УДК 546.302+546.92+620.3 *Оригинальная статья*

Получение и исследование свойств структурированных гексацианоферратов d-элементов, допированных наночастицами платины

М.А. Ясная[1], А.А. Блинова[2], И.М. Шевченко[2], А.В. Прасолова[2], В.И. Шипулин[2], В.П. Торгунов[2]

[1]Филиал АО «НПО «Микроген» в г. Ставрополь «Аллерген»
355019, Россия, Ставрополь, ул. Биологическая, 20
[2]ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
355017, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
ncstushevchenko@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.996

Аннотация: В данной работе получены образцы гексацианоферратов *d*-элементов (*Co*, *Ni*, *Fe*), содержащие от 0,1 до 5 масс.% платины. Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что образцы гексацианоферратов *d*-элементов (*Co*, *Ni*, *Fe*), допированных платиной, представляют собой агрегаты различной формы с размерами от 1 до 70 мкм, с четко выраженными границами и слоистой структурой. Агрегаты сформированы сферическими наночастицами размером от 10 до 70 нм. Анализ полученных методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии спектров образцов гексацианоферратов *d*-элементов (*Co*, *Ni*, *Fe*), допированных платиной, показал, что платина идентифицируется в образцах, содержащих от 1 до 5 масс.% *Pt*. При этом практическое содержание платины в материалах отличается от теоретически рассчитанного количества, что связано, во-первых, с восстановлением части ионов платины в объеме раствора и удалением их в процессе отмывки образцов, а, во-вторых, с адсорбцией ионов платины в структуре (каналах) гексацианоферратов *d*-элементов. Анализ фазового состава образцов гексацианоферратов *d*-элементов (*Co*, *Ni*, *Fe*), допированных платиной, показал, что основными кристаллическими фазами являются соответствующие гексацианоферраты *d*-элементов с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой (*Fm*3*m*), также присутствуют примесные фазы смешанных гексацианоферратов. Фазы металлической платины на дифрактограммах не идентифицируются независимо от концентрации благородного металла.

Ключевые слова: структурированные гексацианоферраты d-элементов, наночастицы благородных металлов, допирование наночастицами платины, микроструктура поверхности, элементный состав, фазовый состав.

Ясная Мария Анатольевна – к.х.н., доцент, начальник отдела регистрации лекарственных средств филиала АО «НПО «Микроген» в г. Ставрополь «Аллерген»
Блинова Анастасия Александровна – к.т.н., доцент кафедры фармацевтики и фармакогнозии медико-биологического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Шевченко Ирина Михайловна – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой стандартизации, метрологии и управления качеством факультета пищевой инженерии и биотехнологии им. Академика А.Г. Храмцова ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Прасолова Алина Вениаминовна – преподаватель кафедры фармацевтики и фармакогнозии медико-биологического факультета ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Шипулин Валентин Иванович – д.т.н., профессор, профессор кафедры стандартизации, метрологии и управления качеством факультета пищевой инженерии и биотехнологии им. Академика А.Г. Храмцова, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Торгунов Вячеслав Павлович – студент 4 курса кафедры стандартизации, метрологии и управления качеством факультета пищевой инженерии и биотехнологии им. Академика А.Г. Храмцова, ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

© М.А. Ясная, А.А. Блинова, И.М. Шевченко, А.В. Прасолова, В.И. Шипулин, В.П. Торгунов, 2026

Original paper

Preparation and study of properties of structured hexacyanoferrates of d-elements doped with platinum nanoparticles

M.A. Yasnaya[1], A.A. Blinova[2], I.M. Shevchenko[2], A.V. Prasolova[2], V.I. Shipulin[2], V.P. Torgunov[2]
[1]*Branch of JSC NPO «Mikrogen» in Stavropol «Allergen», Stavropol, Russia*
[2]*North Caucasus Federal University, Stavropol, Russia*
ncstushevchenko@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.996

Abstract: In this work, samples of hexacyanoferrates of *d*-elements (*Co*, *Ni*, *Fe*) containing from 0,1 to 5 wt.% platinum were obtained. Scanning electron microscopy revealed that samples of hexacyanoferrates of *d*-elements (*Co*, *Ni*, *Fe*) doped with platinum were aggregates of various shapes with sizes from 1 to 70 microns, with clearly defined boundaries and a layered structure. The aggregates are formed by spherical nanoparticles with a size ranging from 10 to 70 nm. Analysis of the energy-dispersive X-ray spectroscopy spectra of samples of hexacyanoferrates of *d*-elements (*Co*, *Ni*, *Fe*) doped with platinum showed that platinum was identified in samples containing 1 to 5 wt.% *Pt*. At the same time, the actual platinum content in the materials differs from the theoretically calculated amount, which is due, firstly, to the reduction of some platinum ions in the solution volume and their removal during the sample washing process, and secondly, to the adsorption of platinum ions in the structure (channels) of hexacyanoferrates of *d*-elements. Analysis of the phase composition of samples of hexacyanoferrates of *d*-elements (*Co*, *Ni*, *Fe*) doped with platinum showed that the main crystalline phases were the corresponding hexacyanoferrates of *d*-elements with a face-centered cubic crystal lattice (*Fm*3*m*); impurity phases of mixed hexacyanoferrates were also present. Phases of metallic platinum are not identified on the diffraction patterns regardless of the concentration of the noble metal.

