пика восстановления либо в более отрицательную, либо в более положительную область в зависимости от типа каликс[4]резорцина, обусловленное образованием связи Ni^{2+} с тиофосфорилированной группой макроцикла. Например, для системы Ni(II) + C7 (рис. 3, а) пик восстановления наблюдается при потенциале -1.33 В.

Для CoCl_2 катодный пик проявляется при -1.22 В, а для комплекса $\text{Co(II)} + \text{C6}$ пик смещается до -1.27 В (рис. 3, в). Как видно из рис. 3, б, пик восстановления комплекса $\text{Fe(II)} + \text{C3}$ приходится на -1.76 В, тогда как для $\text{Fe(BF}_4)_2$ он составляет -1.65 В. Аналогичным образом установлены потенциалы восстановления для всех исследуемых комплексов.

На следующем этапе исследования проведено осаждение металлических покрытий в условиях ЭХ-АСМ и оценено влияние времени электролиза на форму образующихся агрегатов. Для визуального подтверждения образования наночастиц использована гладкая подложка-электрод из ВОПГ, поверхность которой имеет низкую шероховатость на достаточно большой площади (рис. 4). Средняя шероховатость R_a поверхности на площади 10×10 мкм² составляет всего 1.6 нм. Топографическая гистограмма поверхности ВОПГ приведена на рис. 4, б.

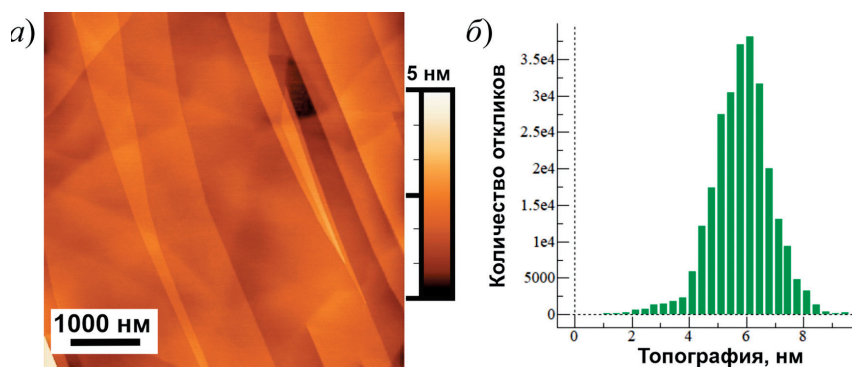


Рис. 4. АСМ изображение поверхности рабочего электрода из ВОПГ (а) и топографическая гистограмма (б)

Fig. 4. AFM image of the HOPG working electrode surface (a) and topographic histogram (b)

В результате большого числа проведенных экспериментов по электроосаждению металлов для ряда комплексов ($\text{Fe(II)} + \text{C3}$, $\text{Ni(II)} + \text{C7}$, $\text{Co(II)} + \text{C6}$, $\text{Co(II)} + \text{C3}$) удалось выявить условия, обеспечивающие направленный рост нанокластеров (рис. 5).

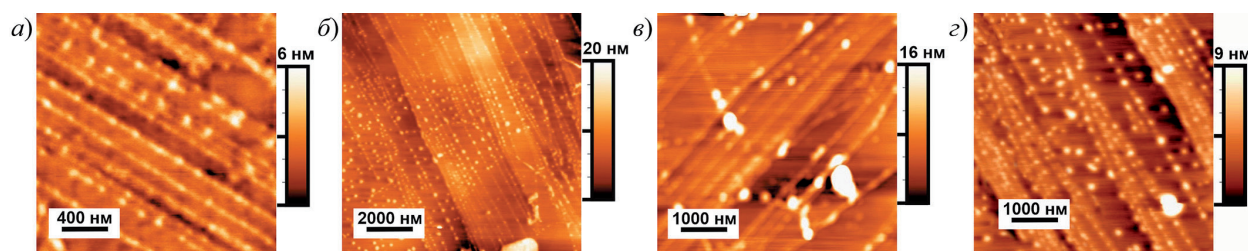


Рис. 5. АСМ изображения структур, образовавшихся на поверхности рабочего электрода ЭХ-АСМ ячейки в результате электроосаждения из комплексов $\text{Fe(II)} + \text{C3}$ (а), $\text{Ni(II)} + \text{C7}$ (б), $\text{Co(II)} + \text{C6}$ (в) и $\text{Co(II)} + \text{C3}$ (г)

Fig. 5. AFM images of structures formed on the surface of the working electrode in the EC-AFM cell by electrochemical deposition from the complexes of $\text{Fe(II)} + \text{C3}$ (a), $\text{Ni(II)} + \text{C7}$ (b), $\text{Co(II)} + \text{C6}$ (c), and $\text{Co(II)} + \text{C3}$ (d)

Для большинства изученных систем процесс электрохимического осаждения протекает по схеме «образование наночастиц – объединение наночастиц в крупные агрегаты – образование сплошной пленки». Добиться анизотропии на начальных стадиях роста наноструктур не удастся (рис. 6). Можно предположить, что это вызвано образованием на границе раздела подложка – раствор супрамолекулярных структур различной формы в зависимости

от структуры тиофосфорилированного каликс[4]резорцина (рис. 1). В ряде случаев образуются ориентированные цепочки отдельных частиц (рис. 6, а–в), а в других – добиться какой-либо анизотропии не удастся (рис. 6, г–е).

