

УДК 661.8

ИЗУЧЕНИЕ УСЛОВИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ФЕРРИТА КОБАЛЬТА(II) НА ПОВЕРХНОСТИ БИОЧАРА

© 2024 г. Н. П. Шабельская^{1,2, *}, А. М. Раджабов¹, М. А. Егорова¹,
А. В. Арзуманова¹, В. А. Ульянова¹

¹Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова, Россия, 346428
Новочеркасск, ул. Просвещения, 132

²Южный федеральный университет, Россия, 344006 Ростов-на-Дону, ул. Б. Садовая, 105/42

*e-mail: nina_shabelskaya@mail.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.

После доработки 09.01.2024 г.

Принята к публикации 11.01.2024 г.

В работе проведено комплексное изучение влияния количества введенных прекурсоров — аммиака, лимонной кислоты, а также природы биочара-носителя на формирование композиционных материалов на основе феррита кобальта (II) по золь—гель-методу. Полученные материалы охарактеризованы при помощи рентгенофазового анализа, электронной микроскопии, оценены размеры кристаллитов по методу Шеррера. Определены оптимальные количества прекурсоров. Показано, что морфология композиционного материала определяется формой биочара-носителя. Проведенное исследование позволяет разработать способ получения органо-неорганических композиционных материалов со структурно-чувствительными свойствами

Ключевые слова: синтез феррита кобальта, органо-неорганический композит, лимонная кислота, аммиак, биочар

DOI: 10.31857/S0002337X24020131, **EDN:** LHOVPM

ВВЕДЕНИЕ

В условиях развития современного производства необходим поиск экологически чистых и экономичных технических материалов. Среди ряда катализаторов ферриты со структурой шпинели (MFe_2O_4 , $M - Cu, Co, Mn, Ni, Zn$) получили широкое распространение благодаря удачному сочетанию технических характеристик, низкой стоимости, стабильности, реакционной активности и пригодности для вторичной переработки [1–5]. Тем не менее, в процессе синтеза наночастицы MFe_2O_4 подвержены агломерации, что значительно уменьшает количество доступных активных центров и снижает их эффективность в качестве каталитически и адсорбционно активных материалов [6, 7].

Иммобилизация катализатора на носителе является одним из важных способов избежать агломерации частиц и стабилизи-

ровать наноразмерное состояние. Синтез композиционных материалов [8–12] позволяет приблизиться к решению этой проблемы. В этом отношении биоуголь выступает как отличный вспомогательный материал для получения катализаторов [13–16] благодаря ряду преимуществ: доступности сырья, большой удельной поверхности, богатым функциональными группам поверхности, пористой структуре, низкой стоимости. Подобные сложные системы на основе биоугля и оксидного неорганического компонента применяют для разложения органических загрязнителей [3, 17–19], производства солнечных батарей [20], покрытий экранов от электромагнитного излучения [21], удаления соединений кадмия [22], изготовления сенсоров на антибиотики [23], антимикробных покрытий [24]. Комбинация MFe_2O_4 и биоугля позволяет преодолеть их индивидуальные недостатки, сводит к минимуму количество

Таблица 1. Условия проведения реакций и состав образцов

Образец	Количество введенного прекурсора, моли		Фазовый состав образцов (мол.%)	Выход композита, %	Размер кристаллитов <i>D</i> , нм
	аммиак	лимонная кислота			
1	3	10	CoFe ₂ O ₄ (59) Fe ₃ O ₄ (41)	30.1	11
2	5	10	CoFe ₂ O ₄ (45) Fe ₃ O ₄ (32) Co ₃ O ₄ (23)	43.0	13
3	8	10	CoFe ₂ O ₄	46.6	10
4	10	10	CoFe ₂ O ₄	39	8
5	8	3	CoFe ₂ O ₄	27.6	8
6	8	5	CoFe ₂ O ₄	29.3	11
7	8	8	CoFe ₂ O ₄	41.4	16
8	8	10	CoFe ₂ O ₄	46.6	10
9	8	13	CoFe ₂ O ₄	46.7	-
10	8	16	CoFe ₂ O ₄	46.6	-

агрегированных магнитных частиц и увеличивает каталитическую активность [1, 25].

