УДК 546.722-31, 546.723-31 *Оригинальная статья*

Исследование процесса стабилизации наночастиц смешанного оксида железа бета-глюканом

М.А. Пирогов, А.В. Блинов, А.В. Самоволов, А.В. Татов, З.А. Рехман, Н.М. Бочаров
ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
355009, Россия, Ставрополь, ул. Пушкина, 1
pirogov.m.2002@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.897

Аннотация: В данной работе образцы наночастиц смешанного оксида железа, стабилизированных бета-глюканом, получали методом химического осаждения в водной среде из хлорида железа (III) и сульфата железа (II) с использованием аммиака в качестве осаждающего агента. Данный материал представляет интерес благодаря магнитным и биосовместимым свойствам, обусловленным сочетанием магнетитового ядра и полисахаридной оболочки. Проведены исследования методами инфракрасной Фурье спектроскопии и спектроскопии диффузного отражения, а также компьютерное квантово-химическое моделирование элементарного акта взаимодействия бета-глюкана с оксидами железа (II) и (III) в программном комплексе QChem. Установлено, что взаимодействие участка бета-глюкана с оксидами железа энергетически выгодно (разница полной энергии бета-глюкана и элементарного акта взаимодействия > 1335 (для оксида железа (II)) и > 2744 ккал/моль (для оксида железа (III))) и химически стабильно (химическая жёсткость 0,140-0,161 эВ и 0,156- 0,170 эВ, соответственно), причём оптимальным является взаимодействие через гидроксильную группу, присоединённую к C_3 В-связанного остатка глюкопиранозы. Анализ инфракрасных спектров подтвердил данный механизм: снижается интенсивность полосы валентных колебаний гидроксильной группы в спектре стабилизированных наночастиц по сравнению со спектром чистого бета-глюкана, а появление полосы валентных колебаний связи *Fe–O* в области 533-656 $см^{-1}$ подтверждает образование кристаллической решётки магнетита. Анализ спектра диффузного отражения показал, что оптические свойства образца в видимой области определяются преимущественно смешанным оксидом железа, с полосой поглощения 450-600 нм, связанной с электронными переходами ионов Fe^{2+} и Fe^{3+}.

Ключевые слова: наночастицы, оксид железа, бета-глюкан, квантово-химическое моделирование, диффузное отражение, метод инфракрасной Фурье спектроскопии.

Пирогов Максим Александрович – ассистент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Блинов Андрей Владимирович – к.т.н., доцент, доцент департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Самоволов Артём Владимирович – ассистент кафедры технологии переработки нефти и промышленной экологии факультета нефтегазовой инженерии ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Татов Алексей Владимирович – лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Рехман Зафар Абдулович – преподаватель департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
Бочаров Никита Максимович – лаборант департамента функциональных материалов и инженерного конструирования ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»

Original paper

Investigation of the process of stabilization of nanoparticles of mixed iron oxide by beta-glucan

M.A. Pirogov, A.V. Blinov, A.V. Samovolov, A.V. Tatov, Z.A. Rekhman, N.M. Bocharov
North-Caucasian Federal University, Stavropol, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.897

Abstract: In this work, samples of mixed iron oxide nanoparticles stabilized with beta-glucan were prepared by chemical precipitation in an aqueous medium from iron (III) chloride and iron (II) sulfate

© М.А. Пирогов, А.В. Блинов, А.В. Самоволов, А.В. Татов, З.А. Рехман, Н.М. Бочаров, 2026

using ammonia as the precipitating agent. This material is of interest due to its magnetic and biocompatible properties, as well as to combination of a magnetite core and a polysaccharide shell. The Fourier transform infrared spectroscopy and diffuse reflectance spectroscopy studies were conducted, along with quantum chemical computer modeling of the elementary act of interaction of beta-glucan with iron (II) and iron (III) oxides using the QChem software. The modeling revealed that the interaction of the beta-glucan site with iron oxides is energetically favorable (the difference in the total energy of beta-glucan and the elementary act of interaction is > 1335 (for iron (II)) oxide and > 2744 kcal/mol (for iron (III) oxide)) and chemically stable (chemical hardness of 0,140-0,161 eV and 0,156-0,170 eV, respectively), with the optimal interaction being via the hydroxyl group attached to C_3 of the B-linked glucopyranose residue. Infrared spectral analysis confirmed this mechanism: the intensity of the hydroxyl stretching band in the spectrum of stabilized nanoparticles is reduced compared to that of pure beta-glucan, while the appearance of a *Fe–O* stretching band in the 533-656 cm^{-1} region confirms the formation of a magnetite crystal lattice. Analysis of the diffuse reflectance spectrum revealed that the optical properties of the sample in the visible region are determined predominantly by mixed iron oxide, with an absorption band at 450-600 nm associated with the electron transitions of Fe^{2+} and Fe^{3+} ions.
Keywords: nanoparticles, iron oxide, beta-glucan, quantum chemical modeling, diffuse reflection, Fourier transform infrared spectroscopy.