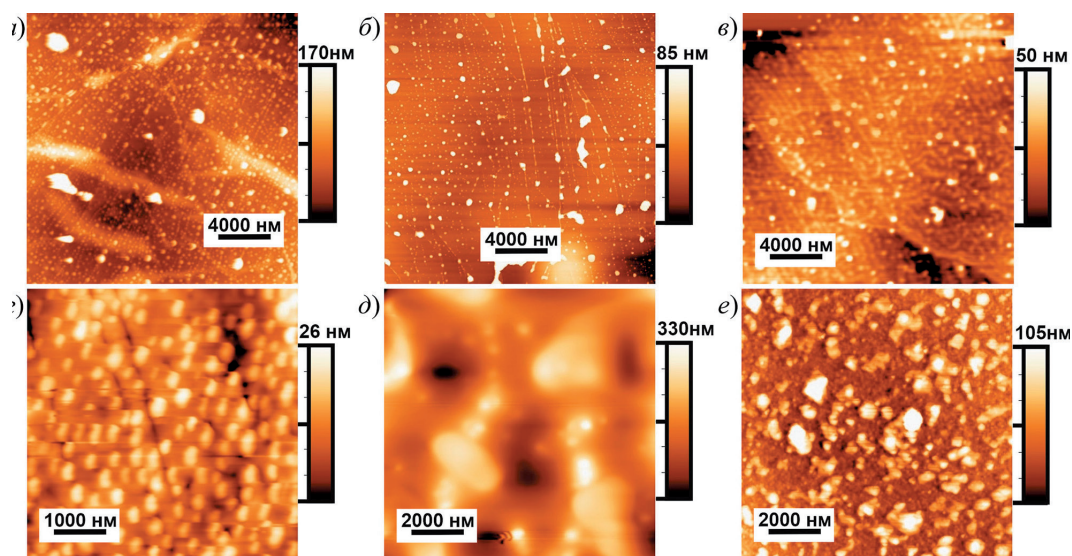


Рис. 6. АСМ изображения структур, образовавшихся на поверхности рабочего электрода ЭХ-АСМ ячейки в результате электроосаждения из комплексов Fe(II) + C5 (а), Fe(II) + C7 (б), Fe(II) + C1 (в), Fe(II) + C8 (г), Co(II) + C5 (д) и Co(II) + C1 (е)

Fig. 6. AFM images of structures formed on the surface of the working electrode in the EC-AFM cell by electrochemical deposition from the complexes of Fe(II) + C5 (a), Fe(II) + C7 (b), Fe(II) + C1 (c), Fe(II) + C8 (d), Co(II) + C5 (e), and Co(II) + C1 (f)

Структура металлорганического комплекса оказывает сильное влияние на морфологию формирующегося металлического покрытия. Условия электрохимического осаждения металлов из всех исследованных комплексов и морфология образующихся покрытий систематизированы в табл. 2, в которой НЧ – наночастицы, НП – система нанопроводов, а МКНЧ – массив крупных частиц с мультимодальным распределением, а сумма отдельных типов описывает смешанные типы морфологии.

Табл. 2. Условия электроосаждения металлов из комплексов ионов металлов с тиофосфорилированными каликс[4]резорцинами и морфология образующихся наноструктур

Table 2. Conditions for metal electrodeposition from the complexes of metal ions with thiophosphorylated calix[4]resorcinols and morphology of nanostructures that were formed

Комплекс	Потенциал электроосаждения, В (отн. Ag/AgCl)	Время электроосаждения, с	Морфология по данным ЭХ-АСМ
1	2	3	4
Ni(II) + C1	–1.31	140	НЧ
Ni(II) + C2	–1.33	150	НЧ
Ni(II) + C3	–1.36	140	НЧ + НП
Ni(II) + C4	–1.35	140	НЧ
Ni(II) + C5	–1.28	140	НЧ
Ni(II) + C6	–1.29	140	НЧ
Ni(II) + C7	–1.33	140	НЧ + НП
Ni(II) + C8	–1.3	150	НЧ

Окончание табл. 2 / End of Table 2

1	2	3	4
Ni(II)	-1.25	140	НЧ
Fe(II) + C1	-1.7	180	НЧ + НП
Fe(II) + C2	-1.71	180	НЧ
Fe(II) + C3	-1.76	180	НП
Fe(II) + C4	-1.72	180	НЧ
Fe(II) + C5	-1.63	180	НЧ + НП
Fe(II) + C6	-1.69	180	НЧ + МКНЧ + НП
Fe(II) + C7	-1.73	180	НЧ + МКНЧ + НП
Fe(II) + C8	-1.72	180	НЧ
Fe(II)	-1.65	180	НЧ
Co(II) + C1	-1.26	120	НЧ
Co(II) + C2	-1.27	120	НЧ
Co(II) + C3	-1.31	120	НП
Co(II) + C4	-1.3	120	НЧ
Co(II) + C5	-1.24	120	Пленка
Co(II) + C6	-1.27	120	НП
Co(II) + C7	-1.28	120	НЧ
Co(II) + C8	-1.27	120	НЧ
Co(II)	-1.22	120	НЧ

Заключение

В работе рассмотрено электрохимическое осаждение ориентированных металлических сеток из супрамолекулярных систем ионов металлов с тиофосфорилированными каликс[4] резорцинами. С помощью ЭХ-АСМ показана возможность реализации контролируемого роста наноструктур на электродной поверхности. Показано, что природа макроцикла и условия электроосаждения оказывают влияние на морфологию формирующихся наноструктур, которые представлены наночастицами, нанопроводами, а также системами ориентированных сеток нановолокон с включениями отдельных частиц. Полученные покрытия в зависимости от морфологии могут найти применение при решении различных задач, например, в создании гетерогенных катализаторов электрохимического выделения водорода, катализаторов реакции электровосстановления кислорода, электропроводящих прозрачных покрытий и др.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. *Shahzad A., Khan I.A., Manzoor A., Kashif M., Ahsan M., He M., Razzokov J.* Synthesis of nickel nanowires (Ni-NWs) as high ferromagnetic material by electrodeposition technique // *Heliyon*. 2023. V. 9, No 1. Art. e12576. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12576>.
2. *Arefpour M., Kashi M.A., Barzoki F.K., Noormohammadi M., Ramazani A.* Electrodeposited metal nanowires as transparent conductive electrodes: Their release conditions, electrical