Среди ферритов-шпинелей CoFe₂O₄ привлекает большое внимание благодаря своей высокой коэрцитивной силе при комнатной температуре, электромагнитным характеристикам [19, 26], умеренной намагниченности, химической стабильности.

Синтез наноразмерных оксидных материалов проводят сольвотермальным [27] и сонохимическим [28] методами, соосаждением [23]. Однако наиболее широко используют золь–гель-технологии [29–33], поскольку она позволяет проводить контролируемый синтез композиционных материалов. Несмотря на большой объем проводимых исследований, не выяснены механизм формирования оксидного компонента на поверхности носителя, технологические параметры процесса.

Цель работы — изучение технологических особенностей синтеза композиционного органо-неорганического материала на основе феррита кобальта(II) с применением золь–гель-реакции. Результаты работы позволят проводить осознанный выбор технологических параметров процесса.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных материалов использовали раствор нитрата кобальта(II) с кон-

центрацией 183 г/л, нитрата железа(III) с концентрацией 242 г/л, 3 мл 25%-ного раствора аммиака, раствор лимонной кислоты. Использованы реагенты — Co(NO₃)₂·6H₂O, Fe(NO₃)₃·9H₂O, NH₃·H₂O, C₆H₈O₇·H₂O — аналитической чистоты.

В качестве органической части композита использовали биочар из скорлупы кокоса. Выбор данного биочара обусловлен его доступностью. Получение композиционных материалов проводили по методике, разработанной авторами [34].

Для изучения влияния количества введенного прекурсора на процесс формирования структуры шпинели был проведен ряд экспериментов с варьированием количеств аммиака и лимонной кислоты. Количество растворов солей переходных элементов, биочара было фиксированным. В табл. 1 приведены условия проведения реакций и обозначения образцов.

С целью изучения влияния морфологических особенностей органического носителя на выход композита проведен ряд экспериментов. В качестве органической части композита использовали биочары из скорлупы кокоса (кокос), лузги подсолнечника (подсолнух), рисовой шелухи (рис. 1), заморозки горошка (горошек). Для синтеза в реакционный сосуд помещали 5 г биочара. Далее при непрерывном перемешива-

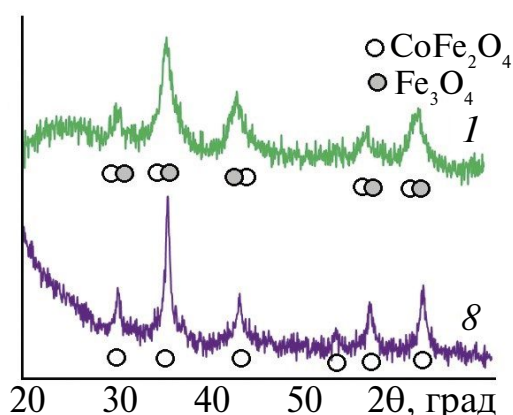


Рис. 1. Рентгенограммы образцов CoFe_2O_4 /биочар кокос, полученных при варьировании количества прекурсора: 1 – с недостатком аммиака, 8 – с оптимальным количеством прекурсоров (см. табл.1).

нии одновременно добавляли растворы с концентрацией 1 моль/л: 5 мл $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ и 10 мл $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Затем вводили 5 мл аммиака в виде 25 %-ного раствора и 8 мл раствора лимонной кислоты с концентрацией 6.25 моль/л. Далее выполняли операции, аналогичные описанным выше.

Фазовый состав изучали на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (использовали монохроматизированное CuK_α -излучение) методом сканирования по точкам (шаг 0.01° , время накопления в точке 2 с) в интервале значений 2θ от 20° до 70° . Расчет размера кристаллитов проводили по линии 311 по уравнению Шеррера

$$D = 0.94\lambda / (B \cos \theta),$$

где D – средний размер кристаллитов (нм), λ – длина волны рентгеновского излучения (нм), B – ширина линии пика на половине его высоты (рад).