Keywords: structured hexacyanoferrates of d-elements, noble metal nanoparticles, doping with platinum nanoparticles, surface microstructure, elemental composition, phase composition.

Maria A. Yasnaya – Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Registration of Medicines, Branch of JSC NPO «Mikrogen» in Stavropol «Allergen», ORCID:0000-0002-4486-4834
Anastasia A. Blinova – Ph. D., Associate Professor, Department of Pharmacy and Pharmacognosy, Faculty of Medicine and Biology, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-9321-550X
Irina M. Shevchenko – Ph. D., Associate Professor, Head of the Department of Standardization, Metrology and Quality Management, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after academician A.G. Khramtsov, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0005-9113-9335
Alina V. Prasolova – Lecturer, Department of Pharmacy and Pharmacognosy, Faculty of Medicine and Biology, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0003-7629-4391
Valentin I. Shipulin – Dr. Sc., Professor, Professor at the Department of Standardization, Metrology and Quality Management, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after academician A.G. Khramtsov, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0002-7046-2601
Vyacheslav P. Torgunov – 4th year student, Department of Standardization, Metrology and Quality Management, Faculty of Food Engineering and Biotechnology named after academician A.G. Khramtsov, North Caucasus Federal University

Поступила в редакцию/received: 01.08.2026; после рецензирования/revised: 16.09.2026; принята/accepted: 18.09.2026.

1. Введение

В настоящее время активное развитие получили методы экспресс-диагностики и мониторинга состояния человека на основе простых и автоматизированных нано- и биосенсоров, которые позволяют регистрировать с высокой точностью и селективностью изменение концентрации молекул в организме человека, таких как: глюкоза, гормоны, антитела, маркеры инфекционных заболеваний и аллергии, онкомаркеры и

так далее [1-5]. Несмотря на то, что существует большое количество зарубежных и отечественных разработок по нано- и биосенсорам, а ряд компаний уже поставляют на фармацевтический рынок различные виды экспресс-тестов (наиболее популярными продуктами являются тесты на содержание глюкозы в крови человека), перед исследователями продолжает стоять проблема повышения чувствительности, специфичности и надежности методов экспресс-диагностики, поэтому поиск новых материалов для создания чувствительных элементов нано- и биосенсоров продолжается [6-9].

Гексацианоферраты d-элементов (Co, Ni, Fe) представляют собой комплексные соединения железа с цианидными лигандами со стабильными каркасными структурами, которые обладают высокой редокс-активностью, ионообменной способностью и могут выступать эффективными медиаторами электронного переноса, что делает их перспективными материалами для создания электрохимических сенсоров [10].

Внедрение в структуру гексацианоферратов d-элементов наночастиц благородных металлов (в частности, наночастиц платины) позволит значительно усилить электропроводность, каталитическую активность в окислении глюкозы, повысить стабильность материала в биологических средах и снизить влияние интерферентов, что, в целом, приведет к повышению чувствительности, расширению линейного диапазона и улучшению общей производительности наносенсоров [11].

Авторы данной работы поставили перед собой цель разработать методику получения структурированных материалов на основе гексацианоферратов (III) d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных наночастицами платины, исследовать их элементный и фазовый состав, микроструктуру поверхности.

2. Экспериментальная часть

Золи гексацианоферратов (III) d-элементов (Co, Ni, Fe) получали методом химического осаждения в водных растворах при комнатной температуре. Методика синтеза гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe) подробно описана авторами в работах [12, 13, 14].

Для допирования поверхности гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe) наночастицами платины в растворы, содержащие гексацианоферраты d-элементов (Co, Ni, Fe), вводили различные количества платинохлористоводородной кислоты (от 0,1 до 5 масс.% платины). Восстановление платины проводили при температуре 70°С в трехкратном избытке борогидрида натрия.

Полученные образцы гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированные платиной, осаждали методом центрифугирования, а затем сушили при температуре 70°С.

Фазовый состав полученных образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, исследовали методом рентгенофазового анализа (РФА) на рентгеновском дифрактометре PANanalitical Empyrean (PANanalitical, Нидерланды), структуру и элементный образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и методом энергодисперсионной рентгеновской микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM – 6010LA (JEOL, Япония).

3. Обсуждение результатов

Результаты исследования элементного состава образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, представлены в Таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования элементного состава образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных наночастицами Pt.

№ п/п	Элементный состав	ГЦФ $Co-Pt$ (Pt, теор. масс.%)				ГЦФ $Ni-Pt$ (Pt, теор. масс.%)				ГЦФ $Fe-Pt$ (Pt, теор. масс.%)			
		0	0,1	1	5	0	0,1	1	5	0	0,1	1	5
1	N, масс.%	29,9	21,0	24,0	9,3	49,2	18,9	18,5	17,9	17,7	16,3	-	25,7
2	O, масс.%	8,9	5,7	5,5	7,0	24,1	6,8	6,3	4,2	19,6	9,8	-	15,1
3	Fe, масс.%	9,0	8,3	7,7	4,9	8,5	9,9	8,4	8,0	19,9	17,8	19,5	35,6
4	Ni, масс.%	-	-	-	-	12,5	13,0	10,6	9,6	-	-	-	-
5	Co, масс.%	13,1	11,3	9,3	6,1	-	-	-	-	-	-	-	-
6	K, масс.%	1,7	3,0	5,0	4,0	1,4	6,7	7,4	8,7	5,8	10,4	7,2	15,5
7	Si, масс.%	0,1	-	-	-	2,2	0,1	0,2	-	0,2	-	-	-
8	Al, масс.%	-	-	-	-	2,1	0,9	0,2	-	-	-	-	-
9	Cl, масс.%	-	-	-	0,2	-	2,3	1,6	1,8	-	-	0,3	2,3
10	C, масс.%	37,3	50,7	48,4	67,6	-	41,4	46,7	48,9	31,6	43,7	71,7	-
11	Na, масс.%	-	-	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	1,0
12	P, масс.%	-	-	-	-	-	-	-	-	3,4	-	-	-
13	S, масс. %	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	2,0	0,6	-
14	Pt, эксперим. масс.%	-	-	0,1	0,9	-	-	0,1	0,9	-	-	0,7	4,8

