



Оригинальные статьи

Научная статья

УДК 544.032.7 - 34.25

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9861>

Влияние метода формирования композита наноразмерный CoFe_2O_4 /нонтронит на его структуру и свойства

Е. В. Томина^{1,2✉}, Н. А. Ходосова², А. А. Синельников¹, А. В. Жабин¹, Н. А. Куркин¹, Л. А. Новикова²

¹Воронежский государственный университет,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация

²Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова,
ул. Тимирязева, 8, Воронеж 394087, Российская Федерация

Аннотация

Целью исследования было установление влияния метода формирования нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит на его структуру и свойства.

Методом цитратного горения синтезированы не содержащие примесей наночастицы феррита кобальта CoFe_2O_4 близкой к сферической формы с преобладающей фракцией частиц в интервале 8-20 нм. Формирование нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит осуществлялось двумя методами: механическим смешением готовых прекурсоров с последующим отжигом и горением цитрата железа-кобальта с образованием шпинели в присутствии нонтронита в реакторе.

Нанокompозит CoFe_2O_4 /нонтронит, сформированный первым методом, характеризуется распадом агрегатов природного алюмосиликата и большей сорбционной активностью по отношению к формальдегиду, чем исходный глинистый минерал и шпинель. Второй метод формирования композита приводит к образованию крупнокристаллических структур кремнезема с худшей сорбционной активностью в сравнении с природным алюмосиликатом и CoFe_2O_4 .

Ключевые слова: нанокompозит, метод цитратного горения, феррит кобальта, алюмосиликат

Благодарности: результаты исследований частично получены на оборудовании Центра коллективного пользования Воронежского государственного университета. URL: <http://ckp.vsu.ru>.

Для цитирования: Томина Е. В., Ходосова Н. А., Синельников А. А., Жабин А. В., Куркин Н. А., Новикова Л. А. Влияние метода формирования композита наноразмерный CoFe_2O_4 /нонтронит на его структуру и свойства. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(3): 379–386. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9861>

For citation: Tomina E. V., Khodosova N. A., Sinelnikov A. A., Zhabin A. V., Kurkin N. A., Novikova L. A. Influence of the method of formation a nanosized CoFe_2O_4 /nontronite composite on its structure and properties *Condensed Matter and Interphases*. 2022;24(3): 379–386. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/9861>

✉ Томина Елена Викторовна, e-mail: tomina-e-v@yandex.ru

© Томина Е. В., Ходосова Н. А., Синельников А. А., Жабин А. В., Куркин Н. А., Новикова Л. А. 2022



1. Введение

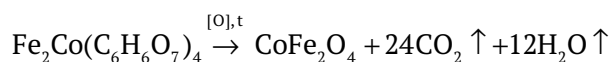
Востребованность наноразмерных ферритов в качестве магнитных материалов [1, 2], катализаторов [3], а в последнее время и как сорбентов [4], определяется, прежде всего, широкой возможностью управления их магнитными, структурными, каталитическими и сорбционными характеристиками за счет изменения методов синтеза нанокристаллов и допирования их различными катионами [5–9]. Катализаторы на основе наноразмерных ферритов существенно дешевле аналогичных на основе платиновых и редкоземельных металлов, прекурсоры для их изготовления – легкодоступны, методы синтеза являются воспроизводимыми и масштабируемыми [1, 2]. Перспективность MeFe_2O_4 ($\text{Me} = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Cu}$) как катализаторов и сорбентов определяется также их химической устойчивостью в кислых средах, термической и временной стабильностью, высокоразвитой поверхностью, высокой намагниченностью насыщения и остаточной намагниченностью, что открывает возможность их извлечения методами магнитной сепарации [10, 11]. В областях катализа и сорбции часто применяются композитные материалы на основе менее дорогой дисперсной матрицы и наноразмерного феррита как магнитной составляющей. В качестве основы для композита в работе выбран глинистый минерал нонтронит, являющийся высокодисперсным природным сорбентом. Структура нонтронита представлена трёхслойным пакетом, включающим два слоя кремнекислородных тетраэдров, разделённых одним октаэдрическим из FeO_6 , между которыми расположены молекулы воды с обменными катионами [12]. Химический состав нонтронита переменный, наиболее вероятная формула $\text{Fe}_2^+[\text{Al}_x\text{Si}_{4-x}\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot \text{Na}_{0.33}(\text{H}_2\text{O})$ [13]. В работе использован минерал Воронежского месторождения (Россия), который согласно [14] содержит 80 % нонтронита и по 10 % иллита и каолинита.