Для определения выхода шпинели после синтеза образцы охлаждали, взвешивали, проводили разделение на магнитную и немагнитную фракции. Выход композита рассчитывали по формуле

$$B = (m_m / m_{\text{общ}}) \times 100\%,$$

где B – выход композита (%), m_m – масса образца, притягиваемая магнитом (г), $m_{\text{общ}}$ – общая масса образца (г).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез образцов на первой стадии сопровождался образованием аморфного осадка в процессе смешивания растворов солей с раствором аммиака, затем следовало растворение осадка после введения органического прекурсора. При термообработке формировался твердый гелеобразный материал, при разложении которого получался готовый продукт. Фазовый состав синтезированных материалов приведен в табл. 1.

На рис. 1 в качестве примера приведены рентгенограммы образцов 1 и 8. На рентгенограммах зафиксирована фаза кубического феррита кобальта(II) (PDF Number 000-03-0864). Образец 1 неоднороден: установлено присутствие Fe_3O_4 (PDF Number 010-71-6337). Биочары рентгеноаморфны.

В результате проведенного исследования установлено, что увеличение количества введенного аммиака с 3 до 8 молей на 1 моль образующейся шпинели приводит к увеличению выхода композиционного материала, затем выход продукта снижается (образец 4). Минимальным размером кристаллитов (8 нм) обладает образец, полученный при введении 10 молей аммиака на 1 моль шпинели. Максимальное значение размера кристаллитов (13 нм) установлено для образца 2, полученного при введении 5 молей аммиака (67% от оптимального). Образец 2 обладает также наибольшим количеством примесных фаз (табл. 1). Можно предположить, что недостаточное количество аммиака приводит к неполному осаждению гидроксидов металлов, что затрудняет формирование структуры феррита кобальта(II) на поверхности биочара. Избыточное количество аммиака может приводить к формированию устойчивых аммиакатных комплексов, что также снижает количество шпинели на поверхности органического носителя.

Варьирование количества введенной лимонной кислоты не изменяет фазового состава образцов: во всех случаях получены композиты, содержащие в виде неорганической составляющей фазу кубической шпинели (феррит кобальта(II)). Выход композита увеличивался с увеличением количества введенной лимонной кислоты до