Maxim A. Pirogov– assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-9217-6262
Andrey V. Blinov – Ph. D., Associate Professor, Associate Professor, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0002-4701-8633
Artem V. Samovolov – assistant, Department of Oil Refining Technology and Industrial Ecology, Faculty of Petroleum Engineering, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0001-5570-6201
Alexey V. Tatov – Laboratory Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0003-8842-232X
Zafar A. Rekhman – Teacher, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0000-0003-2809-4945
Nikita M. Bocharov – Laboratory Assistant, Department of Functional Materials and Engineering Design, North Caucasus Federal University, ORCID: 0009-0005-7286-0995

Поступила в редакцию/received: 26.07.2026; после рецензирования/revised: 29.08.2026; принята/accepted: 04.09.2026.

1. Введение

Поддержание гомеостаза и жизнеобеспечения биологических систем невозможно без эссенциальных микроэлементов [1, 2]. Их незаменимость обусловлена тем, что данные элементы выступают в роли компонентов ферментов и кофакторов, участвуя в процессах клеточного дыхания и антиоксидантной защиты [3]. Эссенциальные микроэлементы не синтезируются самопроизвольно и должны поступать с пищей в физиологических дозах [4]. Даже незначительный дефицит таких элементов приводит к нарушениям обмена веществ, снижению иммунного статуса и развитию патологий [5, 6].

Железо относится к числу наиболее важных эссенциальных микроэлементов, играющих большую роль в обеспечении транспортировки кислорода. В составе гемоглобина и миоглобина оно обеспечивает связывание и транспортировку кислорода к тканям организма [7, 8]. Помимо дыхательной функции, железо выступает в качестве кофактора множества ферментов, включая цитохромы, каталазу и пероксидазу, что

делает его незаменимым участником в процессах энергетического обмена и детоксикации активных форм кислорода [9]. Реакционная способность железа лежит в основе его каталитической активности в неорганических системах: показано, что оксидные фазы железа проявляют выраженную каталитическую активность в гетерогенной реакции Фентона – разложении пероксида водорода с образованием активных радикалов [10]. Данный микроэлемент приобретает особое значение в периоды активного роста, беременности и при кровопотерях [11]. Дефицит железа проявляется в виде железодефицитной анемии, сопровождающейся гипоксией тканей, хронической усталостью, снижением когнитивных функций и иммунной супрессией. На клеточном уровне недостаток железа приводит к нарушению синтеза ДНК, угнетению пролиферации и дифференцировки клеток, что особенно опасно для быстро делящихся тканей, таких как эпителий желудочно-кишечного тракта и иммунные клетки [12, 13]. Восполнение железа представляет собой сложный процесс, ограниченный биодоступностью микроэлемента. Традиционные препараты, особенно соли двухвалентного железа, часто характеризуются низкой усвояемостью и выраженными побочными эффектами со стороны желудочно-кишечного тракта [14, 15]. Биодоступность наночастиц железа может в несколько раз превосходить неорганические и органические формы, такие как сульфаты, цитраты, бисглицинаты железа [16]. Применение наночастиц оксида железа в качестве кормовой добавки представляет собой перспективное направление в животноводстве, демонстрируя значительные преимущества перед традиционными формами микроэлемента [17].

Стабилизация наночастиц оксида железа различными полисахаридами активно изучается как способ повышения их коллоидной устойчивости и биосовместимости, в частности показана эффективность амилопектина в качестве стабилизатора смешанного оксида железа [18].

Таким образом, разработка эффективной и безопасной наноразмерной формы оксида железа, стабилизированного бета-глюканом, открывает новые перспективы для коррекции микроэлементозов в ветеринарии. В производстве кормов их применение способствует повышению привесов, конверсии корма, выживаемости и иммунного статуса сельскохозяйственных животных.

2. Экспериментальная часть

На первом этапе в молекулярном редакторе IQmol [19] было проведено квантово-химическое моделирование процесса стабилизации наночастиц смешанного оксида железа бета-глюканом. Для этого рассматривали элементарный акт взаимодействия участка бета-глюкана, состоящего из двух остатков глюкопиранозы, соединенных через β-(1→6),

с молекулами оксида железа (II) или оксида железа (III) через гидроксильные группы бета-глюкана и атомы железа. С помощью программного обеспечения QChem [20] рассчитывали значения полной энергии молекулярного комплекса E, энергии высшей заселённой E_{HOMO} и низшей свободной E_{LUMO} молекулярных орбиталей. Далее вычисляли разницу полной энергии бета-глюкана и элементарного акта взаимодействия ΔE, а также химическую жёсткость η, равную половине разности энергий низшей свободной и высшей заселённой молекулярных орбиталей. На следующем этапе получали наночастицы смешанного оксида железа, стабилизированного бета-глюканом. Для начала смешивали в соотношении 1:1 0,8 М растворы хлорида железа (III) 6-водного и сульфата железа (II) 7-водного. Далее смесь нагревали до 75-80°С и при активном перемешивании добавляли по каплям 25% раствор аммиака. После добавляли 10 мл дистиллированной воды и помещали на магнитную мешалку на 30 минут при скорости перемешивании 500 об/мин. На заключительном этапе образцы отмывали до pH 7,5-8,5 путём декантации надосадочной жидкости, добавления воды и седиментации в магнитном поле с помощью магнита, а после сушили при температуре 65°С.

Образец исследовали методом инфракрасной (ИК) Фурье спектроскопии на спектрометре ФСМ-1201 (ООО «Инфраспек», Россия), а также методом диффузного отражения на спектрофлюориметре СФЛ-МДР («ОКБ Спектр», Россия).