На рис. 1 представлены карты распределения элементов (азота, железа, углерода и платины) и спектр, полученный методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС), на примере образцов гексацианоферратов (III) железа, содержащих 1,0 масс.% Pt. Анализ ЭДС-спектров образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, показал, что платина идентифицируется только в образцах, содержащих от 1 до 5 масс.% Pt. При этом экспериментально определенное содержание платины в композитах ниже теоретически рассчитанного количества. Наличие в ЭДС-спектрах азота, углерода, железа, никеля и кобальта подтверждает образование гексацианоферратов соответствующих d-элементов в материале.

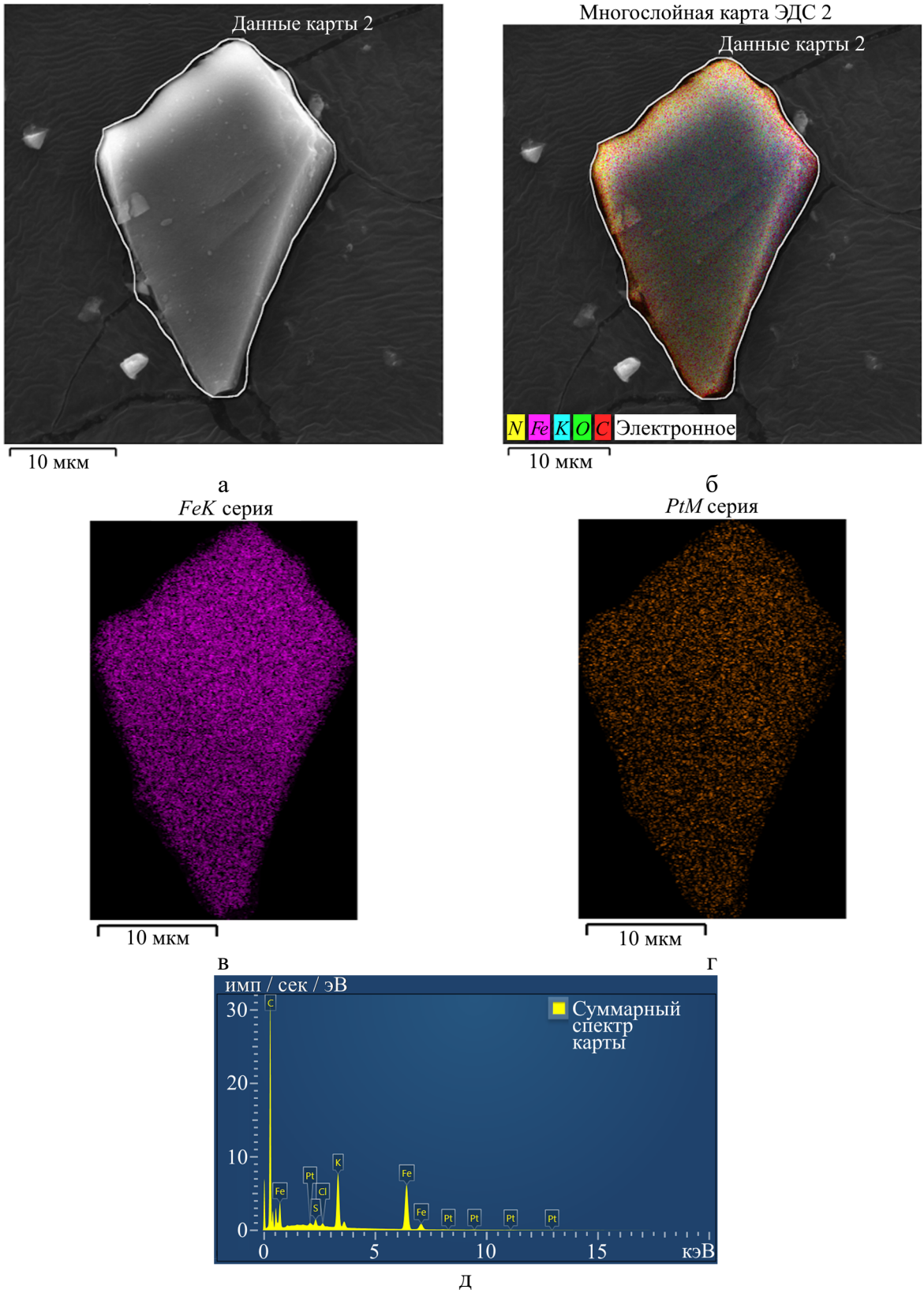
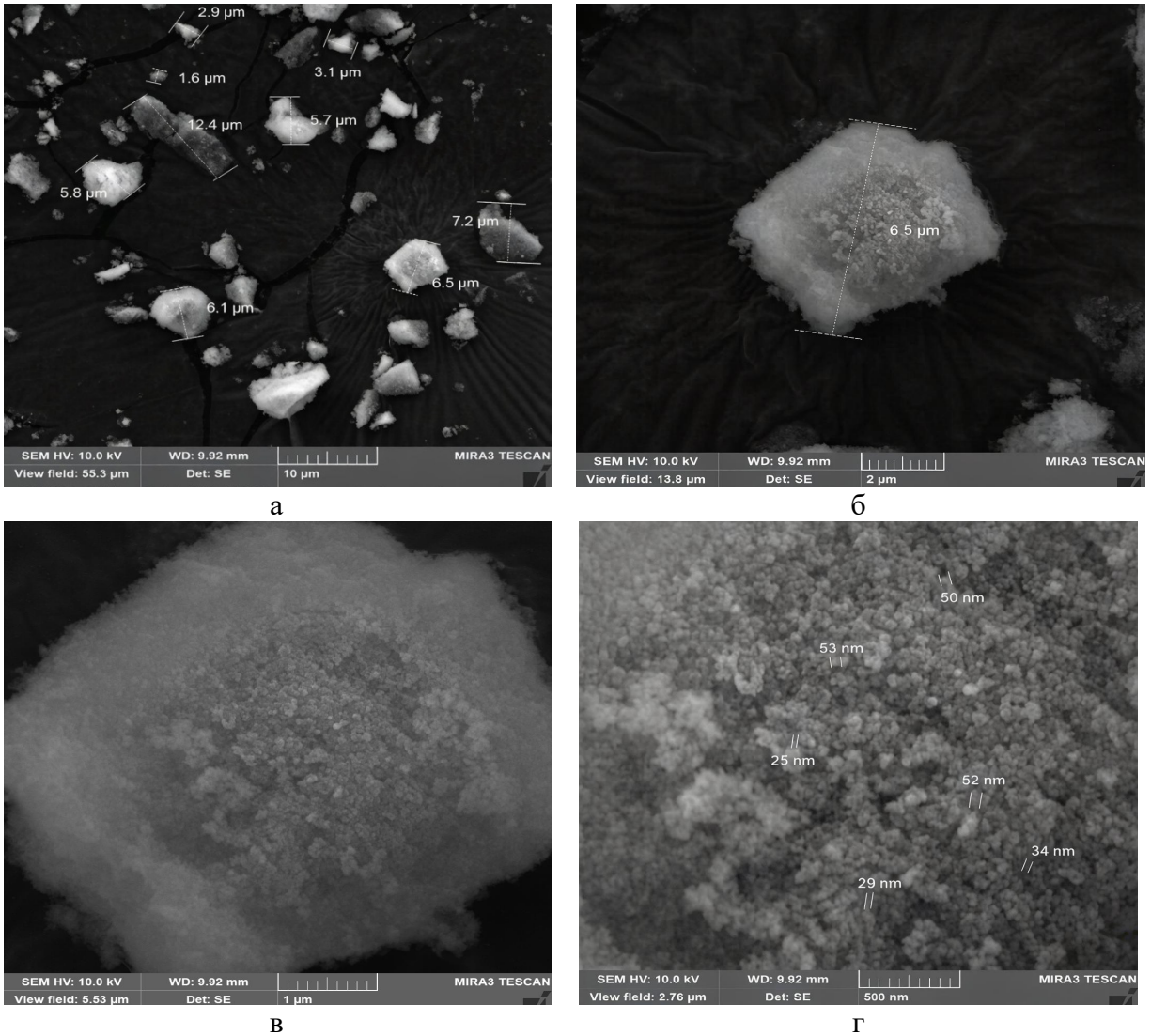


Рис. 1. Карты распределения элементов (железа, платины) и ЭДС-спектр на примере образцов ГЦФ Fe, содержащих 1,0 масс.% платины: а – СЭМ-изображение участка образца ГЦФ $Fe-Pt$ для съемки элементного состава, б – многослойная карта ЭДС, в – карта распределения железа, г – карта распределения платины, д – ЭДС-спектр.



