

Оригинальная статья

DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19>

УДК 630*620.22:544.4:544.723:674.8

Композитный материал с высокой адсорбционно-каталитической активностью на основе биоугля из опилок березы повислой (*Betula Pendula*)

Алёна В. Дорошенко¹ ✉ al.doroschenko2016@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>

Мария В. Бережная¹, cnurova2010@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3511-8645>

Елена В. Томина^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, Воронеж, 394087, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, Воронеж, 394018, Российская Федерация

В настоящее время актуальной задачей является поиск новых способов очистки сточных вод на основе дешевых экологических материалов. Композитные материалы на основе биоугольной матрицы с наноразмерными модификаторами позволяют решать задачи повышения эффективности адсорбции поллютантов и фотокаталитической очистки водных сред. Методом цитратного горения синтезированы наноразмерный феррит кобальта со структурой шпинели CoFe_2O_4 и композит на основе биоугля с наночастицами феррита кобальта $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{C}$. Уголь для композита получен карбонизацией березовых опилок при температуре 600 °С. Методом рентгеновской дифрактометрии подтверждено формирование наноразмерных кристаллитов шпинели CoFe_2O_4 во всех образцах. Средний размер наночастиц уменьшается от 31 ± 4 нм для чистого феррита кобальта до 17 ± 2 нм для композита на основе биоугля. Методом ИК-спектроскопии подтверждено формирование фазы кобальтовой шпинели и наличие большого количества поверхностных функциональных групп ($-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}=\text{C}$, $-\text{CH}_3$) в композите. Проведен анализ адсорбционно-каталитической активности CoFe_2O_4 и $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{C}$ в отношении очистки водных растворов от 2,4-динитрофенола (ДНФ). Установлена высокая эффективность очистки от ДНФ наноразмерным ферритом кобальта (99.95%) и композитом на основе биоугля (96.84%) за счет сорбции на пористых материалах и фотокаталитической деградации токсиканта в условиях УФ облучения. Результаты исследования подтверждают, что композиты на основе биоугля из отходов деревообрабатывающей промышленности являются перспективными сорбентами/катализаторами для очистки сточных вод бумажной, фармацевтической и текстильной промышленности от органических поллютантов. Благодаря магниточувствительности композита за счет наночастиц CoFe_2O_4 значительно упрощается выделение сорбента/катализатора внешним магнитным полем с целью последующей регенерации и повторного использования.

Ключевые слова: пиролиз, биоуголь, феррит кобальта, композит, сорбция, фотокатализ

Финансирование: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Дорошенко А.В. Композитный материал с высокой адсорбционно-каталитической активностью на основе биоугля из опилок березы повислой (*Betula Pendula*) / А.В. Дорошенко, М.В. Бережная, Е.В. Томина // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 4 (60). – С. 327-342. – Библиогр.: с. 336-341 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19>.

Поступила 25.07.2025. Пересмотрена 17.11.2025. Принята 30.11.2025. Опубликовано онлайн 26.12.2025.

Article

Composite material with high adsorption-catalytic activity based on biochar from sawdust of birch (*Betula Pendula*)

Alyona V. Doroshenko¹ ✉ al.doroschenko2016@yandex.ru,  <https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>

Maria V. Berezhnaya¹, cnurova2010@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-3511-8645>

Elena V. Tomina^{1,2}, tomina-e-v@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

¹ Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, 394087, Russian Federation

² Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, 394018, Russian Federation

Abstract

Currently, a pressing issue is the search for new methods of wastewater treatment based on cheap environmentally friendly materials. Composite materials based on a biocoal matrix with nanosized modifiers make it possible to solve problems of increasing the efficiency of pollutant adsorption and photocatalytic purification of aquatic environments. Nanosized cobalt ferrite with a CoFe_2O_4 spinel structure and a biocoal-based composite with cobalt ferrite nanoparticles $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{C}$ were synthesized by the citrate combustion method. Carbon for the composite was obtained by carbonization of birch sawdust at a temperature of 600 °C. The formation of nanosized CoFe_2O_4 spinel crystallites in all samples was confirmed by X-ray diffractometry. The average size of nanoparticles decreases from 31 ± 4 nm for pure cobalt ferrite to 17 ± 2 nm for a biocoal-based composite. The formation of the cobalt spinel phase and the presence of a large number of surface functional groups ($-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{O}$, $-\text{C}=\text{C}$, $-\text{CH}_3$) in the composite were confirmed by IR spectroscopy. The adsorption and catalytic activity of CoFe_2O_4 and $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{C}$ in relation to the purification of aqueous solutions from 2,4-dinitrophenol (DNP) was analyzed. High efficiency of DNP purification by nanosized cobalt ferrite (99.95%) and biochar-based composite (96.84%) was established due to sorption on porous materials and photocatalytic degradation of the toxicant under UV irradiation. The results of the study confirm that biochar-based composites from wood processing waste are promising sorbents/catalysts for the purification of wastewater from paper, pharmaceutical and textile industries from organic pollutants. Due to the magnetic sensitivity of the composite due to CoFe_2O_4 nanoparticles, the extraction of the sorbent/catalyst by an external magnetic field is significantly simplified for subsequent regeneration and reuse.

Keywords: *pyrolysis, biochar, cobalt ferrite, composite, sorption, photocatalysis*

Funding: this study has been supported by the grants the Russian Science Foundation, RSF № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

Conflict of interest: the authors declares no conflict of interest.

For citation: Doroshenko A.V., Berezhnaya M.V., Tomina E.V. (2025). Composite material with high adsorption-catalytic activity based on biochar from sawdust of birch (*Betula Pendula*). Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 4 (60), pp. 327–342 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.4/19>.

Received 25.07. 2025. **Revised** 17.11.2025. **Accepted** 30.11.2025. **Published online** 26.12.2025.

Введение

Глобальный дефицит воды усугубляется не только ограниченными запасами, но и ухудшением её качества из-за ненадлежащего управления ресурсами и загрязнения [1, 2]. Сточные воды текстильных, кожевенных, фармацевтических, целлюлозно-бумажных производств содержат комплекс опасных веществ – от синтетических красителей до токсичных металлов, что является серьезной экологической проблемой [3].

Нитрофенолы и их производные – устойчивые, токсичные и канцерогенные загрязнители водных экосистем, образующиеся в результате промышленных процессов. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) относит 2-нитрофенол, 4-нитрофенол и 2,4-динитрофенол к числу приоритетных опасных веществ [4, 5]. Соединение 2,4-DNP, используемое при производстве взрывчатых веществ, красителей и пестицидов, проявляет выраженную цитотоксичность и мутагенность. Нитробензольные соединения, широко применяемые в химической промышленности, также характеризуются низкой биоразлагаемостью и высокой токсичностью, представляя угрозу для экосистем и здоровья человека [6, 7].

Согласно [8] адсорбция и фотокаталитическое окисление являются основными эффективными методами очистки сточных вод.