3. Обсуждение результатов

В результате квантово-химического моделирования получены данные, представленные в Таблице 1. Можно сделать вывод, что взаимодействие участка бета-глюкана с оксидом железа является энергетически выгодным (для FeO $\Delta E > 1335$ ккал/моль, для Fe_2O_3 $\Delta E > 2744$ ккал/моль), а также химически стабильным (для FeO $0{,}140 \leq \eta \leq 0{,}161$ эВ, для Fe_2O_3 $0{,}156 \leq \eta \leq 0{,}170$ эВ). При этом зависимость разницы полной энергии и химической жёсткости от типа взаимодействия для оксидов железа (II) и (III) противоречива, так как увеличение химической жёсткости у оксида железа (II) при взаимодействии через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 А-связанного остатка глюкопиранозы относительно взаимодействия через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 А-связанного остатка глюкопиранозы, сопровождается уменьшением химической жёсткости у оксида железа (III) при сравнении тех же взаимодействий. При сравнительном анализе установлено, что оптимальным является взаимодействие оксидов железа (II) и железа (III) с участком бета-глюкана через гидроксильную группу, присоединенную к C_3

В-связанного остатка глюкопиранозы.

Таблица 1. Результаты квантово-химического моделирования (А-СОГ – А-связанный остаток глюкопиранозы, В-СОГ – В-связанный остаток глюкопиранозы).

Взаимодействие	E, ккал/моль	ΔE, ккал/моль	E_{HOMO}, эВ	E_{LUMO}, эВ	η, эВ
Участок бета-глюкана	-1290,018	–	-0,393	0,156	0,275
FeO					
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 А-СОГ	-2625,237	1335,219	-0,165	0,115	0,140
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 А-СОГ	-2625,260	1335,242	-0,217	0,085	0,151
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_4 терминального А-СОГ	-2625,218	1335,200	-0,189	0,097	0,143
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_6 А-СОГ	-2625,304	1335,286	-0,196	0,105	0,151
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_1 терминального В-связанного остатка глюкопиранозы	-2625,254	1335,236	-0,198	0,096	0,147
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 В-СОГ	-2625,258	1335,240	-0,181	0,111	0,146
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 В-СОГ	-2625,291	1335,273	-0,234	0,087	0,161
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_4 В-СОГ	-2625,312	1335,294	-0,203	0,110	0,157
Fe_2O_3					
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 А-СОГ	-4034,741	2744,723	-0,240	0,084	0,162
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 А-СОГ	-4034,704	2744,686	-0,244	0,068	0,156
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_4 терминального А-СОГ	-4034,742	2744,724	-0,259	0,070	0,165
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_6 А-СОГ	-4034,682	2744,664	-0,233	0,090	0,162
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_1 терминального В-СОГ	-4034,746	2744,728	-0,252	0,087	0,170
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_2 В-СОГ	-4034,728	2744,710	-0,251	0,089	0,170
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 В-СОГ	-4034,725	2744,707	-0,264	0,062	0,163
Через гидроксильную группу, присоединенную к C_4 В-СОГ	-4034,699	2744,681	-0,256	0,067	0,162

Модель данной молекулярной системы, распределение электронной плотности, а также высшей заселённой и низшей свободной молекулярных орбиталей представлено на рис. 1, 2.