- conductivity, optical transparency and chemical stability // *Mater. Des.* 2018. V. 157. P. 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.048>.
3. *Liang C., Terabe K., Tsuruoka T., Osada M., Hasegawa T., Aono M.* AgI/Ag heterojunction nanowires: Facile electrochemical synthesis, photoluminescence, and enhanced ionic conductivity // *Adv. Funct. Mater.* 2007. V. 17, No 9. P. 1466–1472. <https://doi.org/10.1002/adfm.200600590>.
 4. *Zhang C., Li C., Si X., He Z., Qi J., Feng J., Cao J.* Single-crystalline silver nanowire arrays directly synthesized onto substrates by template-assisted chemical wetting // *Materialia*. 2020. V. 9. Art. 100529. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100529>.
 5. *Song M., Zhou X., He X., Cao H., Liu J., Qiu H., Jin Z.* Distance dependent fluorescence enhancement of silver nanowires deposited on AAO // *Opt. Mater.* 2018. V. 83. P. 241–244. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.06.022>.
 6. *Jones M.R., Osberg K.D., Macfarlane R.J., Langille M.R., Mirkin C.A.* Templated techniques for the synthesis and assembly of plasmonic nanostructures // *Chem. Rev.* 2011. V. 111, No 6. P. 3736–3827. <https://doi.org/10.1021/cr1004452>.
 7. *Kim T.Y., Kim W.J., Hong S.H., Kim J.E., Suh K.S.* Ionic-liquid-assisted formation of silver nanowires // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2009. V. 48, No 21. P. 3806–3809. <https://doi.org/10.1002/anie.200806379>.
 8. *Kadirov M.K., Nizameev I.R., Zakharova L.Ya.* Platinum nanoscale lattice on a graphite surface using cetyltrimethylammonium bromide hemi- and precylindrical micelle templates // *J. Phys. Chem. C*. 2012. V. 116, No 20. P. 11326–11335. <https://doi.org/10.1021/jp211826x>.
 9. *Низамеева Г.Р., Низамеев И.Р., Кадиров М.К.* Определение типа проводимости композиционного оптически прозрачного проводящего покрытия на основе ориентированных сетей платины // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. 2023. Т. 165, кн. 1. С. 23–36. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.1.23-36>.
 10. *Nizameev I.R., Nizameeva G.R., Faizullin R.R., Kadirov M.K.* Oriented nickel nanonetworks and their submicron fibres as a basis for a transparent electrically conductive coating // *ChemPhysChem*. 2021. V. 22, No 3. P. 288–292. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000876>.
 11. *Fiévet F., Ammar-Merah S., Brayner R., Chau F., Giraud M., Mammeri F., Peron J., Piquemal J.-Y., Sicard L., Viau G.* The polyol process: A unique method for easy access to metal nanoparticles with tailored sizes, shapes and compositions // *Chem. Soc. Rev.* 2018. V. 47, No 14. P. 5187–5233. <https://doi.org/10.1039/C7CS00777A>.
 12. *Yun H.D., Seo D.M., Lee M.Y., Kwon S.Y., Park L.S.* Effective synthesis and recovery of silver nanowires prepared by tapered continuous flow reactor for flexible and transparent conducting electrode // *Metals*. 2016. V. 6, No 1. Art. 14. <https://doi.org/10.3390/met6010014>.
 13. *Hemmati S., Harris M.T., Barkey D.P.* Polyol silver nanowire synthesis and the outlook for a green process // *J. Nanomater.* 2020. V. 2020, No 1. Art. 9341983. <https://doi.org/10.1155/2020/9341983>.
 14. *Sousa C.T., Leitao D.C., Proenca M.P., Ventura J., Pereira A.M., Araujo J.P.* Nanoporous alumina as templates for multifunctional applications // *Appl. Phys. Rev.* 2014. V. 1, No 3. Art. 031102. <https://doi.org/10.1063/1.4893546>.
 15. *Sun X.-Y., Xu F.-Q., Li Z.-M., Zhang W.-H.* Cyclic voltammetry for the fabrication of high dense silver nanowire arrays with the assistance of AAO template // *Mater. Chem. Phys.* 2005. V. 90, No 1. P. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2004.10.007>.
 16. *Овчинникова К.В., Бобрикова И.Г., Жукова И.Ю., Куц А.А., Дегтярь Л.А.* Кинетика электроосаждения композиционного электрохимического покрытия никель-кобальт-оксид алюминия // *Электрохимия*. 2024. Т. 60, № 4. С. 253–261. <https://doi.org/10.31857/S0424857024040019>.
 17. *Proenca M.P., Sousa C.T., Ventura J., Vazquez M., Araujo J.P.* Ni growth inside ordered arrays of alumina nanopores: Enhancing the deposition rate // *Electrochim. Acta*. 2012. V. 72. P. 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.04.036>.