Перспективными материалами для катализа считаются ферриты со структурой шпинели (MFe_2O_4), обеспечивающие степень очистки до 94% за счет окислительно-восстановительных переходов ионов Fe^{2+}/Fe^{3+} [9-11]. Интересен в этом плане феррит кобальта ($CoFe_2O_4$) – фотокатализатор с высокой магнитной анизотропией и коэрцитивной силой, химической стабильностью и шириной запрещенной зоны (~2 эВ). Его биметаллическая

структура обеспечивает эффективный перенос электронов между ионами Co и Fe, повышая каталитическую активность и устойчивость к вымыванию металлов [12, 13].

Однако склонность наночастиц $CoFe_2O_4$ к агломерации снижает число активных центров [14-16]. Эффективным решением для повышения дисперсии и переноса электронов является нанесение магнитных ферритов на углеродную матрицу, обладающую развитой пористостью, кислородсодержащими группами и способностью стабилизировать магнитные наночастицы [17]. Такой гибридный материал сочетает преимущества обоих компонентов: высокую каталитическую активность ферритов, адсорбционные свойства углерода и удобное магнитное разделение, что обеспечивает синергетический эффект. Использование углеродной матрицы способно снизить стоимость конечного продукта (сюда можно вставить).

Авторы [18] продемонстрировали высокую эффективность металл-угольных катализаторов в процессах очистки от смол и тяжелых металлов. Исследователи [19] выявили, что железосодержащие биоугольные катализаторы демонстрируют более высокую каталитическую активность в процессе разложения толуола по сравнению с традиционными катализаторами на основе оливина и никеля.

Пиролизный уголь обладает широким спектром функциональных свойств, включая развитую удельную поверхность, высокую пористость, наличие поверхностных функциональных групп (карбонильные, гидроксильные и карбоксильные группы образуют химические связи с органическими загрязнителями, включая водородные связи и π - π -взаимодействия), а также способность к электростатическим и ионообменным взаимодействиям. Благодаря физической и химической адсорбции БУ способен удерживать молекулы загрязнителей без

разрушения собственной структуры, демонстрируя высокую стабильность [20]. Его производство характеризуется относительно низкими затратами, что делает биоуголь наиболее подходящим носителем для высокодисперсных катализаторов на основе наночастиц [21]. Важным преимуществом биоугля является его способность прочно связывать ионы металлов и стабилизировать наночастицы, что существенно расширяет возможности его практического использования [22]. Кроме того, ароматические структуры биоугля способны взаимодействовать с токсичными соединениями за счет донорно-акцепторных механизмов, что повышает эффективность очистки [23-25]. Перспективным прекурсором для получения биоуглей являются древесные отходы (опилки, стружки, щепа). Доля таких отходов в РФ достаточно велика, тогда как процент их вторичного использования весьма незначителен. Проблемой использования биоугля является его затрудненное отделение от реакционной среды в силу высокой дисперсности и легкости, что усложняет его регенерацию. В этом плане представляются перспективными композиты биоугля с магнитными наноразмерными материалами, что позволит использовать для отделения сорбента/катализатора методы магнитной сепарации.

Ченг-Ди Донг и др. [26] продемонстрировали превосходство магнитного композита Fe_3O_4/RNB (на основе биоугля из рисовой шелухи) над чистым магнетитом в удалении эфиров фталевой кислоты из морских донных отложений. Повышенная эффективность объясняется синергетическим эффектом между наночастицами Fe_3O_4 и пористой углеродной матрицей, а также наличием кислородсодержащих функциональных групп на поверхности композита.

Авторы [27] отметили, что сочетание биоугля с наночастицами TiO_2 усилило фотокаталитическую деградацию сульфаметоксазола (СМЗ) за счёт увеличения адсорбции загрязняющих веществ на поверхности композита, уменьшения рекомбинации электрон-дырочных пар (e^-/h^+), расширения диапазона поглощения в видимом свете благодаря свободным электронам в структуре биоугля. В

исследовании Кима и соавторов [28] было показано, что композит TiO_2 /биоуголь превосходит коммерческий TiO_2 по адсорбционной способности и скорости фотокаталитической деградации СМЗ под УФ-излучением благодаря гидрофобным взаимодействиям между поверхностью биоугля и молекулами СМЗ. В исследовании [29] было установлено, что модификация диоксида титана биоуглем, полученным из биомассы, существенно повышает его фотокаталитическую активность в процессах очистки воды. Композитный материал демонстрирует сужение запрещённой зоны TiO_2 с 3.40 до 2.44 эВ, биоуголь предотвращает агрегацию наночастиц TiO_2 , уменьшается их размер с 40.6 до 22.8 нм. Помимо этого, биоуголь действует как акцептор электронов, подавляя рекомбинацию зарядов и повышая эффективность фотокатализа. Уменьшение ширины запрещенной зоны для композита биоугля с наночастицами TiO_2 также отмечают Ядун Ду с коллегами [30]. Таким образом, применение композитных материалов на основе биоугля и фотокатализаторов не только повышает эффективность очистки воды, но и способствует созданию устойчивых и экономически доступных технологий водоочистки.

Анализ современных исследований показывает, что композиты на основе биоугля и неорганических нанокатализаторов эффективно усиливают процессы адсорбции и фотокаталитической деградации органических загрязнителей за счёт синергетического взаимодействия между пористой углеродной матрицей и активной нанофазой. Однако большинство работ [26–30] сосредоточено на фотокатализе (TiO_2 /биоуголь, Fe_3O_4 /биоуголь) и деградации антибиотиков или фталатов, тогда как системы, основанные на феррите кобальта, и особенно их применение в реакциях Фентона для удаления нитрофенолов, изучены крайне ограниченно. Остаются неясными механизмы распределения ролей между адсорбентом и каталитически активной фазой, вклад каждого компонента в суммарную очистку, а также кинетика деградации таких устойчивых соединений, как 2,4-динитрофенол.

Научная новизна работы заключается в установлении кинетики и механизма адсорбции и каталитической дегградации 2,4-динитрофенола на предлагаемом композите $\text{CoFe}_2\text{O}_4@\text{C}$ и выявлении вклада каждого из компонентов композита в суммарную эффективность очистки от токсиканта.

Целью данной работы является исследование адсорбционно-каталитической активности композита феррита кобальта с биоуглем в процессе удаления 2,4-динитрофенола из водной среды и установление синергетического эффекта совместного действия матрицы-адсорбента и наноразмерного фотокатализатора.

Материалы и методы

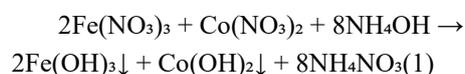
Полученный из опилок березы повислой (*Betula Pendula*) размером менее 1 мм, биоуголь был подвергнут карбонизации. Процесс проводили в герметичном реакторе при температуре 600 °С в течение 3 часов со скоростью нагрева 10 °С/мин. Размер частиц биоугля определяли методом механического просеивания на ситах согласно методике [31]. Для анализа распределения частиц по размерам использовались сита со стандартными ячейками 200 и 315 мкм. Массовые доли полученных фракций угля (>315 мкм, 200-315 мкм и <200 мкм) составили 28,8 %, 30,2 % и 41,0 % соответственно. Для синтеза использовалась фракция 200-315 мкм.