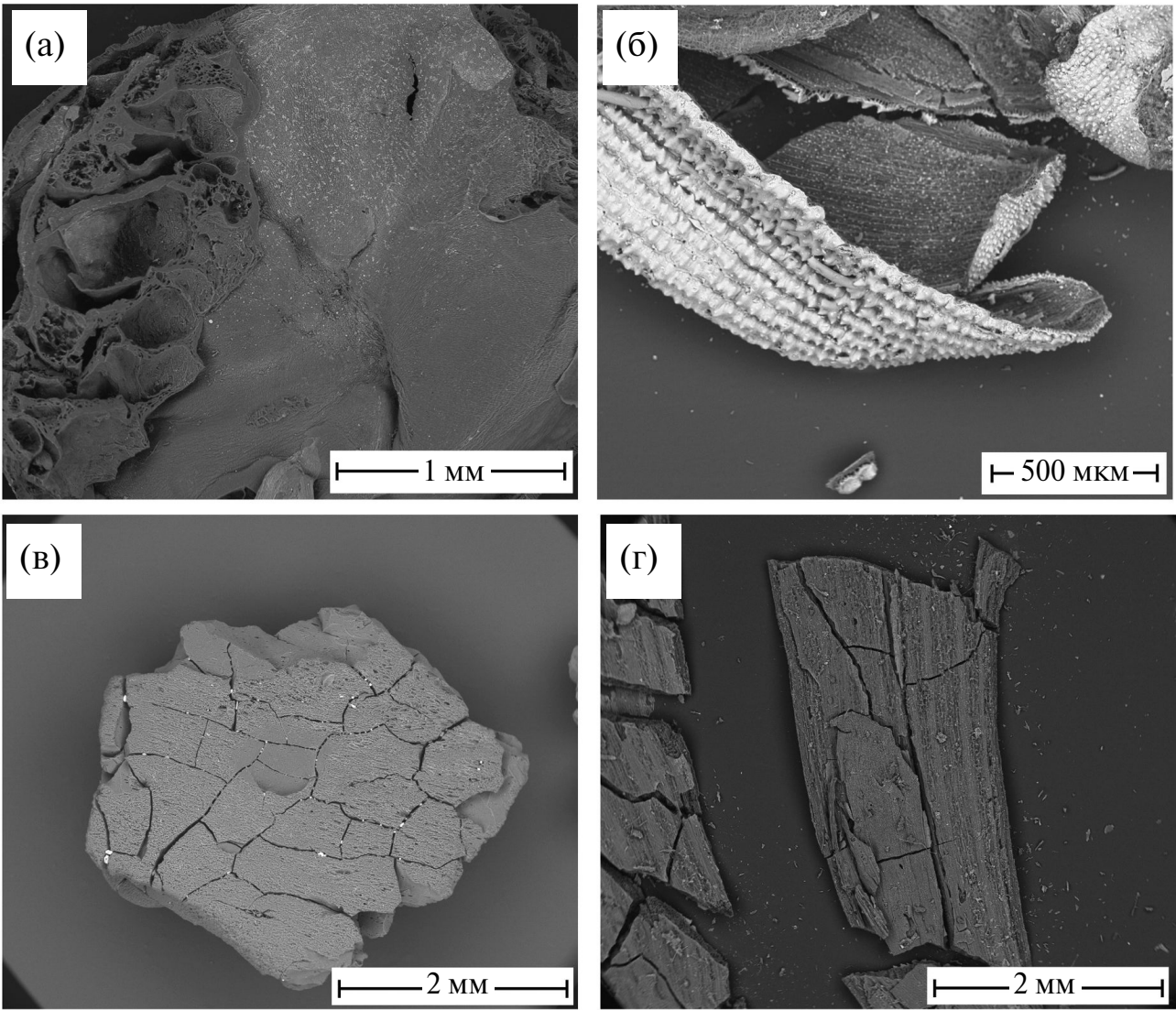


Рис. 2. Микрофотографии изученных биочаров, полученных из горошка (а), шелухи риса (б), скорлупы кокоса (в), лузги подсолнечника (г).

10 молей на 1 моль шпинели, а далее оставался практически неизменным (табл. 1).

При изменении количества введенных прекурсоров размер кристаллитов образующегося феррита кобальта(II) сначала увеличивается, потом начинает уменьшаться

(табл. 1). Можно предположить, что увеличение количества лимонной кислоты способствует формированию более совершенной структуры кристаллов шпинели; при достижении 10 молей введенной лимонной кислоты на 1 моль образующейся шпинели

Таблица 2. Характеристика биочаров и выход композиционных материалов CoFe_2O_4 /биочар

Носитель	Форма	Насыпная плотность, г/мл	Выход композита, %
Кокос	Округлая	0.53	38.5
Рис	Продолговатая	0.14	95.8
Подсолнух	Продолговатая	0.10	83.9
Горох	Округлая	0.32	59.3