18. Qin J., Nogués J., Mikhaylova M., Roig A., Muñoz J.S., Muhammed M. Differences in the magnetic properties of Co, Fe, and Ni 250–300 nm wide nanowires electrodeposited in amorphous anodized alumina templates // *Chem. Mater.* 2005. V. 17, No 7. P. 1829–1834. <https://doi.org/10.1021/cm047870q>.
19. Panzeri G., Accogli A., Gibertini E., Varotto S., Rinaldi C., Nobili L., Magagnin L. Electrodeposition of cobalt thin films and nanowires from ethylene glycol-based solution // *Electrochem. Commun.* 2019. V. 103. P. 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.04.012>.
20. Yu Y., Li J., Wang J., Wu X., Yu C., Xu T., Chang B., Sun H., Arandiyana H. Orientation growth and magnetic properties of electrochemical deposited nickel nanowire arrays // *Catalysts*. 2019. V. 9, No 2. Art. 152. <https://doi.org/10.3390/catal9020152>.
21. Irshad M.I., Mohamed N.M., Abdullah M.Z., Saheed M.S.M., Mumtaz A., Yasar M., Yar A., Zeeshan M.A., Sort J. Influence of the electrodeposition potential on the crystallographic structure and effective magnetic easy axis of cobalt nanowires // *RSC Adv.* 2016. V. 6, No 17. P. 14266–14272. <https://doi.org/10.1039/C6RA01311B>.
22. Elmekawy A.H.A., Iashina E., Dubitskiy I., Sotnichuk S., Bozhev I., Kozlov D., Napolskii K., Menzel D., Mistonov A. Magnetic properties of ordered arrays of iron nanowires: The impact of the length // *J. Magn. Magn. Mater.* 2021. V. 532. Art. 167951. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167951>.
23. Elmekawy A.H.A., Iashina E.G., Dubitskiy I.S., Sotnichuk S.V., Bozhev I.V., Napolskii K.S., Menzel D., Mistonov A.A. Magnetic properties and FORC analysis of iron nanowire arrays // *Mater. Today Commun.* 2020. V. 25. Art. 101609. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101609>.
24. Zamani Kouhpanji M.R., Stadler B.J.H. Magnetic nanowires for nanobarcoding and beyond // *Sensors*. 2021. V. 21, No 13. Art. 4573. <https://doi.org/10.3390/s21134573>.
25. Кованова М.А., Дербенева П.Д., Постнов А.С., Тихомирова Т.В., Ващурич А.С., Койфман О.И. Электрокаталитические свойства водорастворимых фталоцианинатов никеля(II) и меди(II) в реакции окисления гидроксид-ионов // *Электрохимия*. 2024. Т. 60, № 6. С. 408–414. <https://doi.org/10.31857/S0424857024060036>.
26. Li Y., Cheng H., Wang N., Zhou Y., Li T. Magnetic and microwave absorption properties of Fe/TiO₂ nanocomposites prepared by template electrodeposition // *J. Alloys Compd.* 2018. V. 763. P. 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.282>.
27. Muscas G., Jönsson P.E., Serrano I.G., Vallin Ö., Kamalakar M.V. Ultralow magnetostrictive flexible ferromagnetic nanowires // *Nanoscale*. 2021. V. 13, No 12. P. 6043–6052. <https://doi.org/10.1039/D0NR08355K>.
28. Fernández-González C., Guedeja-Marrón A., Rodilla B.L., Arché-Nuñez A., Corcuera R., Lucas I., González M.T., Varela M., de la Presa P., Aballe L., Pérez L., Ruiz-Gómez S. Electrodeposited magnetic nanowires with radial modulation of composition // *Nanomaterials*. 2022. V. 12, No 15. Art. 2565. <https://doi.org/10.3390/nano12152565>.
29. Alotaibi S., Samba J., Pokharel S., Lan Y., Uradu K., Afolabi A., Unlu I., Basnet G., Aslan K., Flanders B.N., Lisfi A., Ozturk B. Individually grown cobalt nanowires as magnetic force microscopy probes // *Appl. Phys. Lett.* 2018. V. 112, No 9. Art. 092401. <https://doi.org/10.1063/1.4997310>.
30. Zhou W., Um J., Zhang Y., Nelson A.P., Nemati Z., Modiano J., Stadler B., Franklin R. Development of a biolabeling system using ferromagnetic nanowires // *IEEE J. Electromagn., RF Microwaves Med. Biol.* 2019. V. 3, No 2. P. 134–142. <https://doi.org/10.1109/JERM.2018.2889049>.
31. Pondman K.M., Bunt N.D., Maijenburg A.W., van Wezel R.J.A., Kishore U., Abelman L., ten Elshof J.E., ten Haken B. Magnetic drug delivery with FePd nanowires // *J. Magn. Magn. Mater.* 2015. V. 380. P. 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.101>.
32. Hussain M., Nisar A., Qian L., Karim S., Khan M., Liu Y., Sun H., Ahmad M. Ni and Co synergy in bimetallic nanowires for the electrochemical detection of hydrogen peroxide // *Nanotechnology*. 2021. V. 32, No 20. Art. 205501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abe4fb>.
33. Yu K., Pan X., Zhang G., Liao X., Zhou X., Yan M., Xu L., Mai L. Nanowires in energy storage devices: Structures, synthesis, and applications // *Adv. Energy Mater.* 2018. V. 8, No 32. Art. 1802369. <https://doi.org/10.1002/aenm.201802369>.