Активацию биоугля проводили путем обработки 2 М раствором КОН при 21 °С в течение 2 часов при постоянном перемешивании. Массовое соотношение биоуголь – КОН составляло 1:4. На начальном этапе (первые 30 минут) суспензию подвергали ультразвуковому воздействию, что способствовало более равномерному распределению реагента и интенсификации диффузионных процессов. Ультразвуковую обработку проводили с использованием диспергатора ВУ-09-«Я-ФП»-0 с номинальной мощностью 110 Вт на частоте 22 кГц. Объем обрабатываемой реакционной смеси составлял 100 мл. Удельная энергия воздействия составляла примерно 1.1 Вт/мл. Затем БУ высушивали при температуре 110 °С в сушильном шкафу (Смоленское СКТБ СПУ ШС-80-01 СПУ).

Определение насыпной плотности [32] осуществляли методом свободного заполнения мерного цилиндра с последующим взвешиванием. Массовую долю влаги [33] в пробе биоугля определяли по потере массы навески при высушивании (105 °С) до постоянной массы. Значение рН водной вытяжки (ГОСТ 33578-2015) устанавливали после кипячения угольной суспензии в дистиллированной воде и её последующего охлаждения до комнатной температуры.

Синтез шпинели CFi композита $\text{CF}@\text{C}$ (в соотношении феррит : биоуголь как 1:4) осуществляли методом цитратного горения (рис.1). Для проведения эксперимента были взяты кристаллогидраты $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (ЧДА) и $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ЧДА) в стехиометрическом соотношении. Далее их растворили в 100 мл дистиллированной воды. Затем к раствору добавляли (реакция 1) 28% водный раствор аммиака (ХЧ). Полученную смесь гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Co}(\text{OH})_2$ нагревали на магнитной мешалке до температуры ~250°С. На стадии нагревания добавляли 1 М раствор лимонной кислоты, при этом происходило образование цитратных комплексов железа и кобальта. Для синтеза композитов на этом этапе вводили уголь с размером частиц 200-315 мкм. В ходе дальнейшего нагревания происходило вспучивание смеси ("цитратное горение") с образованием рыхлого порошка CoFe_2O_4 на поверхности угольной матрицы.

Полученные феррит CF и композит $\text{CF}@\text{C}$ черного цвета подвергли промывке дистиллированной водой, фильтрации, сушке на воздухе. Затем образцы прокаливали в муфельной печи (SNOL 8.2/1100, АВ "Umega", Литва) при 600 °С в течение 1 часа.



Определение фазового состава синтезированных образцов осуществляли методом рентгенофазового анализа (дифрактометр Empyrean B.V. с анодом Cu ($\lambda = 1.54060$ нм)).

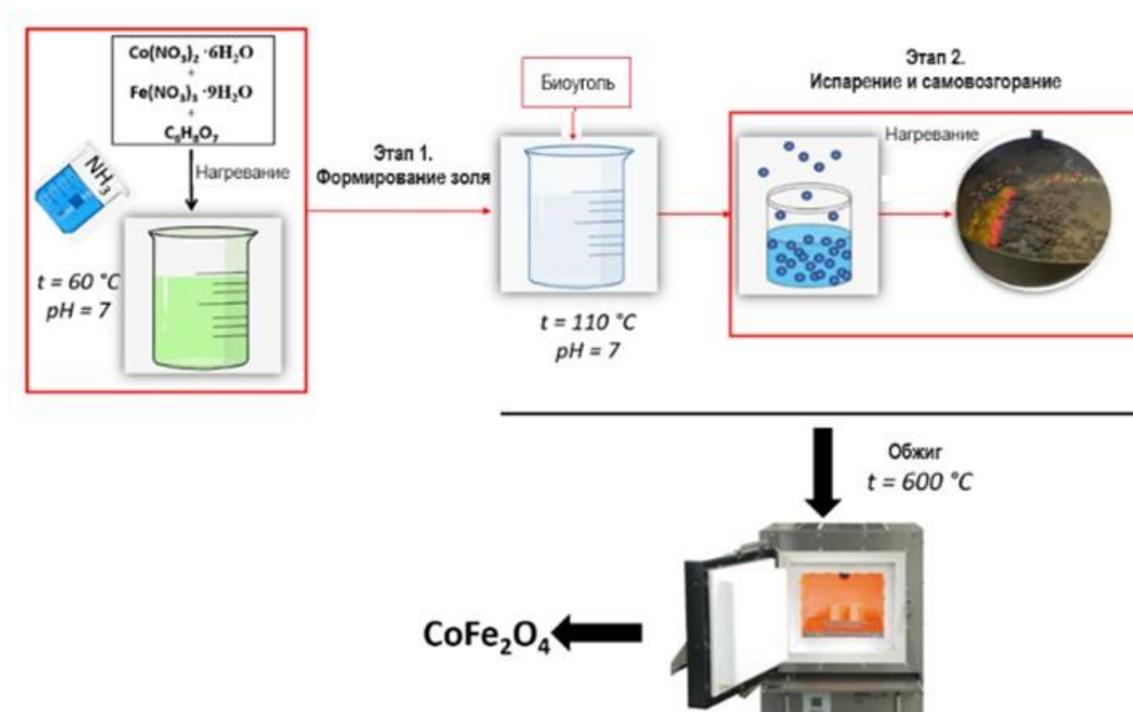


Рисунок 1. Общая схема синтеза образцов феррита-шпинели CF и композита CF@C

Figure 1. General scheme of synthesis of ferrite-spinel CF and CF@C composite samples

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Идентификация фаз проводилась с использованием базы данных JCPDS PCPDFWIN (International Centre for Diffraction Data, 1997).

Размер областей когерентного рассеяния (ОКР) определялся по уширению линий рентгеновской дифракции согласно формуле Дебая-Шеррера [34]:

$$D = K\lambda / (\beta \cos\theta), \quad (4)$$

где K — постоянная Шеррера (близка к 0.9 для сферических частиц), β — ширина пика на половине высоты в радианах.

Исследуемые образцы CF и CF@C были охарактеризованы с помощью ИК-Фурье спектроскопии. Спектры снимались на приборе Vertex-70 (Bruker) с алмазной приставкой Platinum ATR, обеспечивающей измерение в режиме нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне 4000-100 см^{-1} . Обработка данных проводилась в программе Opus 8.0. Фотокаталитическую активность полученных материалов CF и CF@C оценили в процессе

окисления 2,4-динитрофенола пероксидом водорода под ультрафиолетовым облучением ($\lambda=270$ нм, источник – УФ-лампа Nuobi UVC-E27, 40W) при перемешивании магнитной мешалкой (600 об/мин). Расстояние от лампы до реакционной смеси составляло 10 см. Концентрацию красителя определяли с помощью фотоколориметра «КФК-3-01 “ЗОМЗ”». Измерения проводились в кварцевых кюветах с оптической длиной пути 20 мм. Для 2,4-динитрофенола (ДНФ) использовалась аналитическая длина волны 364 нм. Для поддержания pH на уровне 4.4 применялся ацетатный буфер. К 10 мл реакционного раствора (150 мг/л) добавляли 0.25 г CF или CF@C и выдерживали в темной камере (30x20 см, из нержавеющей стали) в течение 60 минут для достижения адсорбционного равновесия. После этого концентрации ДНФ составили 90 мг/л для CF и 20 мг/л для CF@C. Для оценки фотокаталитических свойств CF и CF@C к растворам добавляли 5 мл 10%-ного раствора

пероксида водорода (ОСЧ, CAS номер: 7722-84-1, «ISOLAB»), что соответствовало его концентрации 75 ммоль/л. Концентрация ДНФ измерялась через заданные промежутки времени.