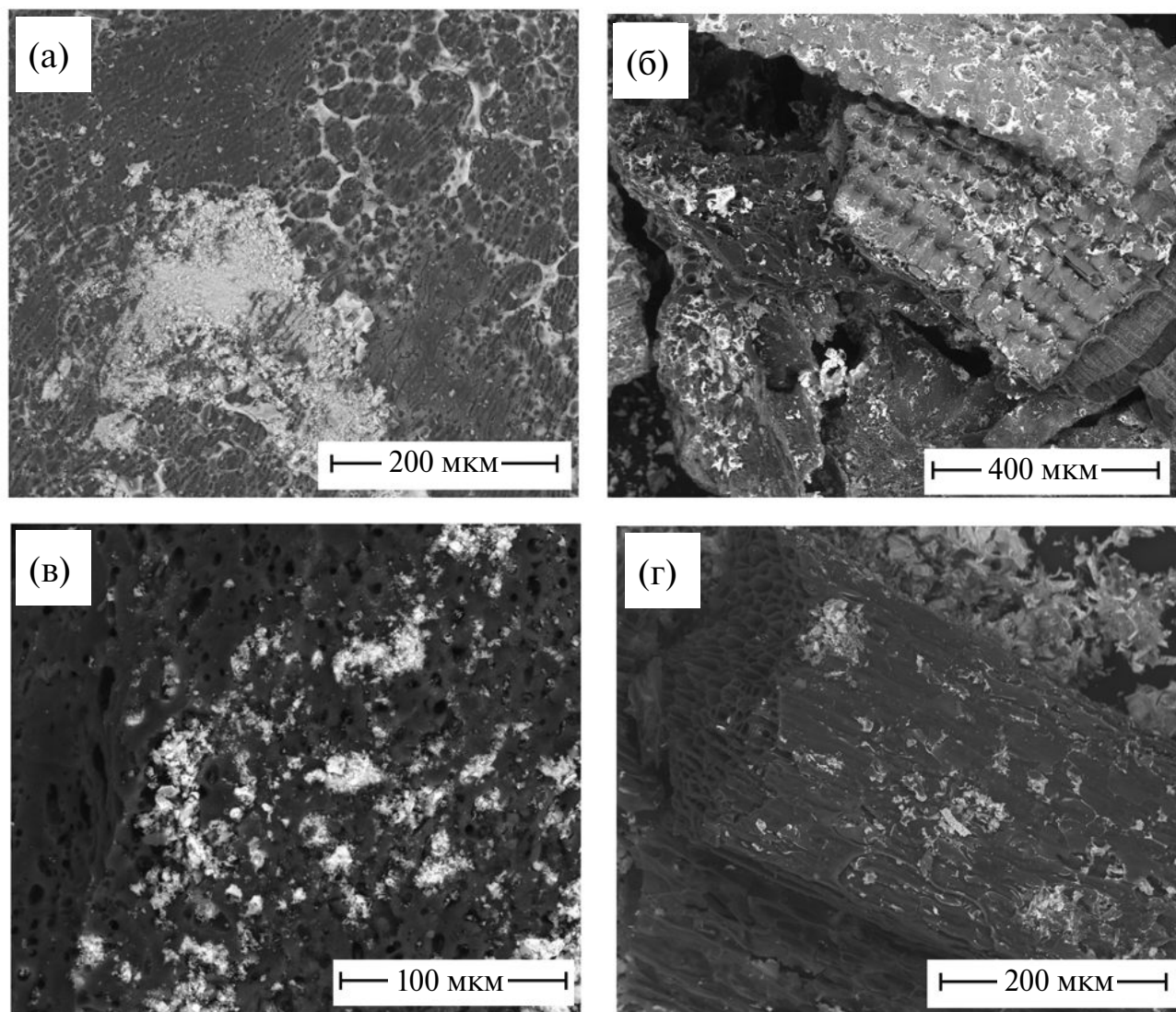


Рис. 3. Микрофотографии полученных композитов CoFe_2O_4 /биочар, а–г – см.подпись к рис.2.

ли органическая кислота выступает дополнительным диспергирующим компонентом, препятствующим агломерации частиц шпинели.

На рис. 2 приведены микрофотографии образцов органических материалов. Следует отметить, что биочары, полученные из лузги подсолнечника и шелухи риса, имеют продолговатую форму, биочары из кокосовой скорлупы и заморозки горошка – округлую. Согласно полученным результатам (рис. 3, табл. 2), количество образовавшегося композиционного материала зависит от формы частиц биочара: выход композиционного материала на 29–66%

выше для композитов с продолговатой формой зерен. Такой результат может быть связан с доступностью поверхности биочаров в виде пластин для адсорбции прекурсоров и формирования в дальнейшем фазы шпинели.

На рис. 3 приведены изображения композиционных материалов CoFe_2O_4 с биочарами из кокоса, горошка, подсолнечника и риса. Можно видеть, что на поверхности биочаров из подсолнечника и риса образуется пленка феррита переходного элемента. На поверхности биочаров из кокоса и горошка оксидный материал формируется в виде кластеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучено влияние количества введенных прекурсоров — аммиака, лимонной кислоты, а также природы биочара-носителя на процесс формирования композиционных материалов на основе феррита кобальта(II) по золь—гель-методу. Оптимальные количества прекурсоров составляют: 8 молей аммиака, 10 молей лимонной кислоты на 1 моль образующейся шпинели. Установлено, что недостаточное количество введенного аммиака приводит к формированию неоднородных образцов оксидного материала. Избыточное количество аммиака приводит к снижению выхода композита. Увеличение количества введенной лимонной кислоты сопровождается увеличением выхода композита, а затем количество композита не изменяется.