34. Pendashteh A., Palma J., Anderson M., Marcilla R. Nanostructured porous wires of iron cobaltite: Novel positive electrode for high-performance hybrid energy storage devices // *J. Mater. Chem. A*. 2015. V. 3, No 32. P. 16849–16859. <https://doi.org/10.1039/C5TA02701B>.
35. Liu X.-J., Sun Y.-D., Yin X., Jia C., Ma M., Chen Y. Enhanced methanol electrooxidation over defect-rich Pt-M (M = Fe, Co, Ni) ultrathin nanowires // *Energy Fuels*. 2020. V. 34, No 8. P. 10078–10086. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01850>.
36. Li K., Li X., Huang H., Luo L., Li X., Yan X., Ma C., Si R., Yang J., Zeng J. One-nanometer-thick PtNiRh trimetallic nanowires with enhanced oxygen reduction electrocatalysis in acid media: Integrating multiple advantages into one catalyst // *J. Am. Chem. Soc.* 2018. V. 140, No 47. P. 16159–16167. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b08836>.
37. Mao J., Chen W., He D., Wan J., Pei J., Dong J., Wang Y., An P., Jin Z., Xing W., Tang H., Zhuang Z., Liang X., Huang Y., Zhou G., Wang L., Wang D., Li Y. Design of ultrathin Pt-Mo-Ni nanowire catalysts for ethanol electrooxidation // *Sci. Adv.* 2017. V. 3, No 8. Art. e1603068. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1603068>.
38. Guo S., Li D., Zhu H., Zhang S., Markovic N.M., Stamenkovic V.R., Sun S. FePt and CoPt nanowires as efficient catalysts for the oxygen reduction reaction // *Angew. Chem., Int. Ed.* 2013. V. 52, No 12. P. 3465–3468. <https://doi.org/10.1002/anie.201209871>.
39. Kongor A.R., Mehta V.A., Modi K.M., Panchal M.K., Dey S.A., Panchal U.S., Jain V.K. Calix-based nanoparticles: A review // *Top. Curr. Chem.* 2016. V. 374, No 3. Art. 28. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0029-z>.
40. de Silva N., Ha J.-M., Solovyov A., Nigra M.M., Ogino I., Yeh S.W., Durkin K.A., Katz A. A bioinspired approach for controlling accessibility in calix[4]arene-bound metal cluster catalysts // *Nat. Chem.* 2010. V. 2, No 12. P. 1062–1068. <https://doi.org/10.1038/nchem.860>.
41. Baghayeri M., Namadchian M., Karimi-Maleh H., Beitollahi H. Determination of nifedipine using nanostructured electrochemical sensor based on simple synthesis of Ag nanoparticles at the surface of glassy carbon electrode: Application to the analysis of some real samples // *J. Electroanal. Chem.* 2013. V. 697. P. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2013.03.011>.
42. Guerrini L., Garcia-Ramos J.V., Domingo C., Sanchez-Cortes S. Functionalization of Ag nanoparticles with dithiocarbamate calix[4]arene as an effective supramolecular host for the surface-enhanced Raman scattering detection of polycyclic aromatic hydrocarbons // *Langmuir*. 2006. V. 22, No 26. P. 10924–10926. <https://doi.org/10.1021/la062266a>.
43. Bhatt K.D., Vyas D.J., Makwana B.A., Darjee S.M., Jain V.K. Highly stable water dispersible calix[4]pyrrole octa-hydrazide protected gold nanoparticles as colorimetric and fluorometric chemosensors for selective signaling of Co(II) ions // *Spectrochim. Acta, Part A*. 2014. V. 121. P. 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.10.076>.
44. Balasubramanian R., Kim B., Tripp S.L., Wang X., Lieberman M., Wei A. Dispersion and stability studies of resorcinarene-encapsulated gold nanoparticles // *Langmuir*. 2002. V. 18, No 9. P. 3676–3681. <https://doi.org/10.1021/la0156107>.
45. Wei A., Kim B., Pusztay S.V., Tripp S.L., Balasubramanian R. Resorcinarene-encapsulated nanoparticles: Building blocks for self-assembled nanostructures // *J. Inclusion Phenom. Macrocyclic Chem.* 2001. V. 41, Nos 1–4. P. 83–86. <https://doi.org/10.1023/A:1014472212238>.
46. Patel G., Menon S. Recognition of lysine, arginine and histidine by novel *p*-sulfonatocalix[4]arene thiol functionalized gold nanoparticles in aqueous solution // *Chem. Commun.* 2009. No 24. P. 3563–3565. <https://doi.org/10.1039/B905141D>.
47. Pescatori L., Boccia A., Ciesa F., Rossi F., Grillo V., Arduini A., Pochini A., Zanoni R., Secchi A. The effect of ligand denticity in size-selective synthesis of calix[n]arene-stabilized gold nanoparticles: A multitechnique approach // *Chem. – Eur. J.* 2010. V. 16, No 36. P. 11089–11099. <https://doi.org/10.1002/chem.201001039>.
48. Nizameev I.R., Kadirov M.K., Semyonov V.A., Zakharova L.Ya., Ismaev T.I., Safiullin R.A., Rizvanov I.Kh., Babaev V.M. Palladium 1D nanoscale aggregates on a graphite surface using

CTAB hemicylindrical micelle templates // Dalton Trans. 2016. V. 45, No 27. P. 11035–11041. <https://doi.org/10.1039/C6DT01234E>.

49. Nizameev I., Nizameeva G., Kadirov M. Transparent conductive layer based on oriented platinum networks // ChemistrySelect. 2019. V. 4, No 46. P. 13564–13568. <https://doi.org/10.1002/slct.201904293>.
50. Kadirov M.K., Knyazeva I.R., Nizameev I.R., Safullin R.A., Matveeva V.I., Kholin K.V., Khrizanforova V.V., Ismaev T.I., Burilov A.R., Budnikova Yu.H., Sinyashin O.G. Oxygen reduction reaction catalyzed by nickel complexes based on thiophosphorylated calix[4]resorcinols and immobilized in the membrane electrode assembly of fuel cells // Dalton Trans. 2016. V. 45, No 41. P. 16157–16161. <https://doi.org/10.1039/C6DT02881K>.
51. Khrizanforova V.V., Knyazeva I.R., Matveeva Sokolova V.I., Nizameev I.R., Gryaznova T.V., Kadirov M.K., Burilov A.R., Sinyashin O.G., Budnikova Y.H. Nickel complexes based on thiophosphorylated calix[4]resorcinols as effective catalysts for hydrogen evolution // Electrocatalysis. 2015. V. 6, No 4. P. 357–364. <https://doi.org/10.1007/s12678-015-0251-4>.