Равновесная сорбционная емкость образцов рассчитывалась по формуле:

$$A = \frac{(C_n - C_p) \cdot V}{m}, \quad (5)$$

где A – количество адсорбированного красителя, мг/г, C_n – начальная концентрация раствора, мг/л, C_p – равновесная концентрация раствора, мг/л, V – объем раствора, л, m – масса образца, г.

Степень очистки R раствора от ДНФ рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} * 100\%, \quad (6)$$

где C_0 – начальная концентрация красителя в растворе, мг/л; C – концентрация красителя в растворе в определенный момент времени, мг/л.

Результаты и обсуждение

Биоуголь, используемый в качестве матрицы для формирования композитного материала, при влажности 4.3 % и насыпной плотности 141.5 г/л имел значение pH 7.1. Такое значение характерно для материала, прошедшего карбонизацию при 600°C, и свидетельствует об отсутствии значительного количества кислых кислородсодержащих функциональных групп, которые могли бы подкислять среду.

Анализ дифрактограмм чистого феррита кобальта и композита CF@C выявил пики, соответствующие плоскостям (220), (311), (400), (422), (440), (511) и (620). Это подтверждает формирование однофазной кубической шпинели $CoFe_2O_4$ (JCPDS № 79-1744) в составе композита. Наличие высокого фона и уширенных рефлексов на дифрактограмме CF@C указывает на рентгеноаморфное состояние биоугля (рис. 2).

Средний размер ОКР наночастиц феррита кобальта, рассчитанный с использованием формулы Дебая – Шеррера, составляет 31 ± 4 нм для CF и 17 ± 2 нм для композита CF@C, что подтверждает данные [30] о меньшем размере наночастиц при их синтезе на поверхности матрицы и объясняется

барьерным эффектом матрицы, препятствующим коалесценции и дальнейшему росту наночастиц.

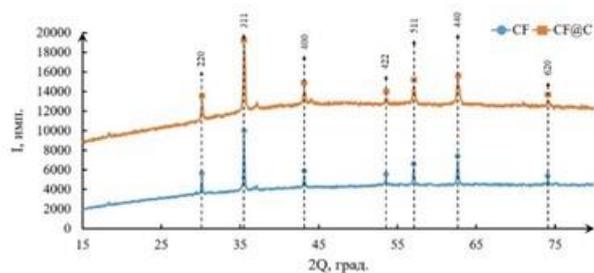


Рисунок 2. Результаты рентгенофазового анализа образцов CF и CF@C

Figure 2. Results of X-ray phase analysis of CF and CF@C samples

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

На ИК-спектре поглощения феррита кобальта (рис. 3) присутствует минимум пропускания в области $535-540 \text{ см}^{-1}$, который согласно Уолдрону [35] соответствует валентному колебанию катион-анионной связи M_A-O в тетраэдрических позициях. Полоса в районе $395-400 \text{ см}^{-1}$ соответствует валентному колебанию катион-анионной связи M_B-O в октаэдрических позиция [36].

На ИК-спектре CF@C (рис. 3) слабо выражен характерный для $CoFe_2O_4$ минимум пропускания связи M_A-O в районе $550 - 560 \text{ см}^{-1}$, полоса, соответствующая связи M_B-O , не идентифицируется. Вероятной причиной этого является сильный экранирующий эффект углеродной матрицы, приводящий к поглощению ИК-излучения в данной области, а также малый размер частиц, приводящий к размыванию характеристичных полос. В спектре наблюдаются полосы поглощения в диапазоне $1550-1710 \text{ см}^{-1}$, соответствующие колебаниям двойных связей углерод-углерод ($C=C$). В районе 1600 см^{-1} эти колебания $C=C$ накладываются на сигналы от хиноидных группировок $C=C$. Широкая область пониженного пропускания (минимум) между 1000 и 1500 см^{-1} , вероятно, является результатом суммирования нескольких сигналов: полос в диапазоне $1450-1500 \text{ см}^{-1}$, связанных с валентными

колебаниями связей С–ОН, и полос в диапазоне 1000-1250 см⁻¹, относящихся к колебаниям связей С–О в эфирных и карбоксильных группах. Минимум пропускания около 800 см⁻¹ указывает на присутствие арильных фрагментов и деформационных колебаний С–Н связей [37-39].

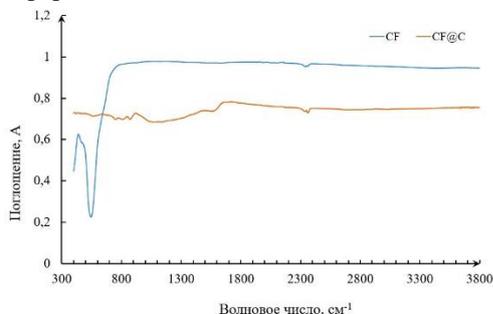


Рисунок 3. ИК-спектры шпинели CFкомпозитаCF@C

Figure 3. IR-spectra of CF spinel and CF@C composite

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Таким образом, методом ИК-спектроскопии подтвержден полифункциональный характер поверхности композита и присутствие на поверхности наночастиц CoFe₂O₄.

Определение адсорбционно-каталитической активности шпинели CF и композитаCF@C в отношении окисления ДНФ пероксидом водорода показало, что степень очистки раствора с начальной концентрацией ДНФ 150 мг/л после выдержки в темноте в течение часа за счет сорбции на чистом феррите и композите составляет 3.99% и 81.72% соответственно. Эти данные подтверждают низкие адсорбционные свойства наноразмерных ферритов-шпинелей относительно органических токсикантов, содержащих ароматические кольца, что, видимо, связано с одноименными зарядами поверхности ферритов и сорбируемой молекулы ДНФ [40]. Для 2,4-динитрофенола адсорбция может осложняться образованием внутримолекулярной водородной связи между водородом гидроксильной группы и ближайшим кислородом нитрогруппы в орто-положении, что сопровождается значительным увеличением отрицательного заряда на кислороде другой нитрогруппы.

Причиной высокой сорбционной способности композита CF@C по отношению к ДНФ является обилие разнообразных функциональных групп на его поверхности, которые взаимодействуют с токсикантом с образованием, прежде всего, водородных связей. Не исключается возможность реализации π-π-взаимодействий, вклад в адсорбцию вносит и электростатическое взаимодействие между адсорбентом и молекулами ДНФ.