Показано, что морфология композиционного материала определяется формой биочара-носителя. В случае использования биочаров продолговатой формы — из риса, подсолнуха — оксидный материал образуется на поверхности биочара в виде пленки; для биочаров округлой формы выход композитов ниже, ферриты образуют на их поверхности отдельные кластеры.

Проведенное исследование позволяет разработать способ получения органо-неорганических композиционных материалов со структурно-чувствительными свойствами.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят сотрудника центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова А.Н. Яценко за помощь в съемке и расшифровке данных РФА и выполнение микроскопических исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке проекта Министерства науки и высшего образования РФ по поддержке молодежной лаборатории в рамках межрегионального НОЦ Юга России (FENW-2024-0001).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang L., Lu X., Chen G., Zhao Y., Wang S. Synergy between MgFe_2O_4 and Biochar Derived from Banana Pseudo-Stem Promotes Persulfate Activation for Efficient Tetracycline Degradation // Chem. Eng. J. 2023. V. 468. P. 143773. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143773>
2. Li C., Yang S., Bian R., Tan Y., Dong X., Zhu N., He X., Zheng S., Sun Z. Clinoptilolite Mediated Activation of Peroxymonosulfate through Spherical Dispersion and Oriented Array of NiFe_2O_4 : Upgrading Synergy and Performance // J. Hazard. Mater. 2021. V. 407. P. 124736. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124736>
3. Suresh R., Rajendran S., Kumar P.S., Vo D.-V. N., Cornejo-Ponce L. Recent Advancements of Spinel Ferrite Based Binary Nanocomposite Photocatalysts in Wastewater Treatment // Chemosphere. 2021. V. 274. P. 129734. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129734>
4. Dastjerdi O.D., Shokrollahi H., Mirshekari S. A Review of Synthesis, Characterization, and Magnetic Properties of Soft Spinel Ferrites // Inorg. Chem. Commun. 2023. V. 153. P. 110797. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110797>
5. Salih S.J., Mahmood W.M. Review on Magnetic Spinel Ferrite (MFe_2O_4) Nanoparticles: From Synthesis to Application // Heliyon. 2023. V. 9. № 6. P. e16601. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16601>
6. Huang Q., Chen C., Zhao X., Bu X., Liao X., Fan H., Gao W., Hu H., Zhang Y., Huang Z. Malachite Green Degradation by Persulfate Activation with CuFe_2O_4 @ Biochar Composite: Efficiency, Stability and Mechanism // J. Environ. Chem. Eng. 2021. V. 9. P. 105800. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105800>
7. Wang Q., Xiao P. Self-Synthesized Heterogeneous CuFe_2O_4 - MoS_2 @BC Composite as an Activator of Peroxymonosulfate for the Oxidative Degradation of Tetracycline // Sep. Purif. Technol. 2023. V. 305. P. 122550. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122550>
8. Подзорова Л.И., Ильичёва А.А., Пенькова О.И., Сиротинкин В.П., Антонова О.С., Каплан М.А.,