References

1. Shahzad A., Khan I.A., Manzoor A., Kashif M., Ahsan M., He M., Razzokov J. Synthesis of nickel nanowires (Ni-NWs) as high ferromagnetic material by electrodeposition technique. *Heliyon*, 2023, vol. 9, no. 1, art. e12576. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12576>.
2. Arefpour M., Kashi M.A., Barzoki F.K., Noormohammadi M., Ramazani A. Electrodeposited metal nanowires as transparent conductive electrodes: Their release conditions, electrical conductivity, optical transparency and chemical stability. *Mater. Des.*, 2018, vol. 157, pp. 326–336. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.07.048>.
3. Liang C., Terabe K., Tsuruoka T., Osada M., Hasegawa T., Aono M. AgI/Ag heterojunction nanowires: Facile electrochemical synthesis, photoluminescence, and enhanced ionic conductivity. *Adv. Funct. Mater.*, 2007, vol. 17, no. 9, pp. 1466–1472. <https://doi.org/10.1002/adfm.200600590>.
4. Zhang C., Li C., Si X., He Z., Qi J., Feng J., Cao J. Single-crystalline silver nanowire arrays directly synthesized onto substrates by template-assisted chemical wetting. *Materialia*, 2020, vol. 9, art. 100529. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100529>.
5. Song M., Zhou X., He X., Cao H., Liu J., Qiu H., Jin Z. Distance dependent fluorescence enhancement of silver nanowires deposited on AAO. *Opt. Mater.*, 2018, vol. 83, pp. 241–244. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2018.06.022>.
6. Jones M.R., Osberg K.D., Macfarlane R.J., Langille M.R., Mirkin C.A. Templated techniques for the synthesis and assembly of plasmonic nanostructures. *Chem. Rev.*, 2011, vol. 111, no. 6, pp. 3736–3827. <https://doi.org/10.1021/cr1004452>.
7. Kim T.Y., Kim W.J., Hong S.H., Kim J.E., Suh K.S. Ionic-liquid-assisted formation of silver nanowires. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2009, vol. 48, no. 21, pp. 3806–3809. <https://doi.org/10.1002/anie.200806379>.
8. Kadirov M.K., Nizameev I.R., Zakharova L.Ya. Platinum nanoscale lattice on a graphite surface using cetyltrimethylammonium bromide hemi- and precylindrical micelle templates. *J. Phys. Chem. C*, 2012, vol. 116, no. 20, pp. 11326–11335. <https://doi.org/10.1021/jp211826x>.
9. Nizameeva G.R., Nizameev I.R., Kadirov M.K. Determination of a transparent conductive composite coating's conductivity type based on oriented platinum networks. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2023, vol. 165, no. 1, pp. 23–36. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2023.1.23-36>. (In Russian)
10. Nizameev I.R., Nizameeva G.R., Faizullin R.R., Kadirov M.K. Oriented nickel nanonetworks and their submicron fibres as a basis for a transparent electrically conductive coating. *ChemPhysChem*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 288–292. <https://doi.org/10.1002/cphc.202000876>.
11. Fiévet F., Ammar-Merah S., Brayner R., Chau F., Giraud M., Mammeri F., Peron J., Piquemal J.-Y., Sicard L., Viau G. The polyol process: A unique method for easy access to metal nanoparticles with tailored sizes, shapes and compositions. *Chem. Soc. Rev.*, 2018, vol. 47, no. 14, pp. 5187–5233. <https://doi.org/10.1039/C7CS00777A>.

12. Yun H.D., Seo D.M., Lee M.Y., Kwon S.Y., Park L.S. Effective synthesis and recovery of silver nanowires prepared by tapered continuous flow reactor for flexible and transparent conducting electrode. *Metals*, 2016, vol. 6, no. 1, art. 14. <https://doi.org/10.3390/met6010014>.
13. Hemmati S., Harris M.T., Barkey D.P. Polyol silver nanowire synthesis and the outlook for a green process. *J. Nanomater.*, 2020, vol. 2020, no. 1, art. 9341983. <https://doi.org/10.1155/2020/9341983>.
14. Sousa C.T., Leitao D.C., Proenca M.P., Ventura J., Pereira A.M., Araujo J.P. Nanoporous alumina as templates for multifunctional applications. *Appl. Phys. Rev.*, 2014, vol. 1, no. 3, art. 031102. <https://doi.org/10.1063/1.4893546>.
15. Sun X.-Y., Xu F.-Q., Li Z.-M., Zhang W.-H. Cyclic voltammetry for the fabrication of high dense silver nanowire arrays with the assistance of AAO template. *Mater. Chem. Phys.*, 2005, vol. 90, no. 1, pp. 69–72. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2004.10.007>.
16. Ovchinnikova K.V., Bobrikova I.G., Zhukova I.Yu., Kuts A.A., Degtyar L.A. Kinetics of electrodeposition of nickel–cobalt–alumina composite electrochemical coating. *Russ. J. Electrochem.*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 245–251. <https://doi.org/10.1134/S1023193524040074>.
17. Proenca M.P., Sousa C.T., Ventura J., Vazquez M., Araujo J.P. Ni growth inside ordered arrays of alumina nanopores: Enhancing the deposition rate. *Electrochim. Acta*, 2012, vol. 72, pp. 215–221. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.04.036>.
18. Qin J., Nogués J., Mikhaylova M., Roig A., Muñoz J.S., Muhammed M. Differences in the magnetic properties of Co, Fe, and Ni 250–300 nm wide nanowires electrodeposited in amorphous anodized alumina templates. *Chem. Mater.*, 2005, vol. 17, no. 7, pp. 1829–1834. <https://doi.org/10.1021/cm047870q>.
19. Panzeri G., Accogli A., Gibertini E., Varotto S., Rinaldi C., Nobili L., Magagnin L. Electrodeposition of cobalt thin films and nanowires from ethylene glycol-based solution. *Electrochem. Commun.*, 2019, vol. 103, pp. 31–36. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2019.04.012>.
20. Yu Y., Li J., Wang J., Wu X., Yu C., Xu T., Chang B., Sun H., Arandiyani H. Orientation growth and magnetic properties of electrochemical deposited nickel nanowire arrays. *Catalysts*, 2019, vol. 9, no. 2, art. 152. <https://doi.org/10.3390/catal9020152>.
21. Irshad M.I., Mohamed N.M., Abdullah M.Z., Saheed M.S.M., Mumtaz A., Yasar M., Yar A., Zeeshan M.A., Sort J. Influence of the electrodeposition potential on the crystallographic structure and effective magnetic easy axis of cobalt nanowires. *RSC Adv.*, 2016, vol. 6, no. 17, pp. 14266–14272. <https://doi.org/10.1039/C6RA01311B>.
22. Elmekawy A.H.A., Iashina E., Dubitskiy I., Sotnichuk S., Bozhev I., Kozlov D., Napolskii K., Menzel D., Mistonov A. Magnetic properties of ordered arrays of iron nanowires: The impact of the length. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2021, vol. 532, art. 167951. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2021.167951>.
23. Elmekawy A.H.A., Iashina E.G., Dubitskiy I.S., Sotnichuk S.V., Bozhev I.V., Napolskii K.S., Menzel D., Mistonov A.A. Magnetic properties and FORC analysis of iron nanowire arrays. *Mater. Today Commun.*, 2020, vol. 25, art. 101609. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101609>.
24. Zamani Kouhpanji M.R., Stadler B.J.H. Magnetic nanowires for nanobarcoding and beyond. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 13, art. 4573. <https://doi.org/10.3390/s21134573>.
25. Kovanova M.A., Derbeneva P.D., Postnov A.S., Tikhomirova T.V., Vashurin A.S., Koifman O.I. Electrocatalytic properties of water-soluble nickel(II) and copper(II) phthalocyaninates in the oxidation of hydroxide ions. *Russ. J. Electrochem.*, 2024, vol. 60, no. 6, pp. 429–434. <https://doi.org/10.1134/S1023193524700083>.
26. Li Y., Cheng H., Wang N., Zhou Y., Li T. Magnetic and microwave absorption properties of Fe/TiO₂ nanocomposites prepared by template electrodeposition. *J. Alloys Compd.*, 2018, vol. 763, pp. 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.05.282>.
27. Muscas G., Jönsson P.E., Serrano I.G., Vallin Ö., Kamalakar M.V. Ultralow magnetostrictive flexible ferromagnetic nanowires. *Nanoscale*, 2021, vol. 13, no. 12, pp. 6043–6052. <https://doi.org/10.1039/D0NR08355K>.