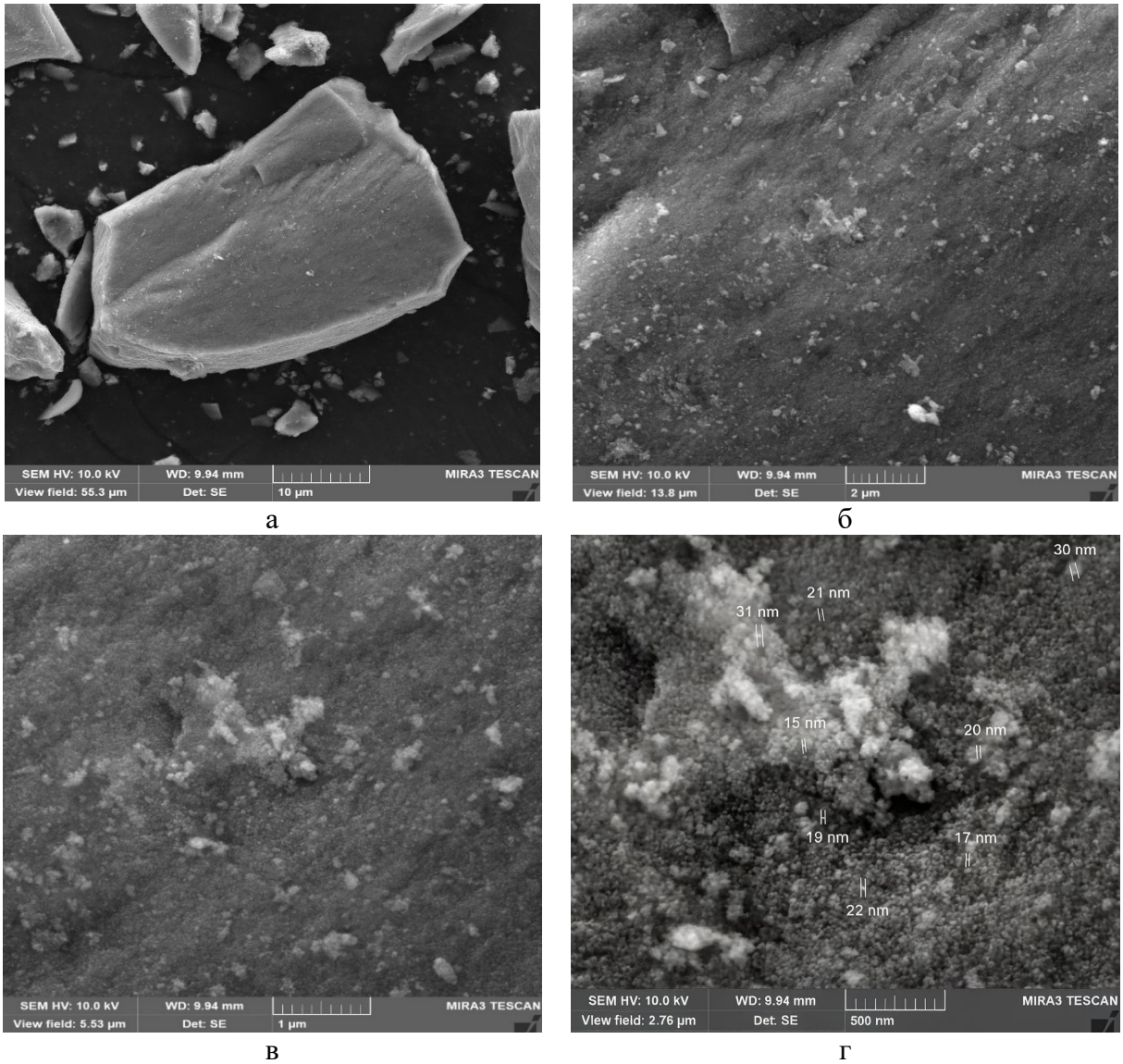
а б в г

Рис. 2. СЭМ-микрофотография образца гексацианоферрата (III) кобальта, допированного платиной (1,0 масс.% Pt), масштаб: а – 5000×, б – 20000×, в – 50000×, г – 100000×. Размерные метки указаны в мкм и нм.

Различие между расчетными и экспериментально определенными содержаниями благородных металлов в структурированных гексацианоффератах d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, может говорить о том, что:

1) часть ионов платины восстанавливается в объеме раствора и удаляется вместе с надосадочной жидкостью после центрифугирования образцов;

2) часть ионов платины сорбируется не на поверхности гексацианоферратов d-элементов, а входит в его структуру (каналы) (гексацианоферраты d-элементов обладают кристаллической решеткой с диаметром пор от 3,0 до 3,5 Å, которые по размеру значительно превышают размер катионов платины).



а б в г

Рис. 3. СЭМ-микрофотография образца гексацианоферрата (III) никеля, допированного платиной (1,0 масс.% Pt): а – 5000×, б – 20000×, в – 50000×, г – 100000×. Размерные метки указаны в мкм и нм.

Анализ полученных карт распределения показал, что в образцах гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe) и структурированных материалов на основе гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, области концентраций элементов азота (N), железа (Fe), никеля (Ni), кобальта (Co) на картах распределения совпадают с положением агрегатов на СЭМ-изображениях. При этом внутри областей азот (N), железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) распределены равномерно, что подтверждает присутствие в образцах соответствующих гексацианоферратов d-элементов. На рис. 2 – 4 представлены СЭМ-микрофотографии образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), содержащих 1,0 масс.% платины, при различных увеличениях.