Сорбционная емкость, рассчитанная по формуле 5, составила 4,04 мг/г и 4,80 мг/г для CF и CF@C соответственно. Таким образом, композитный материал обладает сорбционной способностью, в 1,2 раза превышающей аналогичный показатель для чистого феррита. Однако фотокаталитическая активность наноразмерного CoFe₂O₄ в процессе окислительной деградации ДНФ выше (степень деградации–99.95%), чем у CoFe₂O₄@C (степень деградации–84.71%). Ухудшение фотокаталитической активности композита можно объяснить комплексом факторов: во-первых, углеродная матрица экранирует УФ-излучение, уменьшая долю излучения, достигающего активных центров феррита кобальта. Во-вторых, углерод провоцирует рекомбинацию фотообразованных носителей заряда. Наконец, конкурирующая адсорбция органических молекул на матрице ограничивает взаимодействие пероксида водорода с активными центрами феррита.

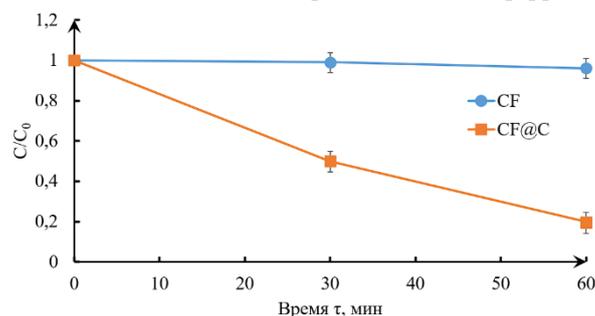


Рисунок 4. Сорбция 2,4-динитрофенола образцами шпинели CF и композитаCF@C600.

Figure 4. Sorption of 2,4-dinitrophenol by CF spinel and CF@C600 composite samples.

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

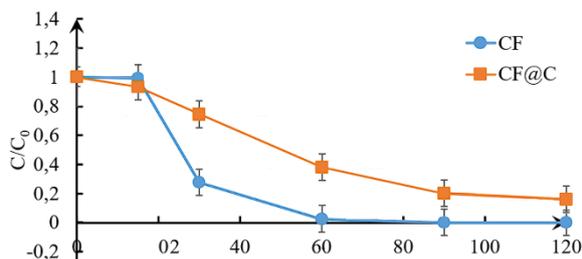


Рисунок 5. Кинетические кривые окисления ДНФ пероксидом водорода в присутствии CF и композита CF@C в координатах $C/C_0 - t$

Figure 5. Kinetic curves of DNP oxidation by hydrogen peroxide in the presence of CF and CF@C composite in coordinates $C/C_0 - t$ coordinates

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Удаление ДНФ из воды достигается комбинированным методом: сорбцией на пористых материалах и фотокаталитической деградацией под действием УФ-излучения. Эффективность очистки составила 99.95% для CF и 96.84% для CF@C. Все данные прошли статистическую обработку. Нормальность распределения проверялась

критерием Колмогорова, а статистическая значимость различий – тестом Стьюдента. Доверительная вероятность α была установлена на уровне 0.95, согласно ГОСТ Р 50779.22-2005.

При несколько меньшей степени очистки композит обладает существенным преимуществом – его магнитная управляемость позволяет легко отделять материал после процесса очистки без использования ультрацентрифугирования. Таким образом, CF@C сочетает высокую эффективность и удобство в обращении, что делает его более перспективным для практического применения. Переход от нанокристаллического феррита кобальта к композиту, где органической матрицей выступает биоуголь, приготовленный из древесных отходов, а модификатором – наноразмерный феррит кобальта позволяет за счет синергизма сорбции и фотодegradации поллютанта достигать высокой степени очистки при возможном удешевлении самого сорбента/катализатора.

Магниточувствительность композита, определяемая наночастицами $CoFe_2O_4$, значительно облегчает его выделение из водной среды за счет внешнего магнитного поля (рис. 6).



Рисунок 6. Магнитная сепарация CF@C из водной дисперсии при действии Nd-магнита
Figure 6. Magnetic separation of CF@C from aqueous dispersion under the action of a Nd magnet

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Помимо вышеперечисленного синтез предлагаемого полифункционального композитного материала решает проблему переработки древесных отходов, из которых на данный момент только половина подвергается вторичной переработке.

Заключение

Установлена сопоставимая эффективность очистки водных растворов от 2.4-

динитрофенолананоразмерным ферритом кобальта CF (99.95%) и композитом на основе биоугля CF@C (96.84%). Однако композитный материал обладает ключевыми практическими преимуществами: решает экологическую проблему вторичной переработки древесных отходов; предположительно позволяет снизить себестоимость материала в сравнении с чистым наноразмерным ферритом, что

требует проведения отдельного технико-экономического обоснования; позволяет легко извлекать сорбент/катализатор методом магнитной сепарации, предотвращая вторичное загрязнение. Эти факторы делают CF@C более перспективным для промышленного применения, несмотря на незначительное снижение степени очистки от ДНФ по сравнению с чистым нанокристаллическим ферритом. Кроме того, переход от CF к CF@C представляет собой целенаправленный компромисс, в рамках которого небольшое снижение общей

эффективности системы считается допустимым ради существенного улучшения ключевых эксплуатационных параметров (сорбция, управляемость).

Для подтверждения промышленной применимости материала CF@C требуются испытания на реальных сточных водах, а также оценка его ресурсоэффективности, включая способность к регенерации и многократному использованию.

Список литературы

1. Fito J., Van Hulle S.W.H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. *Environment, Development and Sustainability*. 2021; 23: 2949–2972. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y>.
2. Du Plessis A. Persistent degradation: global water quality challenges and required actions. *One Earth*. 2022; 5: 129–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005>.
3. Rong W., Zhipeng T., Chenyang Z., Wei S., Zhuo C., Xin W., Mengqi L. Research progress on heavy metal wastewater treatment in the integrated circuit industry: From pollution control to resource utilization. *Separation and Purification Technology*. 2025; 376(2): 134033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134033>.
4. Ruzgar A., Karatas Y., Yurderi M., Sener L., Gulcan M., Zahmakiran M. Synthesis, characterization, and determination of the catalytic roles of tungsten (VI) oxide-supported Pd (0) nanoparticles in the reduction of nitroaromatic pollutants. *Materials Chemistry and Physics*. 2025; 346: 131368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131368>.
5. Gautam N., Deka D., Das G. Efficient adsorption of nitroaromatic compounds from reusable hierarchical porous biochar emanates from the Ananas comosus crown and Citrus limetta fibers. *Chemical Engineering Science*. 2025; 308: 121408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121408>.
6. Sangamithirai D., Gopi Krishna K.R., Pandurangan A. Investigating the synergistic effect of RuO₂ nanoparticle-decorated V₂O₅ nanoflakes for sensitive detection of 2,4-dinitrophenol and 2,4-dinitrotoluene. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2024; 970: 118554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118554>.
7. Meira A.C.R., Mezalira D.Z., Tondo D.W., Bail A., Arizaga G.G.C., Domingos J.B., Giona R.M. Efficient and versatile catalyst for nitrobenzene compounds reduction based on magnetite coated with semi-metallic bismuth. *Applied Surface Science*. 2025; 684: 161866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161866>.
8. Fito J., Kefeni K.K., Nkambule T.I. The potential of biochar-photocatalytic nanocomposites for removal of organic micropollutants from wastewater. *Science of The Total Environment*. 2022; 829: 154648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154648>.
9. Soifi A., Hajjaoui H., Elmoubarki R., Abdennouri M. Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants. *Applied Surface Science Advances*. 2021; 6: 100145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100145>.
10. Томина Е.В., Ходосова Н.А., Синельников А.А., Жабин А.В., Куркин Н.А., Новикова Л.А. Влияние метода формирования композита наноразмерный CoFe₂O₄/нонtronит на его структуру и свойства. Конденсированные среды и межфазные границы. 2022; 24(3): 379–386. DOI: 10.17308/kcmf.2022.24/9861.
11. Jarariya R., Suresh K. Spinel ferrite nanomaterials - MgFe₂O₄ - Synthesis by appropriate microwave solution combustion (Msc) method of visible light-responsive photocatalyst for Rb21 dye degradation. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 34: 104576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.393>.