- Фролова М.Г. Композиты корунд/тетрагональный диоксид циркония, модифицированные катионами стронция // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 6. С. 696–704. <https://doi.org/10.31857/S0002337X2306012X>
9. Беликов М.Л., Сафарян С.А., Корнейкова П.А. Синтез оксидных композитов титана и марганца, исследование их физико-химических и фотокаталитических свойств // Неорган. материалы. 2023. Т. 59. № 2. С. 150–161. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23020021>
10. Bajwa R.A., Farooq U., Ullah S. Cobalt Oxide Based Inorganic-Organic Hybrid Composite as Novel Anodic Material for Ultra-Stable Li-Ion Battery // Mater. Chem. Phys. 2023. V. 297. P. 127452. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127452>
11. Нескоромная Е.А., Бабкин А.В., Захарченко Е.А., Морозов Ю.Г., Кабачков Е.Н., Шульга Ю.М. Композитные аэрогели на основе восстановленного оксида графена, декорированного наночастицами оксидов железа: синтез, физико-химические и сорбционные свойства // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 7. С. 41–49. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23070130>
12. Несмелов А.А., Завьялов С.А., Малахов С.Н., Бакиров А.В., Кондратьев О.А., Стрельцов Д.Р., Велигжанин А.А., Храмов Е.В., Трофимов А.Д., Миннеханов А.А., Емельянов А.В., Демин В.А., Чвалун С.Н. Синтез и свойства композитов на основе поли-пара-ксилилена и оксида молибдена // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 7. С. 50–58. <https://doi.org/10.31857/S0207401X23070142>
13. Иванцов М.И., Крысанова К.О., Грабчак А.А., Куликова М.В. Влияние фазового состава катализатора Fe/биоуголь на состав продуктов синтеза Фишера–Тропша: теория бифункциональных каталитических центров А.Л. Лапидуса // Химия. твердого топлива. 2023. № 6. С. 5–10. <https://doi.org/10.31857/S0023117723060026>
14. Ермагамбет Б.Т., Казанкапова М.К., Касенов Б.К., Касенова Ж.М., Наурызбаева А.Т., Куанышбеков Е.Е. Физико-химические и электрофизические свойства композитного материала на основе полученного из каменноугольной смолы углеродного нановолокна и наножелеза // Химия твердого топлива. 2022. № 3. С. 19–29. <https://doi.org/10.31857/S0023117722030021>
15. Qin F., Peng Y., Song G., Fang Q., Wang R., Zhang C., Zeng G., Huang D., Lai C., Zhou Y., Tan X., Cheng M., Liu S. Degradation of Sulfamethazine by Biochar Supported Bimetallic Oxide/Persulfate System in Natural Water: Performance and Reaction Mechanism // J. Hazard. Mater. 2020. V. 398. P. 122816. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122816>
16. Xu S., Wen L., Yu C., Li S., Tang J. Activation of Peroxymonosulfate by MnFe_2O_4 @BC Composite for Bisphenol A Degradation: The Coexisting of Free-Radical and Nonradical Pathways // Chem. Eng. J. 2022. V. 442. P. 136250. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136250>
17. Yang Z., Li Y., Zhang X., Cui X., He S., Liang H., Ding A. Sludge Activated Carbonbased CoFe_2O_4 -SAC Nanocomposites Used as Heterogeneous Catalysts for Degrading Antibiotic Norfloxacin Through Activating Peroxymonosulfate // Chem. Eng. J. 2020. V. 384. P. 23319. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123319>
18. Zhang C., Wang Z., Li F., Wang J., Xu N., Jia Y., Gao S., Tian T., Shen W. Degradation of Tetracycline by Activated Peroxodisulfate Using CuFe_2O_4 -Loaded Biochar // J. Mol. Liq. 2022. V. 368. P. 120622. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120622>
19. Hemasankari S., Priyadharshini S., Thangaraju D., Sathiyarayanamoorthi V., Sdran N.A., Shkir M. Effect of Neodymium (Nd) Doping on the Photocatalytic Organic Dye Degradation Performance of Sol-Gel Synthesized CoFe_2O_4 Self-Assembled Microstructures // Phys. B: Condens. Matter. 2023. V. 660. P. 414870. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.414870>
20. Abboubi M.E., San S.E. Integration of Spinel Ferrite Magnetic Nanoparticles into Organic Solar Cells: A Review // Mater. Sci. Eng., B. 2023. V. 294. P. 116512. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2023.116512>
21. Kumar D., Moharana A., Kumar A. Current Trends in Spinel Based Modified Polymer Composite Materials for Electromagnetic Shielding // Mater. Today Chem. 2020. V. 17. P. 100346. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2020.100346>
22. Bai M., Chai Y., Chen A., Yuan J., Shang C., Peng L., Peng C. Enhancing Cadmium Removal