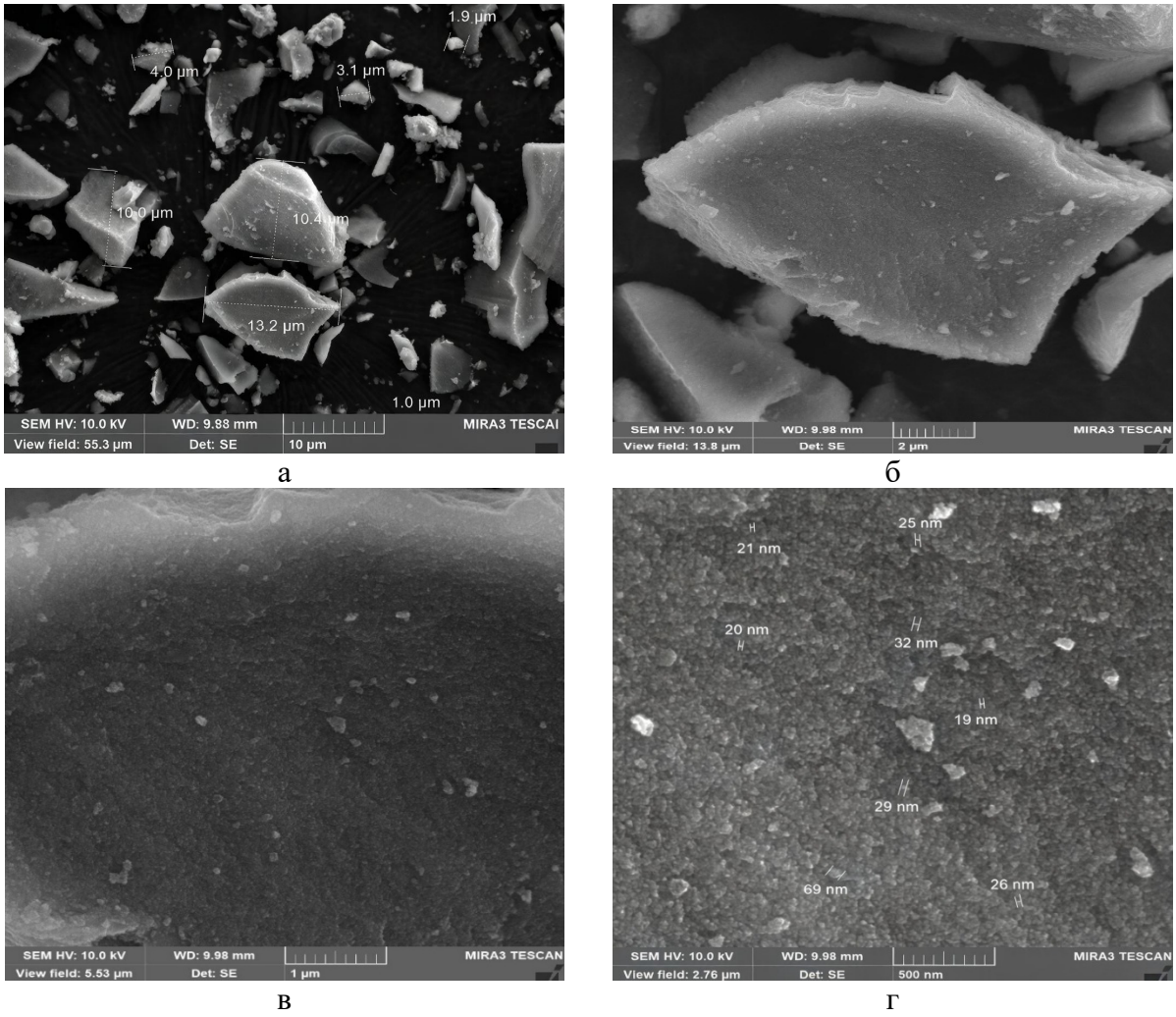


Рис. 4. СЭМ-микрофотография образца гексацианоферрата (III) железа, допированного платиной (1,0 масс.% *Pt*): а – 5000×, б – 20000×, в – 50000×, г – 100000×. Размерные метки указаны в мкм и нм.

Микроструктура образцов гексацианоферрата (III) кобальта, содержащих 1,0 масс.% *Pt*, представлена агрегатами различной формы с размерами от 1 до 15 мкм (см. рис. 2 а-г). Увеличение разрешающей способности электронного микроскопа показало, что агрегаты гексацианоферратов (III) кобальта, допированных платиной, сформированы сферическими наночастицами с размерами от 25 до 60 нм.

Микроструктура образцов гексацианоферрата (III) никеля, содержащих 1,0 масс.% *Pt*, представлена крупными агрегатами различной формы с размерами от 1 до 50 мкм (см. рис. 3 а-г). Агрегаты имеют четкие границы и слоистую структуру. При увеличении разрешающей способности электронного микроскопа, видно, что агрегаты гексацианоферратов (III) никеля, допированных платиной, сформированы сферическими наночастицами с размерами от 15 до 40 нм.

Микроструктура образцов гексацианоферрата (III) железа,

содержащих 1,0 масс.% Pt, представлена крупными агрегатами различной формы с размерами от 1 до 20 мкм (см. рис. 4 а-г). Агрегаты имеют четкие границы и слоистую структуру. При увеличении разрешающей способности электронного микроскопа видно, что агрегаты гексацианоферратов (III) железа, допированных платиной, состоят из сферических наночастиц размером от 20 до 70 нм.

Полученные образцы гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, исследовали методом порошковой дифрактометрии. Установлено, что основными кристаллическими фазами являются гексацианоферраты (III) соответствующих d-элементов (Co, Ni, Fe) с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой ($Fm3m$). Также в образцах присутствуют примесные фазы смешанных гексацианоферратов. Кристаллические фазы металлической платины в образцах гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, не идентифицируются независимо от количества введенной платины.