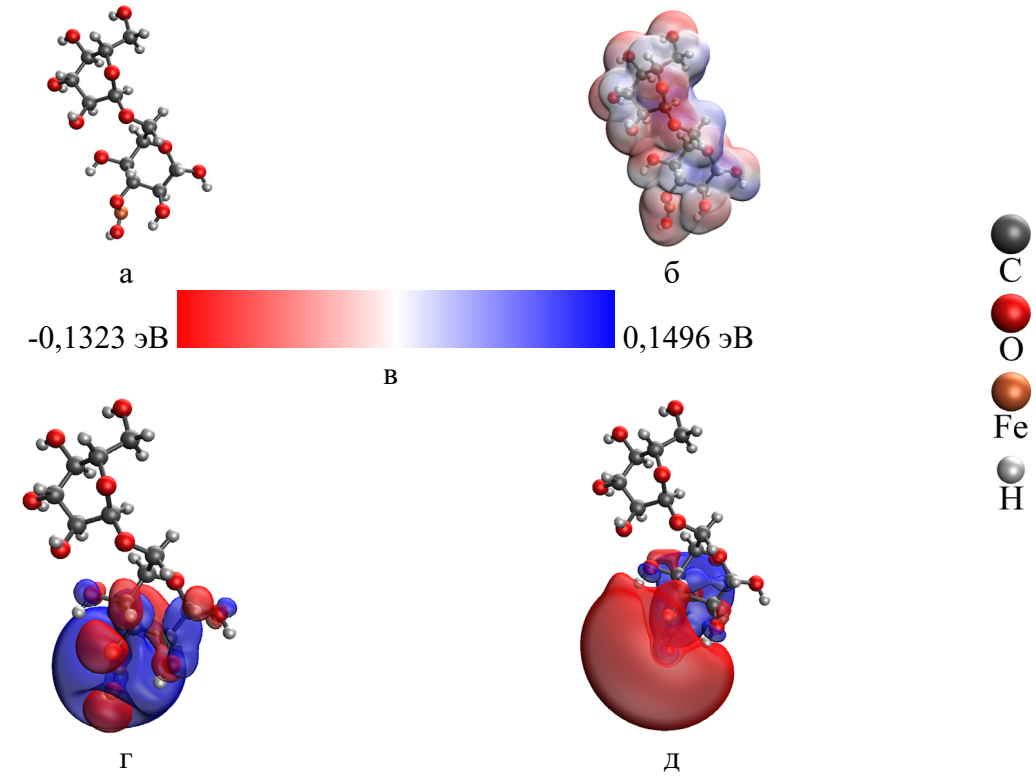

Рис. 1. Результаты моделирования взаимодействия участка бета-глюкана с оксидом железа (II) через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 В-связанного остатка глюкопиранозы: а – модель молекулярного комплекса, б – распределение электронной плотности, в – градиент распределения электронной плотности, г – высшая заселённая молекулярная орбиталь *HOMO*, д – низшая свободная молекулярная орбиталь *LUMO*.

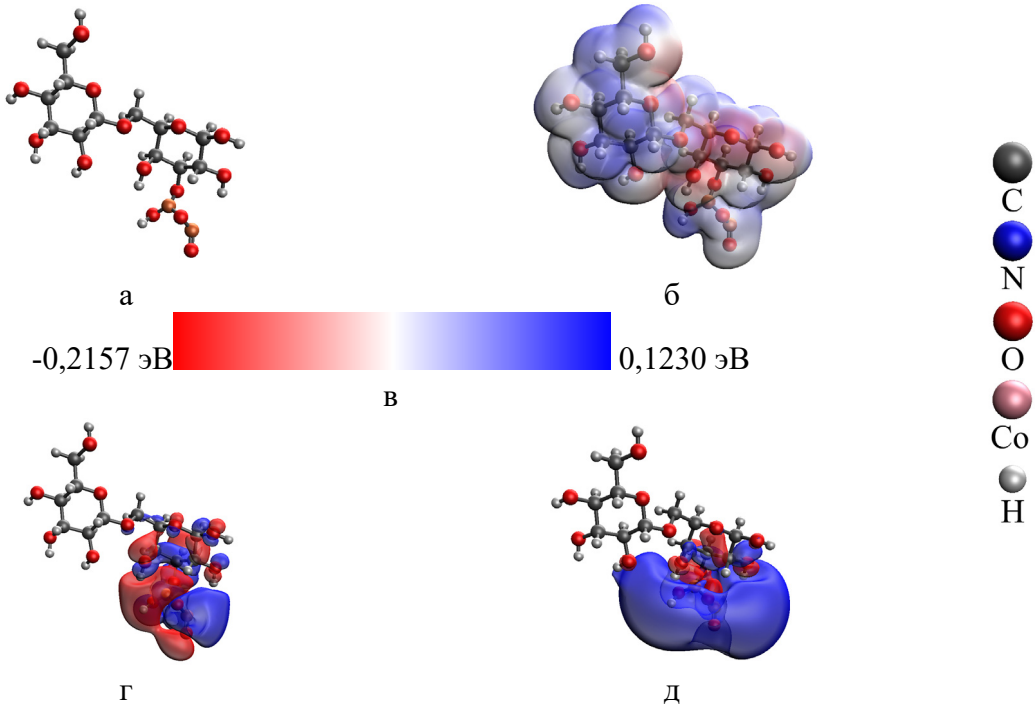

Рис. 2. Результаты моделирования взаимодействия участка бета-глюкана с оксидом железа (III) через гидроксильную группу, присоединенную к C_3 В-связанного остатка глюкопиранозы. Обозначения панелей а-д соответствуют рис. 1.

В результате анализа наночастиц смешанного оксида железа, стабилизированного бета-глюканом, методом ИК-спектроскопии получены ИК-спектры наночастиц и бета-глюкана, представленные на рис. 3.