28. Fernández-González C., Guedeja-Marrón A., Rodilla B.L., Arché-Nuñez A., Corcuera R., Lucas I., González M.T., Varela M., de la Presa P., Aballe L., Pérez L., Ruiz-Gómez S. Electrodeposited magnetic nanowires with radial modulation of composition. *Nanomaterials*, 2022, vol. 12, no. 15, art. 2565. <https://doi.org/10.3390/nano12152565>.
29. Alotaibi S., Samba J., Pokharel S., Lan Y., Uradu K., Afolabi A., Unlu I., Basnet G., Aslan K., Flanders B.N., Lisfi A., Ozturk B. Individually grown cobalt nanowires as magnetic force microscopy probes. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, vol. 112, no. 9, art. 092401. <https://doi.org/10.1063/1.4997310>.
30. Zhou W., Um J., Zhang Y., Nelson A.P., Nemati Z., Modiano J., Stadler B., Franklin R. Development of a biolabeling system using ferromagnetic nanowires. *IEEE J. Electromagn., RF Microwaves Med. Biol.*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 134–142. <https://doi.org/10.1109/JERM.2018.2889049>.
31. Pondman K.M., Bunt N.D., Maijenburg A.W., van Wezel R.J.A., Kishore U., Abelmann L., ten Elshof J.E., ten Haken B. Magnetic drug delivery with FePd nanowires. *J. Magn. Magn. Mater.*, 2015, vol. 380, pp. 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.10.101>.
32. Hussain M., Nisar A., Qian L., Karim S., Khan M., Liu Y., Sun H., Ahmad M. Ni and Co synergy in bimetallic nanowires for the electrochemical detection of hydrogen peroxide. *Nanotechnology*, 2021, vol. 32, no. 20, art. 205501. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abe4fb>.
33. Yu K., Pan X., Zhang G., Liao X., Zhou X., Yan M., Xu L., Mai L. Nanowires in energy storage devices: Structures, synthesis, and applications. *Adv. Energy Mater.*, 2018, vol. 8, no. 32, art. 1802369. <https://doi.org/10.1002/aenm.201802369>.
34. Pendashteh A., Palma J., Anderson M., Marcilla R. Nanostructured porous wires of iron cobaltite: Novel positive electrode for high-performance hybrid energy storage devices. *J. Mater. Chem. A*, 2015, vol. 3, no. 32, pp. 16849–16859. <https://doi.org/10.1039/C5TA02701B>.
35. Liu X.-J., Sun Y.-D., Yin X., Jia C., Ma M., Chen Y. Enhanced methanol electrooxidation over defect-rich Pt-M (M = Fe, Co, Ni) ultrathin nanowires. *Energy Fuels*, 2020, vol. 34, no. 8, pp. 10078–10086. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01850>.
36. Li K., Li X., Huang H., Luo L., Li X., Yan X., Ma C., Si R., Yang J., Zeng J. One-nanometer-thick PtNiRh trimetallic nanowires with enhanced oxygen reduction electrocatalysis in acid media: Integrating multiple advantages into one catalyst. *J. Am. Chem. Soc.*, 2018, vol. 140, no. 47, pp. 16159–16167. <https://doi.org/10.1021/jacs.8b08836>.
37. Mao J., Chen W., He D., Wan J., Pei J., Dong J., Wang Y., An P., Jin Z., Xing W., Tang H., Zhuang Z., Liang X., Huang Y., Zhou G., Wang L., Wang D., Li Y. Design of ultrathin Pt-Mo-Ni nanowire catalysts for ethanol electrooxidation. *Sci. Adv.*, 2017, vol. 3, no. 8, art. e1603068. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1603068>.
38. Guo S., Li D., Zhu H., Zhang S., Markovic N.M., Stamenkovic V.R., Sun S. FePt and CoPt nanowires as efficient catalysts for the oxygen reduction reaction. *Angew. Chem., Int. Ed.*, 2013, vol. 52, no. 12, pp. 3465–3468. <https://doi.org/10.1002/anie.201209871>.
39. Kongor A.R., Mehta V.A., Modi K.M., Panchal M.K., Dey S.A., Panchal U.S., Jain V.K. Calix-based nanoparticles: A review. *Top. Curr. Chem.*, 2016, vol. 374, no. 3, art. 28. <https://doi.org/10.1007/s41061-016-0029-z>.
40. de Silva N., Ha J.-M., Solovyov A., Nigra M.M., Ogino I., Yeh S.W., Durkin K.A., Katz A. A bioinspired approach for controlling accessibility in calix[4]arene-bound metal cluster catalysts. *Nat. Chem.*, 2010, vol. 2, no. 12, pp. 1062–1068. <https://doi.org/10.1038/nchem.860>.
41. Baghayeri M., Namadchian M., Karimi-Maleh H., Beitollahi H. Determination of nifedipine using nanostructured electrochemical sensor based on simple synthesis of Ag nanoparticles at the surface of glassy carbon electrode: Application to the analysis of some real samples. *J. Electroanal. Chem.*, 2013, vol. 697, pp. 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2013.03.011>.
42. Guerrini L., Garcia-Ramos J.V., Domingo C., Sanchez-Cortes S. Functionalization of Ag nanoparticles with dithiocarbamate calix[4]arene as an effective supramolecular host for the surface-enhanced