4. Заключение

Разработаны методики получения структурированных материалов на основе гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной. Проведено исследование элементного состава и микроструктуры поверхности полученных образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной. Анализ ЭДС-спектров образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, показал, что благородный металл идентифицируется в образцах, содержащих от 1,0 до 5,0 масс.% Pt. При этом практическое содержание платины в материалах отличается от теоретически рассчитанного количества, что связано, во-первых, с восстановлением части ионов платины в объеме раствора и удалением их в процессе отмывки образцов, а во-вторых, с адсорбцией ионов платины в структуре (каналах) гексацианоферратов d-элементов. Анализ фазового состава образцов гексацианоферратов d-элементов (Co, Ni, Fe), допированных платиной, показал, что основными кристаллическми фазами являются соответствующие гексацианоферраты d-элементов с кубической гранецентрированной кристаллической решеткой ($Fm3m$), также присутствуют примесные фазы смешанных гексацианоферратов. Фазы металлической платины не идентифицируются независимо от концентрации введенного благородного металла.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-23-00111, https://rscf.ru/project/25-23-00111/.

Библиографический список:

1. **Wang, W.** Toward continuous and non-invasive monitoring: a scoping review of in vitro blood glucose devices from electrochemistry to optics and micro-system integration / W. Wang, C. Liu, P. Lin et al. // Journal of Materials Chemistry B. – 2026. – V. 14. – I. 11. – P. 3383-3402. DOI: 10.1039/d5tb02338f.
2. **Дедов, И.И.** Клинико-эпидемиологический анализ показателей сахарного диабета в Российской Федерации, статус 01.01.2026 г. / И.И. Дедов, М.В. Шестакова, Н.Г. Мокрышева и др. // Сахарный диабет. – 2026. – Т. 29. № 2. – С. 104-136. DOI: 10.14341/DM13485.
3. **Alsunaidi, B.** A review of non-invasive optical systems for continuous blood glucose monitoring / B. Alsunaidi, M. Althobaiti, M. Tamal, W. Albaker, I. Al-Naib // Sensors (Basel). – 2021. – V. 21. – I. 20. – Art. № 6820. – 19 p. DOI: 10.3390/s21206820.
4. **Moses, J.C.** Non-invasive blood glucose monitoring technology in diabetes management: review / J.C. Moses, S. Adibi, N. Wickramasinghe et al. // Mhealth. – 2023. – V.10. – I. 9. – 10 p. DOI: 10.21037/mhealth-23-9.
5. **Pullano, S.A.** Glucose biosensors in clinical practice: principles, limits and perspectives of currently used devices / S.A. Pullano, M. Greco, M.G. Bianco et al. // Theranostics. – 2022. – V. 12. – I. 2. – P. 493-511. DOI: 10.7150/thno.64035.
6. **Uluç, N.** Non-invasive measurements of blood glucose levels by time-gating mid-infrared optoacoustic signals / N. Uluç, S. Glasl, F. Gasparin et al. // Nature Metabolism. – 2024. – V. 6. – I. 4. – P. 678-686. DOI: 10.1038/s42255-024-01016-9.
7. **Zhang, Y.** A review of biosensor technology and algorithms for glucose monitoring / Y. Zhang, J. Sun, L. Liu, H. Qiao // *Journal of Diabetes and its Complications*. – 2021. – V. 35. – I. 8. – P. 107-929. DOI: 10.1016/j.jdiacomp.2021.107929.
8. **Johnston, L.** Advances in biosensors for continuous glucose monitoring towards wearables / L. Johnston, G. Wang, K. Hu et al. // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. – 2021. – V. 19. – I. 9. – P. 733-810. DOI: 10.3389/fbioe.2021.733810.
9. **Parrilla, M.** Wearable hollow microneedle sensing patches for the transdermal electrochemical monitoring of glucose / M. Parrilla, U. Detamornrat, J. Domínguez-Robles et al. // Talanta. – 2022. – V. 1. – I. 249. – Art. № 123695. – 9 p. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123695.
10. **Oglou, R.C.** Electrodeposited cobalt hexacyanoferrate electrode as a non-enzymatic glucose sensor under neutral conditions / R.C. Oglou, T.G.U. Ghobadi, E. Ozbay, F. Karadas // Anal. Chim Acta. –2021. – V. 1188. – Art. № 339188. – 7 p. DOI: 10.1016/j.aca.2021.339188.
11. **Yu, H.** Recent progress of the practical applications of the platinum nanoparticle-based electrochemistry biosensors / H. Yu, J. Yu, L. Li et al. // *Frontiers in Chemistry*. – 2021. – V. 3. – I. 9. – P. 677-876. DOI: 10.3389/fchem.2021.677876.
12. **Шевченко, И.М.** Перспективные сенсорные материалы на основе гексацианоферрата (III) железа, модифицированного наноразмерным серебром / И.М. Шевченко, А.А. Гвозденко, М.А. Ясная и др. // Наноиндустрия. – 2025. – Т. 18. – № 7-8. – С. 458-465. DOI: 10.22184/1993-8578.2025.18.7-8.458.465.
13. **Шевченко, И.М.** Гексацианоферрат (III) никеля, допированный серебром, как материал для создания сенсоров на глюкозу / И.М. Шевченко, А.А. Гвозденко, М.А. Ясная et al. // Наноиндустрия. – 2025. – Т. 18. – № 7-8. – С. 440-448. DOI: 10.22184/1993-8578.2025.18.7-8.440.448.
14. **Шевченко, И.М.** Модификация матрицы гексацианоферрата кобальта наноразмерным серебром / И.М. Шевченко, А.А. Гвозденко, М.А. Ясная et al. // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век». – 2025. – Т. 17. – № 4. – С. 5–14. DOI: 10.18127/j22250980-202504-01.