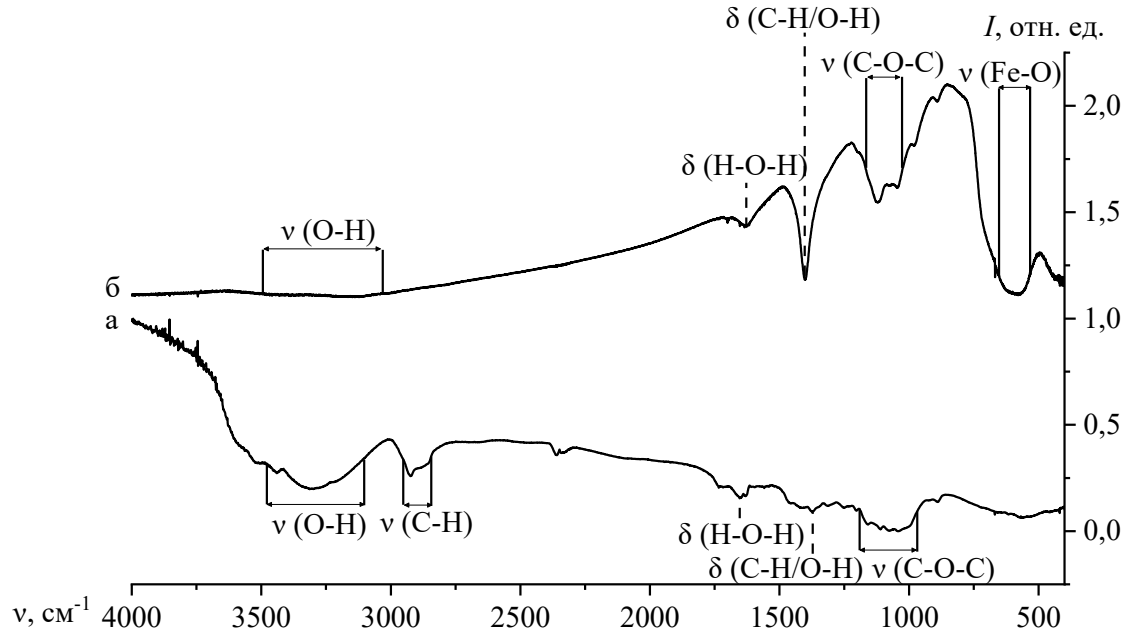

Рис. 3. ИК-спектры полученных образцов: а – бета-глюкан, б – наночастицы смешанного оксида железа, стабилизированные бета-глюканом.

Анализ ИК-спектра бета-глюкана показал, что в области от 3126 до 3478 см$^{-1}$ присутствуют валентные колебания гидроксильной группы, на участке от 2846 до 2955 см$^{-1}$ – валентные колебания $C-H$ связей. На 1651 см$^{-1}$ отмечены деформационные колебания адсорбированной воды, на 1373 см$^{-1}$ – деформационные колебания $C-H/O-H$ связей. Область от 972 до 1184 см$^{-1}$ соответствует валентным колебаниям $C-O-C$ гликозидных связей, на 558 см$^{-1}$ присутствуют скелетные деформационные колебания пиранозного кольца.

Анализ ИК-спектра наночастиц смешанного оксида железа, стабилизированных бета-глюканом, показал, что в области от 533 до 656 см$^{-1}$ присутствуют валентные колебания связи $Fe-O$, характерные для кристаллической решётки магнетита. На участке от 1028 до 1163 см$^{-1}$ сохраняются валентные колебания $C-O-C$, на 1401 см$^{-1}$ – деформационные колебания $C-H/O-H$, на 1630 см$^{-1}$ – деформационные колебания $H-O-H$. При этом значительно уменьшается интенсивность полосы валентных колебаний гидроксильной группы (3037–3493 см$^{-1}$) по сравнению со спектром чистого бета-глюкана. Это указывает на то, что значительная часть гидроксильных групп полисахарида перестаёт участвовать в свободных валентных колебаниях $O-H$ и вовлекается в координационное связывание с поверхностью наночастицы Fe_3O_4, что снижает число свободных гидроксильных групп.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что взаимодействие наночастиц смешанного оксида железа с бета-глюканом происходит через гидроксильные группы полисахарида, что подтверждается значительным падением интенсивности в спектре стабилизированных наночастиц наряду с появлением характеристичной полосы $Fe-O$ в области 533-656 см$^{-1}$, не встречающейся в спектре чистого бета-глюкана.

В результате анализа смешанного оксида железа, стабилизированного бета-глюканом, методом диффузного отражения получена функция Кубелки-Мунка, представленная на рис. 4.

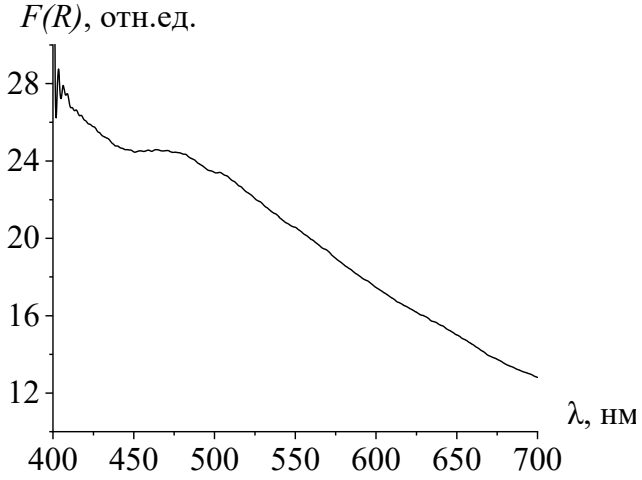

Рис. 4. Функция Кубелки-Мунка наночастиц смешанного оксида железа, стабилизированного бета-глюканом.

Спектры диффузного отражения были преобразованы в функцию Кубелки-Мунка для анализа оптических свойств смешанного оксида железа, стабилизированного бета-глюканом. В видимой области спектра наблюдается широкое поглощение без резких обрывов или изломов, что характерно для смешанных оксидов железа. Интенсивное поглощение в коротковолновой части видимого диапазона можно связать с переходами переноса заряда $O^{2-} \rightarrow Fe^{3+}$, характерными для оксидов железа [21].

В диапазоне от 450 до 600 нм регистрируется широкая полоса, обусловленная электронными переходами с участием ионов Fe^{2+} и Fe^{3+}. В области от 600 до 700 нм сохраняется слабое поглощение, которое может быть связано с $d-d$-переходами и наличием дефектов в структуре наночастиц [22]. Отсутствие выраженных полос бета-глюкана показывает, что основной вклад в оптические свойства образца в видимой области вносит смешанный оксид железа.