- Raman scattering detection of polycyclic aromatic hydrocarbons. *Langmuir*, 2006, vol. 22, no. 26, pp. 10924–10926. <https://doi.org/10.1021/la062266a>.
43. Bhatt K.D., Vyas D.J., Makwana B.A., Darjee S.M., Jain V.K. Highly stable water dispersible calix[4]pyrrole octa-hydrazide protected gold nanoparticles as colorimetric and fluorometric chemosensors for selective signaling of Co(II) ions. *Spectrochim. Acta, Part A*, 2014, vol. 121, pp. 94–100. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.10.076>.
44. Balasubramanian R., Kim B., Tripp S.L., Wang X., Lieberman M., Wei A. Dispersion and stability studies of resorcinarene-encapsulated gold nanoparticles. *Langmuir*, 2002, vol. 18, no. 9, pp. 3676–3681. <https://doi.org/10.1021/la0156107>.
45. Wei A., Kim B., Pusztay S.V., Tripp S.L., Balasubramanian R. Resorcinarene-encapsulated nanoparticles: Building blocks for self-assembled nanostructures. *J. Inclusion Phenom. Macrocyclic Chem.*, 2001, vol. 41, nos. 1–4, pp. 83–86. <https://doi.org/10.1023/A:1014472212238>.
46. Patel G., Menon S. Recognition of lysine, arginine and histidine by novel *p*-sulfonatocalix[4]arene thiol functionalized gold nanoparticles in aqueous solution. *Chem. Commun.*, 2009, no. 24, pp. 3563–3565. <https://doi.org/10.1039/B905141D>.
47. Pescatori L., Boccia A., Ciesa F., Rossi F., Grillo V., Arduini A., Pochini A., Zanoni R., Secchi A. The effect of ligand denticity in size-selective synthesis of calix[n]arene-stabilized gold nanoparticles: A multitechnique approach. *Chem. – Eur. J.*, 2010, vol. 16, no. 36, pp. 11089–11099. <https://doi.org/10.1002/chem.201001039>.
48. Nizameev I.R., Kadirov M.K., Semyonov V.A., Zakharova L.Ya., Ismaev T.I., Safiullin R.A., Rizvanov I.Kh., Babaev V.M. Palladium 1D nanoscale aggregates on a graphite surface using CTAB hemicylindrical micelle templates. *Dalton Trans.*, 2016, vol. 45, no. 27, pp. 11035–11041. <https://doi.org/10.1039/C6DT01234E>.
49. Nizameev I., Nizameeva G., Kadirov M. Transparent conductive layer based on oriented platinum networks. *ChemistrySelect*, 2019, vol. 4, no. 46, pp. 13564–13568. <https://doi.org/10.1002/slct.201904293>.
50. Kadirov M.K., Knyazeva I.R., Nizameev I.R., Safiullin R.A., Matveeva V.I., Kholin K.V., Khrizanforova V.V., Ismaev T.I., Burilov A.R., Budnikova Yu.H., Sinyashin O.G. Oxygen reduction reaction catalyzed by nickel complexes based on thiophosphorylated calix[4]resorcinols and immobilized in the membrane electrode assembly of fuel cells. *Dalton Trans.*, 2016, vol. 45, no. 41, pp. 16157–16161. <https://doi.org/10.1039/C6DT02881K>.
51. Khrizanforova V.V., Knyazeva I.R., Matveeva Sokolova V.I., Nizameev I.R., Gryaznova T.V., Kadirov M.K., Burilov A.R., Sinyashin O.G., Budnikova Y.H. Nickel complexes based on thiophosphorylated calix[4]resorcinols as effective catalysts for hydrogen evolution. *Electrocatalysis*, 2015, vol. 6, no. 4, pp. 357–364. <https://doi.org/10.1007/s12678-015-0251-4>.

Информация об авторах

Ирек Рашатович Низамеев, кандидат химических наук, доцент, заведующий лабораторией физико-химической экологии, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН; доцент кафедры «Нанотехнологии в электронике», Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ

E-mail: inizameyev@iopc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5420-6181>

Гулия Ривалевна Низамеева, кандидат химических наук, доцент кафедры физики, Казанский национальный исследовательский технологический университет

E-mail: guliya.riv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4991-0502>

Эльгина Маратовна Лебедева, младший научный сотрудник лаборатории физико-химической экологии, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН

E-mail: elgina.lebed@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0095-5205>

Ирина Рафаэлевна Миронова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории элементоорганического синтеза, Институт органической и физической химии им. А.Е. Арбузова – обособленное структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН

E-mail: iknyazeva@iopc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0933-3405>

Author Information

Irek R. Nizameev, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Head of Laboratory of Physical and Chemical Ecology, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Department of Nanotechnologies in Electronics, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI

E-mail: inizameyev@iopc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5420-6181>

Guliya R. Nizameeva, Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Department of Physics, Kazan National Research Technological University

E-mail: guliya.riv@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4991-0502>

Elgina M. Lebedeva, Junior Researcher, Laboratory of Physical and Chemical Ecology, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences

E-mail: elgina.lebed@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0095-5205>

Irina R. Mironova, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of Organoelemental Synthesis, Arbuzov Institute of Organic and Physical Chemistry, FRC Kazan Scientific Center, Russian Academy of Sciences

E-mail: iknyazeva@iopc.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0933-3405>

Поступила в редакцию 05.06.2025

Принята к публикации 08.10.2025

Received June 5, 2025

Accepted October 8, 2025