References:

1. Wang W., Liu C., Lin P. et al. Toward continuous and non-invasive monitoring: a scoping review of in vitro blood glucose devices from electrochemistry to optics and micro-system integration, *Journal of Materials Chemistry B*, 2026, vol. 14, issue 11, pp. 3383-3402. DOI: 10.1039/d5tb02338f.
2. Dedov I.I., Shestakova M.V., Mokrysheva N.G. et al. Kliniko-epidemiologicheskij analiz pokazatelej sakharnogo diabeta v Rossijskoj Federatsii, status 01.01.2026 g. [Clinical and Epidemiological Analysis of Diabetes Mellitus Indicators in the Russian Federation, updated January 1, 2026], *Sakharnyi diabet* [*Diabetes mellitus]*, 2026, vol. 29, no. 2, pp. 104-136. DOI: 10.14341/DM13485. (In Russian).
3. Alsunaidi B., Althobaiti M., Tamal M., Albaker W., Al-Naib I. A Review of Non-Invasive Optical Systems for Continuous Blood Glucose Monitoring, *Sensors (Basel),* 2021, vol. 21, issue 20, art. no. 6820, 19 p. DOI: 10.3390/s21206820.
4. Moses J.C., Adibi S., Wickramasinghe N. et al. Non-invasive blood glucose monitoring technology in

diabetes management: review, *Mhealth*, 2023, vol. 10, issue 9, 16 p. DOI: 10.21037/mhealth-23-9.
5. Pullano S.A., Greco M., Bianco M.G. et al. Glucose biosensors in clinical practice: principles, limits and perspectives of currently used devices, *Theranostics*, 2022, vol. 12, issue 2, pp. 493-511. DOI: 10.7150/thno.64035.
6. Uluç N., Glasl S., Gasparin F. et al. Non-invasive measurements of blood glucose levels by time-gating mid-infrared optoacoustic signals, *Nature Metabolism*, 2024, vol. 6, issue 4, pp. 678-686. DOI: 10.1038/s42255-024-01016-9.
7. Zhang Y., Sun J., Liu L., Qiao H. A review of biosensor technology and algorithms for glucose monitoring, *Journal of Diabetes and its Complications*, 2021, vol. 35, issue 8, pp. 107-929. DOI: 10.1016/j.jdiacomp.2021.107929.
8. Johnston L., Wang G., Hu K. et al. Advances in biosensors for continuous glucose monitoring towards wearables, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2021, vol. 19, issue 9, pp. 733-810. DOI: 10.3389/fbioe.2021.733810.
9. Parrilla M., Detamornrat U., Domínguez-Robles J. et al. Wearable hollow microneedle sensing patches for the transdermal electrochemical monitoring of glucose, *Talanta*, 2022, vol. 1, issue 249, art. no 123695, 9 p. DOI: 10.1016/j.talanta.2022.123695.
10. Oglou R.C., Ghobadi T.G.U., Ozbay E., Karadas F. Electrodeposited cobalt hexacyanoferrate electrode as a non-enzymatic glucose sensor under neutral conditions, *Analytica Chimica Acta*, 2021, vol. 1188, art. no 339188, 7 p. DOI: 10.1016/j.aca.2021.339188.
11. Yu H., Yu J., Li L. et al. Recent progress of the practical applications of the platinum nanoparticle-based electrochemistry biosensors, *Frontiers in Chemistry*, 2021, vol. 3, issue 9, pp. 677-876. DOI: 10.3389/fchem.2021.677876.
12. Shevchenko I.M., Gvozdenko A.A., Yasnaya M.A. et al. Perspektivnye sensornye materialy na osnove geksatsianoferrata (III) zheleza, modifitsirovannogo nanorazmernym serebrom [Promising sensor materials based on iron(III) hexacyanoferrate modified with nanoscale silver], *Nanoindustriya* [*Nanoindustry*], 2025, vol. 18, no. 7-8, pp. 458-465. DOI: 10.22184/1993-8578.2025.18.7-8.458.465. (In Russian).
13. Shevchenko I.M., Gvozdenko A.A., Yasnaya M.A. et al. Geksatsianoferrat (III) nikelya, dopirovannyj serebrom, kak material dlya sozdaniya sensorov na glyukozu [Silver-doped nickel hexacyanoferrate (iii) as a material for creating glucose sensors], *Nanoindustriya* [*Nanoindustry*], 2025, vol. 18, no. 7-8, pp. 440-448. DOI: 10.22184/1993-8578.2025.18.7-8.440.448. (In Russian).
14. Shevchenko I.M., Gvozdenko A.A., Yasnaya M.A. et al. Modifikatsiya matritsy geksatsianoferrata kobal'ta nanorazmernym serebrom [Modification of a cobalt hexacyanoferrate matrix with nanosized silver], *Nanotekhnologii: razrabotka, primenenie – XXI vek [Nanotechnology: development and applications – XXI century],* 2025, vol. 17, no. 4, pp. 5-14. DOI: 10.18127/j22250980-202504-01. (In Russian).