4. Заключение

В данной работе методом химического осаждения в водной среде получены наночастицы смешанного оксида железа, стабилизированные бета-глюканом. В качестве железосодержащих прекурсоров использовали

6-водный хлорид железа (III) и 7-водный сульфат железа (II), в качестве осаждающего агента – 25%-ный раствор аммиака, в качестве стабилизатора – бета-глюкан. В результате компьютерного квантово-химического моделирования изучен процесс взаимодействия элементарного фрагмента бета-глюкана, состоящего из двух остатков глюкопиранозы, соединённых β-(1→6)-связью, с оксидами железа (II) и (III). Установлено, что взаимодействие является энергетически выгодным (ΔE > 1335 ккал/моль для оксида железа (II) и ΔE > 2744 ккал/моль для оксида железа (III)) и химически стабильным (0,140 ≤ η ≤ 0,161 эВ и 0,156 ≤ η ≤ 0,170 эВ соответственно), а его оптимальным вариантом является гидроксильная группа, присоединённая к C_3 В-связанного остатка глюкопиранозы. Результаты ИК-спектроскопии подтвердили данные моделирования: в спектре стабилизированных наночастиц полоса валентных колебаний гидроксильной группы теряет интенсивность и становится невыраженной, что указывает на вовлечение гидроксильных групп полисахарида в координационное связывание с поверхностью наночастиц; при этом появление характеристичной полосы $Fe-O$ в области от 533 до 656 см$^{-1}$ подтверждает образование фазы оксида железа. Анализ спектра диффузного отражения, преобразованного в функцию Кубелки-Мунка, показал широкое поглощение в видимой области без выраженного края фундаментального поглощения, характерное для смешанных оксидов железа, с полосой в диапазоне от 450 до 600 нм, обусловленной электронными переходами с участием ионов Fe^{2+} и Fe^{3+}, при отсутствии выраженного вклада полос бета-глюкана в оптические свойства образца. Перспективным направлением дальнейших исследований является проектирование и комплексный анализ кормовых добавок на основе наночастиц смешанного оксида железа, стабилизированных бета-глюканом.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-44-20032, https://rscf.ru/project/25-44-20032/.

Библиографический список:

1. **Ахмеджанова, З.И.** Макро-и микроэлементы в жизнедеятельности организма и их взаимосвязь с иммунной системой (обзор литературы) / З.И. Ахмеджанова, Г.К. Жиемуратова, Е.А. Данилова и др. // Журнал теоретической и клинической медицины. – 2020. – №. 1. – С. 16-21.
2. **Спиваковский, Ю.М.** Микроэлементы и их роль в жизни человека / Ю.М. Спиваковский, А.Ю. Спиваковская // Медицинская сестра. – 2005. – №. 5. – С. 19-22.
3. **Чурин, Б.В.** Эссенциальные микроэлементы (Fe, Cu, Mn, Zn, Se, As) в печени и легких при алиментарном ожирении в эксперименте / Б.В. Чурин В.В. Асташов, В.А. Трунова и др. // Экспериментальная и клиническая гастроэнтерология. – 2011. – №. 6. – С. 59-63.
4. **López-Alonso, M.** Trace mineral imbalances in global health: challenges, biomarkers, and the role of serum analysis / M. López-Alonso, I. Rivas, M. Miranda // Nutrients. – 2025. – V. 17. – I. 13. – Art. № 2241. – 39 p. DOI: 10.3390/nu17132241
5. **Захарова, И.Н.** Дефицит витаминов и микроэлементов у детей и их коррекция / И.Н. Захарова,