- Efficiency through Spinel Ferrites Modified Biochar Derived from Agricultural Waste Straw // *J. Environ. Chem. Eng.* 2023. V. 11. № 1. P. 109027. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109027>
23. *Hoang V.-T., Trang N.L.N., Nga D.T.N., Ngo X.-D., Pham T.N., Tran V.T., Mai M., Tam L.T., Tri D.Q., Le A.-T.* Facile Synthesis and Characterisations of Cobalt Ferrite-Silver-Graphene Oxide Nanocomposite in Enhancing Electrochemical Response Capacity // *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* 2022. V. 13. № 3. P. 035002. <https://doi.org/10.1088/2043-6262/13/3/035002>
 24. *Reddy R.A., Rao A.V., Babu B.R., Rao K.R., Raghavendra V.* Structural, Magnetic and Antibacterial Studies of Gadolinium Doped Cobalt Ferrite Nanoparticles Synthesized at Low Temperature // *Adv. Nat. Sci: Nanosci. Nanotechnol.* 2023. V. 14. № 1. P. 015005 <https://doi.org/10.1088/2043-6262/acc01c>
 25. *Jiang T., Wang B., Gao B., Cheng N., Feng Q., Chen M., Wang S.* Degradation of Organic Pollutants from Water by Biochar-Assisted Advanced Oxidation Processes: Mechanisms and Applications // *J. Hazard. Mater.* 2023. V. 442. P. 130075. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.130075>
 26. *Lone G.A., Ikram M.* Role of Ni Doping in Magnetic Dilution of Fe Sublattice and in Tailoring Optical Properties of CoFe_2O_4 // *J. Alloy. Compd.* 2023. V. 934. P. 167891. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167891>
 27. *Guo Z., Chen R., Yang R., Yang F., Chen J., Li Y., Zhou R., Xu J.* Synthesis of Amino-Functionalized Biochar/Spinel Ferrite Magnetic Composites for Low-Cost and Efficient Elimination of Ni(II) from Wastewater // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 722. P. 137822. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137822>
 28. *Balasubramani V., Mowlika V., Sivakumar A., Sdran N.A., Maiz F., Shkir M.* Design and Investigation of Sono-Chemical Synthesis of Pure and Sn Doped CoFe_2O_4 Nanoparticles and Their Structural and Magnetic Properties // *Inorg. Chem. Commun.* 2023. V. 155. P. 111015. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111015>
 29. *Хомидов Ф.Г., Кадырова З.Р., Усманов Х.Л., Ниязова Ш.М.* Золь—гель-синтез и исследование влияния добавок Y_2O_3 и Eu_2O_3 на формирование алюмомагнезиальной шпинели // *Неорган. материалы.* 2023. Т. 59. № 6. С. 654–661. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23060167>
 30. *Почтарь А.А., Комова О.В., Нецкина О.В.* Определение фазового состава образцов феррита меди безэталонным методом дифференцирующего растворения // *Неорган. материалы.* 2023. Т. 59. № 1. С. 46–53. <https://doi.org/10.31857/S0002337X23010153>
 31. *Карманов А.А., Пронин И.А., Якушова Н.Д., Комолов А.С., Мошников В.А.* Исследование поверхностных превращений в золь—гель-пленках на основе оксида цинка при ультрафиолетовом фотоотжиге методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии // *Неорган. материалы.* 2022. Т. 58. № 11. С. 1184–1191. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22110070>
 32. *Трусевич Н.Г., Вишинёв А.А., Пигальский К.С., Мамсурова Л.Г., Трахтенберг Л.И.* Эволюция структуры и магнитных свойств ВТСП $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.92}$ в процессе золь—гель-синтеза // *Неорган. материалы.* 2022. Т. 58. № 9. С. 990–997. <https://doi.org/10.31857/S0002337X22090135>
 33. *Mehmood K., Rehman A. U., Amin N., Morley N.A., Arshad M.I.* Graphene Nanoplatelets/Ni-Co-Nd Spinel Ferrite Composites with Improving Dielectric Properties // *J. Alloys Compd.* 2023. V. 930. P. 167335. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167335>
 34. *Шабельская Н.П., Егорова М.А., Арзуманова А.В., Яковенко Е.А., Забабурин В.М., Вальцев А.В.* Получение композиционных материалов на основе феррита кобальта (II) для очистки водных растворов // *Изв. вузов. Сер.: Химия и хим. техноогия.* 2021. Т. 64. № 2. С. 95–102. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216402.6215>