12. Gerbaldo M.V., Peralta M.F., Marchetti S.G., Mendoza S.M., Elias V.R., Crivello M.E., Mendieta S.N. Innovative spinel ferrites for efficient photocatalytic mineralization of carbamazepine in wastewater. *Applied Surface Science*. 2025; 698: 163132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163132>.
13. Sharma A., Basant Lal B., Somvanshi A., Suman, Alsayari A., Wahab Sh., Lakshmaiyana N., Ravi K., Jasrotia R. Advanced functional spinel ferrite based nanomaterials for targeted wastewater treatment. *Journal of Molecular Structure*. 2025; 1351(2): 144284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.144284>.
14. Tomina E.V., Doroshenko A.V., Novikova L.A., Tyupina E.A., Kamzin A.S., Zhuzhukin K.V., Kopylov A.V. Synthesis, characterization, catalytic activity and adsorption properties of new nanosized cobalt-magnesium spinel ferrites for water treatment processes. *Molecular Catalysis*. 2025; 582: 115178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.115178>.
15. Xia L., Li X., Wei Z., Liu A., Chen J., Shang J. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 525: 170068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068>.
16. Elaadssi Y., Madigou V., Arab M. Cobalt ferrites $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x = 1$ and $x = 1.5$) as photocatalysts under simulated sunlight: An experimental study coupled to predictive RSM approach. *Surfaces and Interfaces*. 2025; 68: 106655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106655>.
17. Hamad H.A., Adel M., Emara M.M., Elsenety M., Mohamed I., Bedir A.G., Gargar Z., Abouelela M.M., Eldeeb N.A., Ibrahim I., Hassan A.A., Abboubi M.E., Amin K.M. Ferrites/carbon allotropes nanocomposites for photocatalytic applications: A review. *Coordination Chemistry Reviews*. 2025; 534: 216537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216537>.
18. Mao X., Liu Y., Long Sh. Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2025; 324: 101399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101399>.
19. Jiang Y., Gao L., Dai J., Xie D., Li C., Xiong H., Zhang J., Xu Q., Wang J., Tan Y. Enhanced thermal stability and moisture toleration for toluene catalytic decomposition over MnCoO_x supported hierarchical porous biochars with CeO_2 encapsulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025; 13 (2): 115493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115493>.
20. Lu X., Xinlan L., Zhuojun W., Ang L., Jianqiu C., Jingge S. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 525: 170068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068>.
21. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguyen L.H. Development of biochar supported NiFe_2O_4 composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove moxifloxacin from wastewater. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023; 16: 1005050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.1005050>.
22. Dong X., Chu Y., Tong Z., Sun M., Meng D., Yi X., Gao T., Wang M., Duan J. Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 272: 116019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>.
23. Ting Y., Zhao W., HaiTao L., Kai Z., JunTao L., HanMeng L., YanYun L., LiPing A., JuaLin W., Yujie S., Zheng Y., YueXing Z., Huijan W., XueLi C., YongLin C. MFe_2O_4 /biochar composites in persulfate-advanced oxidation process for antibiotic treatment: A mini review. *Journal of Water Process Engineering*. 2024; 68: 106535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106535>.
24. Mehta D., Pragnesh N.D., Kumar V.V. Toxic crystal violet removal by novel, eco-friendly seablite biochar-ferrite composite: adsorption isotherm, kinetics, and artificial neural network. *RSC Advances*. 2025; 15 (40): 33189-33208. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra04604a>.
25. Bai M., Chai Y., Anwei Chen A., Yuan J. Enhancing cadmium removal efficiency through spinel ferrites modified biochar derived from agricultural waste straw. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022; 11 (1): 109027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109027>.

26. Dong C.D., Chen C.W., Hung C.M. Persulfate activation with rice husk-based magnetic biochar for degrading PAEs in marine sediments. *Environ SciPollut Res.* 2019; 26: 33781–33790. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2423-2>.
27. Chandra S., Jagdale P., Medha I., Tiwari A.K., Bartoli M., De Nino A., Olivito F. Biochar-Supported TiO₂-Based Nanocomposites for the Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole in Water – A Review. *Toxics.* 2021; 9 (11): 313. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics9110313>.
28. Katika R.M., Boddu S. Advanced photocatalysis with biochar-TiO₂ composite for efficient oxidation of Congo red dye. *Environ Monit Assess.* 2025; 197: 831. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14290-1>.
29. Abdu M., Tibebe S., Babae S., Worku A., Msagati T. A.M., Nure J.F. Optimization of photocatalytic degradation of Eriochrome Black Y from aqueous solution using TiO₂-biochar composite. *Results of Engineering.* 2025; 25: 104036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104036>.
30. Du Y., Ye X., Hui Z., Jiao D., Xie Y., Chen S., Ding J. Synergistic effect of adsorption-photocatalytic reduction of Cr (VI) in wastewater with biochar/TiO₂ composite under simulated sunlight illumination. *Physical Chemistry Chemical Physics.* 2024; 26: 15891-15901. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4CP01226G>.
31. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the granulometric and morphological composition of coal powders. *Chemistry for Sustainable Development.* 2021; 29: 525–535. DOI:10.15372/CSD2021330.
32. Крысанова К.О., Крылова А.Ю., Пудова Я.Д., Борисов А.В. Исследование минеральных компонентов биоуглей из опила, полученных низкотемпературными методами. *Уголь.* 2021; 12(1149):41-43. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-12-41-43>. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47428321>.
33. Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А. В. Получение биоугля пиролизом биомассы. *Химия твердого топлива.* 2019; 6: 55-64. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0023117719060100> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41140404>.
34. Basak M., Rahman L., Ahmed F., Biswas B., Sharmin N. The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach. *Journal of Alloys and Compounds.* 2022; 895 (2). 162694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694>.
35. Islam A.M., Ishtiaque S.M., Mamun M. A., S. Hoque S.M. Effect of particle size and composition on local magnetic hyperthermia of chitosan-Mg_{1-x}Co_xFe₂O₄ nano hybrid. *Frontiers in Chemistry.* 2024; 12: 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1347423>.
36. Nha T.T.N., Toan D.N., Nam Ph. H., Manh D.H., Khan D.Th., Phong Ph.Th. Determine elastic parameters and nanocrystalline size of spinel ferrites MFe₂O₄ (M = Co, Fe, Mn, Zn) through X-ray diffraction and infrared spectrum: Comparative approach. *Journal of Alloys and Compounds.* 2024; 996: 174773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174773>.
37. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguen L.H. Development of biochar supported NiFe₂O₄ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove moxifloxacin from wastewater. *Chemical Engineering Journal Advances.* 2023; 16: 100550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100550>.
38. Sanaz A., Saeid S., Mahboobeh Z., Hossein S. Development of functionalized biochar composites for enhanced boron adsorption from aqueous solutions. *Heliyon.* 2025; 11 (2): e41720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41720>.
39. Zhang X., Zhao B., Liu H., Zhao Y., Li L. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation.* 2022; 26: 102288.1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>.
40. Usharani T., Baskar R., Palanisamy B., Myilsamy M. Efficient photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol over mesoporous Zr and Ce co-doped TiO₂ under visible light. *Desalination and Water Treatment.* 2021; 217: 320-328. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26901>.