Е.В. Скоробогатова, Е.Г. Обыночная, Н.А. Коровина // Педиатрия. Журнал им. Г.Н. Сперанского. – 2007. – Т. 86. – №. 3. – С. 112-118.
6. **Бельмер, С.В.** Микроэлементы и микроэлементозы и их значение в детском возрасте / С.В. Бельмер, Т.В. Гасилина // Вопросы современной педиатрии. – 2008. – Т. 7. – №. 6. – С. 91-96.
7. **Ягупова, В.Т.** Влияние микроэлемента железа на организм человека / В.Т. Ягупова, Д.Р. Везирова // Поиск (Волгоград). – 2019. – № 1 (10). – С. 74-77.
8. **Торшин, И.Ю.** Иерархия взаимодействий цинка и железа: физиологические, молекулярные и клинические аспекты / И.Ю. Торшин, О.А. Громова, Т.Р. Гришина, К.В. Рудаков // Трудный пациент. – 2010. – Т. 8. – №. 3. – С. 45-53.
9. **Шамов, И.А.** Железо, абсорбция, транспорт / И.А. Шамов, П.О. Гасанова // Вестник гематологии. – 2016. – Т. 12. – №. 1. – С. 31-38.
10. **Роженцев, Д.А.** Каталитические свойства в гетерогенной реакции Фентона поверхности нанопористого железа, полученного посредством электрохимического деаллоинга в расплавленных хлоридных смесях / Д.А. Роженцев, Р.Р. Мансуров, Н.К. Ткачев и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2021. – Вып. 13. – С. 919-927. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.919.
11. **Сокур, Т.Н.** Железодефицитная анемия и беременность. Роль меди и марганца в метаболизме железа / Т.Н. Сокур, В.А. Бурлев, Е.Н. Коноводова, Ю.В. Федорова // Поликлиника. – 2013. – Т. 1. – №. 1. – С. 57-60.
12. **Андреичев, Н.А.** Железодефицитные состояния и железодефицитная анемия / Н.А. Андреичев, Л.В. Балеева // Вестник современной клинической медицины. – 2009. – Т. 2. – №. 3. – С. 60-65.
13. **Тарасова, И.С.** Железодефицитная анемия у детей и подростков / И.С. Тарасова // Вопросы современной педиатрии. – 2011. – Т. 10. – №. 2. – С. 40-48.
14. **Дворецкий, Л.И.** Сульфат железа в лечении железодефицитной анемии: позиции сохраняются / Л.И. Дворецкий // Терапевтический архив. – 2017. – Т. 89. – №. 10. – С. 108-112. DOI: 10.17116/terarkh20178910108-112.
15. **Стуклов, Н.И.** Эффективность и переносимость препаратов железа. Что важнее? Существует ли оптимальное решение / Н.И. Стуклов, М.Ю. Кунина, Е.Н. Семенова // Поликлиника. – 2014. – Т. 2. – №. 1. – С. 48-53.
16. **Камзин, А.С.** Нанокомпозиты оксид графена/оксид железа (GrO/FeOx) для биомедицины: синтез и исследования / А.С. Камзин, В.С. Козлов, Е.В. Воронина и др. // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – №. 6. – С. 807-816. DOI: 10.21883/FTT.2021.06.50944.004.
17. **Баранова, О.В.** Использование различных форм железа в кормлении животных (обзор) / О.В. Баранова, Е.В. Кияева, С.В. Нотова // Животноводство и кормопроизводство. – 2025. – Т. 108. – №. 4. – С. 217-233. DOI: 10.33284/2658-3135-108-4-217.
18. **Нагдалян, А.А.** Исследование процесса полимерной стабилизации смешанного оксида железа амилопектином / А.А. Нагдалян, П.С. Леонтьев, А.Б. Голик и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2024. – Вып. 16. – С. 951-959. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.951.
19. IQmol Molecular Viewer. – Режим доступа: http://www.iqmol.org/. – 12.06.2026.
20. Q-Chem 6.3 User's Manual. – Режим доступа: https://manual.q-chem.com/6.1/. – 12.06.2026.
21. **Strens, R.G.J.** Diffuse reflectance spectra and optical properties of some iron and titanium oxides and oxyhydroxides / R.G.J. Strens, B.J. Wood // Mineralogical Magazine. – 1979. – V. 43. – I. 327. – P. 347-354. DOI: 10.1180/minmag.1979.043.327.06.
22. **Sherman, D.M.** Electronic spectra of Fe^{3+} oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV / D.M. Sherman, T.D. Waite // American Mineralogist. – 1985. – V. 70. – I. 11-12. – P. 1262-1269.

References:

1. Akhmedzhanova Z.I., Zhiemuratova G.K., Danilova E.A. et al. Makro-i mikroelementy v zhiznedeyatel'nocti organizma i ikh vzaimosvyaz' s immunnoj sistemoj (obzor literatury) [Macro- and microelements in the body's vital functions and their relationship with the immune system (literature review)], *Zhurnal teoreticheskoi i klinicheskoi meditsiny [Journal of Theoretical and Clinical Medicine]*, 2020, no. 1, pp. 16-21. (In Russian).
2. Spivakovsky Yu.M., Spivakovskaya A.Yu. Mikroelementy i ikh rol' v zhizni cheloveka [Microelements and their role in human life], *Meditsinskaya sestra [The Nurse]*, 2005, issue 5, pp. 19-22. (In Russian).
3. Churin B.V., Astashov V.V., Trunova V.A. et al. Essentsial'nye mikroelementy (Fe, Cu, Mn, Zn, Se, As) v pecheni i legkikh pri alimentarnom ozhirenii v eksperimente [Essential elements (Fe, Cu, Mn, Zn, Se, As) in the liver and lungs with alimentary obesity in the experiment], *Eksperimental'naya i klinicheskaya*

gastroenterologiya [Experimental and Clinical Gastroenterology], 2011, issue 6, pp. 59-63. (In Russian).
4. López-Alonso M., Rivas I., Miranda M. Trace mineral imbalances in global health: challenges, biomarkers, and the role of serum analysis, *Nutrients,* 2025, vol. 17, issue 13, art. no 2241, 39 p. DOI: 10.3390/nu17132241.
5. Zakharova I.N., Skorobogatova E.V., Obynochnaya E.G., Korovina N.A. Defitsit vitaminov i mikroelementov u detej i ikh korrektsiya [Deficiency of vitamins and trace elements in children and their correction], *Pediatriya. Zhurnal im. G.N. Speranskogo [Pediatrics Journal named after G.N. Speransky]*, 2007, vol. 86, issue 3, pp. 112-118. (In Russian).
6. Bel'mer S., Gasilina T. Mikroelementy i mikroelementozy i ikh znachenie v detskom vozraste [Microelements and microelementosis and their significance in childhood], *Voprosy sovremennoi pediatrii [Current Pediatrics]*, 2008, vol. 7, no. 6, pp. 91-96. (In Russian).
7. Yagupova V.T., Vezirova D.R. Vliyanie mikroelementa zheleza na organizm cheloveka [The effect of the trace element iron on the human body], *Poisk (Volgograd) [Search (Volgograd)]*, 2019, no. 1 (10), pp. 74-77. (In Russian).
8. Torshin I.Y., Gromova O.A., Grishina T.R., Rudakov K.V. Ierarkhiya vzaimodejstvij tsinka i zheleza: fiziologicheskie, molekulyarnye i klinicheskie aspekty [Hierarchy of zinc and iron interactions: physiological, molecular and clinical aspects], *Trudnyi patsient* [*A difficult patient*], 2010, vol. 8, no. 3, pp. 45-53. (In Russian).
9. Shamov I.A., Gasanova P.O. Zhelezo, absorbtsiya, transport [Ferrum, absorption, transport], *Vestnik gematologii [Bulletin of Hematology]*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 31-38. (In Russian).
10. Rozhentsev D.A., Mansurov R.R., Tkachev N.K. et al. Kataliticheskie svoistva v geterogennoi reaktsii Fentona poverkhnosti nanoporistogo zheleza, poluchennogo posredstvom ehlektrokhimicheskogo dealloinga v rasplavlennykh khloridnykh smesyakh [Catalytic properties in the heterogeneous fenton reaction of the surface of nanoporous iron obtained by electrochemical dealoiyng in melted chloride mixtures], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2021, issue 13, pp. 919-927. DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.919. (In Russian).
11. Sokur T.N., Burlev V.A., Konovodova E.N., Fedorova Yu.V. Zhelezodefitsitnaya anemiya i beremennost'. Rol' medi i margantsa v metabolizme zheleza [Iron deficiency anemia and pregnancy. The role of copper and manganese in iron metabolism], *Poliklinika [Polyclinic]*, 2013, vol. 1, no. 1, pp. 57-60. (In Russian).
12. Andreichev N.A., Baleyeva L.V. Zhelezodefitsitnye sostoyaniya i zhelezodefitsitnaya anemiya [Iron deficiency and iron deficiency anemia], *Vestnik Sovremennoi Klinicheskoi Mediciny [The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine]*, 2009, vol. 2, issue 3, pp. 60-65. (In Russian).
13. Tarasova I.S. Zhelezodefitsitnaya anemiya u detej i podrostkov [Iron deficiency anemia in children and adolescents], *Voprosy sovremennoi pediatrii [Current Pediatrics],* 2011, vol. 10, no. 2, pp. 40-48. (In Russian).
14. Dvoretsky L.I. Sul'fat zheleza v lechenii zhelezodefitsitnoj anemii: pozitsii sokhranyayutsya [Ferrous sulfate in the treatment of iron deficiency anemia: the positions continue], *Terapevticheskii arkhiv [Therapeutic Archive]*, 2017, vol. 89, issue 10, pp. 108-112. DOI: 10.17116/terarkh20178910108-112. (In Russian).
15. Stuklov N.I., Kunina M.Yu., Semenova E.N. Effektivnost' i perenosimost' preparatov zheleza. Chto vazhnee? Sushchestvuet li optimal'noe reshenie [Efficacy and tolerability of iron preparations. What is more important? Is there an optimal solution], *Poliklinika [Polyclinic]*, 2014, vol. 2, no. 1, pp. 48-53. (In Russian).
16. Kamzin A.S., Obaidat I.M., Kozlov V.S. et al. Graphene oxide/iron oxide (gro/feox) nanocomposites for biomedicine: synthesis and study, *Physics of the Solid State*, 2021, vol. 63, issue 6, pp. 856-865. DOI: 10.1134/S1063783421060123.
17. Baranova O.V., Kiyaeva E.V., Notova S.V. Ispol'zovanie razlichnykh form zheleza v kormlenii zhivotnykh (obzor) [Different forms of iron in feeding of animals], *Zhivotnovodstvo i kormoproizvodstvo [Animal Husbandry and Fodder Production]*, 2025, vol. 108, no. 4, pp. 217-233. DOI: 10.33284/2658-3135-108-4-217. (In Russian).
18. Nagdalian A.A., Leontiev P.S., Golik A.B. Issledovanie protsessa polimernoj stabilizatsii smeshannogo oksida zheleza amilopektinom [Investigation of the process of polymer stabilization of mixed iron oxide with amylopectin], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2024, issue 16, pp. 951-959. DOI: 10.26456/pcascnn/2024.16.951. (In Russian).
19. IQmol Molecular Viewer. Available at: www.url: http://www.iqmol.org/ (accessed 12.06.2026).
20. Q-Chem 6.3 User's Manual. Available at: https://manual.q-chem.com/6.3/ (accessed 12.06.2026).
21. Strens, R.G.J., Wood B.J. Diffuse reflectance spectra and optical properties of some iron and titanium oxides and oxyhydroxides, *Mineralogical Magazine,* 1979, vol. 43, issue 327, pp. 347-354. DOI: 10.1180/minmag.1979.043.327.06.
22. Sherman, D.M., Waite T.D. Electronic spectra of Fe^{3+} oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV, *American Mineralogist,* 1985, vol. 70, issue 11-12, pp. 1262-1269.