References

1. Fito J., Van Hulle S.W.H. Wastewater reclamation and reuse potentials in agriculture: towards environmental sustainability. *Environment, Development and Sustainability*. 2021; 23: 2949–2972. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00732-y>.
2. Du Plessis A. Persistent degradation: global water quality challenges and required actions. *One Earth*. 2022; 5: 129–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.005>.
3. Rong W., Zhipeng T., Chenyang Z., Wei S., Zhuo C., Xin W., Mengqi L. Research progress on heavy metal wastewater treatment in the integrated circuit industry: From pollution control to resource utilization. *Separation and Purification Technology*. 2025; 376(2): 134033. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134033>.
4. Ruzgar A., Karatas Y., Yurderi M., Sener L., Gulcan M., Zahmakiran M. Synthesis, characterization, and determination of the catalytic roles of tungsten (VI) oxide-supported Pd (0) nanoparticles in the reduction of nitroaromatic pollutants. *Materials Chemistry and Physics*. 2025; 346: 131368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131368>.
5. Gautam N., Deka D., Das G. Efficient adsorption of nitroaromatic compounds from reusable hierarchical porous biochar emanates from the Ananascomosus crown and Citrus limetta fibers. *Chemical Engineering Science*. 2025; 308: 121408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2025.121408>.
6. Sangamithirai D., Gopi Krishna K.R., Pandurangan A. Investigating the synergistic effect of RuO₂ nanoparticle-decorated V₂O₅ nanoflakes for sensitive detection of 2,4-dinitrophenol and 2,4-dinitrotoluene. *Journal of Electroanalytical Chemistry*. 2024; 970: 118554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2024.118554>.
7. Meira A.C.R., Mezalira D.Z., Tondo D.W., Bail A., Arizaga G.G.C., Domingos J.B., Giona R.M. Efficient and versatile catalyst for nitrobenzene compounds reduction based on magnetite coated with semi-metallic bismuth. *Applied Surface Science*. 2025; 684: 161866. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161866>.
8. Fito J., Kefeni K.K., Nkambule T.I. The potential of biocah-photocatalytic nanocomposites for removal of organic micropollutions from wastewater. *Science of The Total Environment*. 2022; 829: 154648. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154648>.
9. Soifi A., Hajjaoui H., Elmoubarki R., Abdennouri M. Spinel ferrites nanoparticles: Synthesis methods and application in heterogeneous Fenton oxidation of organic pollutants. *Applied Surface Science Advances*. 2021; 6: 100145. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100145>.
10. Tomina E.V., Khodosova N.A., Sinel'nikov A.A., Zhabin A.V., Kurkin N.A., Novikova L.A. Vliyaniemetodaformirovaniyakompozitananorazmernyi CoFe₂O₄/nontronitna ego strukturuisvoistva. [The effect of the method of forming a nanosized CoFe₂O₄/nontronite composite on its structure and properties]. *Rossiyskiy zhurnal «Kondensirovannyesredyimezhfaznyegranitsy» = Russian Journal of Condensed Matter and Interphase Boundaries*. 2022; 24 (3): 379–386. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9861>.
11. Jarariya R., Suresh K. Spinel ferrite nanomaterials - MgFe₂O₄ - Synthesis by appropriate microwave solution combustion (Msc) method of visible light-responsive photocatalyst for Rb21 dye degradation. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 34: 104576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.393>.
12. Gerbaldo M.V., Peralta M.F., Marchetti S.G., Mendoza S.M., Elias V.R., Crivello M.E., Mendieta S.N. Innovative spinel ferrites for efficient photocatalytic mineralization of carbamazepine in wastewater. *Applied Surface Science*. 2025; 698: 163132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2025.163132>.
13. Sharma A., Basant Lal B., Somvanshi A., Suman, Alsayari A., Wahab Sh., Lakshmaiya N., Ravi K., Jasrotia R. Advanced functional spinel ferrite based nanomaterials for targeted wastewater treatment. *Journal of Molecular Structure*. 2025; 1351(2): 144284. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2025.144284>.
14. Tomina E.V., Doroshenko A.V., Novikova L.A., Tyupina E.A., Kamzin A.S., Zhuzhukin K.V., Kopylov A.V. Synthesis, characterization, catalytic activity and adsorption properties of new nanosized cobalt-magnesium spinel ferrites for water treatment processes. *Molecular Catalysis*. 2025; 582: 115178. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcat.2025.115178>.
15. Xia L., Li X., Wei Z., Liu A., Chen J., Shang J. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 525: 170068.

- DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068>.
16. Elaadssi Y., Madigou V., Arab M. Cobalt ferrites $\text{Co}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$ ($x = 1$ and $x = 1.5$) as photocatalysts under simulated sunlight: An experimental study coupled to predictive RSM approach. *Surfaces and Interfaces*. 2025; 68: 106655. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106655>.
 17. Hamad H.A., Adel M., Emara M.M., Elsenety M., Mohamed I., Bedir A.G., Gargar Z., Abouelela M.M., Eldeeb N.A., Ibrahim I., Hassan A.A., Abboubi M.E., Amin K.M. Ferrites/carbon allotropes nanocomposites for photocatalytic applications: A review. *Coordination Chemistry Reviews*. 2025; 534: 216537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.216537>.
 18. Mao X., Liu Y., Long Sh. Research progress on adsorption mechanisms and regeneration applications of modified biochar for heavy metals in wastewater. *Desalination and Water Treatment*. 2025; 324: 101399. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101399>.
 19. Jiang Y., Gao L., Dai J., Xie D., Li C., Xiong H., Zhang J., Xu Q., Wang J., Tan Y. Enhanced thermal stability and moisture toleration for toluene catalytic decomposition over MnCoO_x supported hierarchical porous biochars with CeO_2 encapsulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025; 13 (2): 115493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115493>.
 20. Lu X., Xinlan L., Zhuojun W., Ang L., Jianqiu C., Jingge S. Biochar-mediated electron transfer in a spinel ferrite catalyst boosts peracetic acid activation for water decontamination. *Chemical Engineering Journal*. 2025; 525: 170068. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.170068>.
 21. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguyen L.H. Development of biochar supported NiFe_2O_4 composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove oxifloxacin from wastewater. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023; 16: 1005050. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.100550>.
 22. Dong X., Chu Y., Tong Z., Sun M., Meng D., Yi X., Gao T., Wang M., Duan J. Mechanisms of adsorption and functionalization of biochar for pesticides: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2024; 272: 116019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116019>.
 23. Ting Y., Zhao W., HaiTao L., Kai Z., JunTao L., HanMeng L., YanYun L., LiPing A., JuaLin W., Yujie S., Zheng Y., YueXing Z., Huijian W., XueLi C., YongLin C. MFe_2O_4 /biochar composites in persulfate-advanced oxidation process for antibiotic treatment: A mini review. *Journal of Water Process Engineering*. 2024; 68: 106535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106535>.
 24. Mehta D., Pragnesh N.D., Kumar V.V. Toxic crystal violet removal by novel, eco-friendly seablite biochar-ferrite composite: adsorption isotherm, kinetics, and artificial neural network. *RSC Advances*. 2025; 15 (40): 33189-33208. DOI: <https://doi.org/10.1039/d5ra04604a>.
 25. Bai M., Chai Y., Anwei Chen A., Yuan J. Enhancing cadmium removal efficiency through spinel ferrites modified biochar derived from agricultural waste straw. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2022; 11 (1): 109027. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109027>.
 26. Dong C.D., Chen C.W., Hung C.M. Persulfate activation with rice husk-based magnetic biochar for degrading PAEs in marine sediments. *Environ Sci Pollut Res*. 2019; 26: 33781–33790. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2423-2>.
 27. Chandra S., Jagdale P., Medha I., Tiwari A.K., Bartoli M., De Nino A., Olivito F. Biochar-Supported TiO_2 -Based Nanocomposites for the Photocatalytic Degradation of Sulfamethoxazole in Water – A Review. *Toxics*. 2021; 9 (11): 313. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics9110313>.
 28. Katika R.M., Boddus. Advanced photocatalysis with biochar- TiO_2 composite for efficient oxidation of Congo red dye. *Environ Monit Assess*. 2025; 197: 831. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14290-1>.
 29. Abdu M., Tibebu S., Babae S., Worku A., Msagati T. A.M., Nure J.F. Optimization of photocatalytic degradation of Eriochrome Black Y from aqueous solution using TiO_2 -biochar composite. *Results of Engineering*. 2025; 25: 104036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104036>.
 30. Du Y., Ye X., Hui Z., Jiao D., Xie Y., Chen S., Ding J. Synergistic effect of adsorption-photocatalytic reduction of Cr (VI) in wastewater with biochar/ TiO_2 composite under simulated sunlight illumination. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2024; 26: 15891-15901. DOI: <https://doi.org/10.1039/D4CP01226G>.
 31. Zhuravleva E.V., Zhuravleva N.V., Mikhailova E.S., Sozinov S.A., Ismagilov Z.R. Study of the granulometric and morphological composition of coal powders. *Chemistry for Sustainable Development*. 2021; 29: 525–535. DOI: [10.15372/CSD2021330](https://doi.org/10.15372/CSD2021330).

32. Krysanova K.O., Krylova A.Yu., Pudova Ya.D., Borisov A.V. Issledovanie mineral'nykh komponentov biougley iz opila, poluchennykh iz kotemperaturnymi metodami. [Research on the mineral components of bio-coal from sawdust obtained by low-temperature methods]. Rossiyskiy zhurnal «Ugol» = Russian Journal «Coal». 2021; 12 (1149): 41-43. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2021-12-41-43> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47428321>.
33. Krylova A.Yu., Gorlov E.G., Shumovskii A. V. Poluchenie biouglya pirolizom biomassy. [Production of biochar by biomass pyrolysis]. Rossiyskiy zhurnal «Khimiya tverdogo topliva» = Russian Journal «Solid fuel chemistry». 2019; 6: 55-64. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0023117719060100> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=41140404>.
34. Basak M., Rahman L., Ahmed F., Biswas B., Sharmin N. The use of X-ray diffraction peak profile analysis to determine the structural parameters of cobalt ferrite nanoparticles using Debye-Scherrer, Williamson-Hall, Halder-Wagner and Size-strain plot: Different precipitating agent approach. Journal of Alloys and Compounds. 2022; 895 (2). 162694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162694>.
35. Islam A.M., Ishtiaque S.M., Mamun M. A., S. Hoque S.M. Effect of particle size and composition on local magnetic hyperthermia of chitosan-Mg_{1-x}Co_xFe₂O₄ nanohybrid. Frontiers in Chemistry. 2024; 12: 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1347423>.
36. Nha T.T.N., Toan D.N., Nam Ph. H., Manh D.H., Khan D.Th., Phong Ph.Th. Determine elastic parameters and nanocrystalline size of spinel ferrites MFe₂O₄ (M = Co, Fe, Mn, Zn) through X-ray diffraction and infrared spectrum: Comparative approach. Journal of Alloys and Compounds. 2024; 996: 174773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.174773>.
37. Nguyen T.H., Nguyen X.H., Do T.G., Nguen L.H. Development of biochar supported NiFe₂O₄ composite for peroxydisulfate (PDS) activation to effectively remove moxifloxacin from wastewater. Chemical Engineering Journal Advances. 2023; 16: 100550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100550>.
38. Sanaz A., Saeid S., Mahboobeh Z., Hossein S. Development of functionalized biochar composites for enhanced boron adsorption from aqueous solutions. Heliyon. 2025; 11 (2): e41720. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41720>.
39. Zhang X., Zhao B., Liu H., Zhao Y., Li L. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. Environmental Technology & Innovation. 2022; 26: 102288.1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>
40. Usharani T., Baskar R., Palanisamy B., Myilsamy M. Efficient photocatalytic degradation of 2,4-dinitrophenol over mesoporous Zr and Ce co-doped TiO₂ under visible light. Desalination and Water Treatment. 2021; 217: 320-328. DOI: <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26901>.

Сведения об авторах

✉ *Дорошенко Алёна Владимировна* – преподаватель кафедры химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>, e-mail: al.doroschencko2016@yandex.ru

Бережная Мария Викторовна – кандидат химических наук, преподаватель кафедры химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8645>, e-mail: snurova2010@yandex.ru

Томина Елена Викторовна – доктор химических наук, зав. кафедрой химии и биотехнологии, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова», ул. Тимирязева, 8, г. Воронеж, Российская Федерация, 394087, доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», Университетская пл., 1, г. Воронеж, Российская Федерация, 394018 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

Information about the authors

Alyona V. Doroshenko - a lecturer at the Department of Chemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7487-5078>, e-mail: al.doroschencko2016@yandex.ru

Maria V. Berezhnaya– Candidate of Chemical Sciences, Lecturer at the Department of Chemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3511-8645>, e-mail: cnurova2010@yandex.ru

Elena V. Tomina– Doctor of Chemical Sciences, Head of the Department of Chemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Timiryazeva str., 8, Voronezh, Russian Federation, 394087, Associate Professor of the Department of Materials Science and Industry of Nanosystems, Voronezh State University, Universitetskaya pl., 1, Voronezh, Russian Federation, 394018 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

✉ Для контактов | Corresponding author