Целью работы являлось установление влияния метода формирования нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит на его структуру и свойства.

2. Экспериментальная часть

Синтез феррита-шпинели CoFe_2O_4 методом цитратного горения осуществляли согласно [15]. Первый подход к формированию композита CoFe_2O_4 /нонтронит заключался в механическом смешении готовых прекурсоров с последующим отжигом (метод 1). Для получения композитного материала брали 20 масс. % феррита кобаль-

та и 80 масс. % нонтронита, добавляли к смеси небольшое количество этилового спирта и тщательно перемешивали. Получившуюся пасту сушили на воздухе в течение 2 часов, после чего отжигали в муфельной печи (SNOL 8.2/1100) в целях удаления спирта при температуре 500 °C в течение 1 часа. Второй метод формирования композита (метод 2) заключался в приготовлении раствора цитратов железа и кобальта согласно [15]. Затем в раствор добавляли нонтронит массой, необходимой для формирования композита составом 20 % CoFe_2O_4 /80 % нонтронит. Реакционную смесь нагревали до полного выпаривания воды. При этом образовывалась паста серо-красного цвета – смесь нонтронита и цитрата железа-кобальта. При дальнейшем нагреве происходило разложение цитрата железа-кобальта с образованием феррита кобальта:



Образовавшийся темно-серый нерастворимый порошок подвергали отжигу в муфельной печи (SNOL 8.2/1100) в целях удаления воды при температуре 300 °C в течение 1 часа.

Фазовый состав образцов феррита кобальта и композита CoFe_2O_4 /нонтронит исследовали методом рентгеновской дифрактометрии (РФА, дифрактометр Empyrean B.V. с анодом Cu ($\lambda = 1.54060$ нм)). Съёмку проводили в интервале углов $2\theta = 10\text{--}80^\circ$ с шагом 0.0200. Для идентификации фаз использовалась база данных JCP-DC [16]. Размер областей когерентного рассеяния частиц CoFe_2O_4 на основании уширения линий рентгеновской дифракции рассчитывали с использованием формулы Дебая–Шеррера (1) [17]:

$$D_{\text{hkl}} = \frac{kx\lambda}{\beta_{\text{hkl}} \times \cos\theta}, \quad (1)$$

где D_{hkl} – средний размер частиц, Å, k – поправочный коэффициент (для сферических частиц $k = 0.9$), λ – длина волны рентгеновской трубки, θ – положение максимума пика, град., β_{hkl} – истинное физическое уширение дифракционного максимума, рад.

Размер и морфологию частиц синтезированного разными методами композита определяли по данным просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ, просвечивающий электронный микроскоп CarlZeiss Libra-120). Гистограмму распределения частиц по размерам строили с использованием программы «ImageJ», версия 1.53k.

Сорбционную способность природного нонтронита, чистого CoFe_2O_4 и нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит тестировали по отношению к формальдегиду – токсиканту 2 класса опасности [18]. Для определения сорбционной емкости к 0.5 г композита добавляли 0.025 дм^3 раствора формальдегида, время статической сорбции составляло 2 часа. По окончании сорбции раствор отфильтровывали. В фильтрате определяли содержание формальдегида сульфитным методом. Относительная ошибка определения составляла 1–3 %.

3. Результаты и обсуждение

По данным РФА (рис. 1) синтезированный цитратным методом образец феррита кобальта является полностью однофазным. Набор рефлексов на дифрактограмме соответствует ферриту кобальта со структурой шпинели CoFe_2O_4 [16].

По данным ПЭМ (рис. 2) частицы феррита кобальта имеют форму, близкую к сферической, явно выражена агломерация. Размер частиц находится в диапазоне от 6 до 34 нм. Преобладающая по размерам фракция частиц лежит в интервале 8–24 нм.

Нонтронит относится к слоистым силикатам группы глинистых минералов смектитов [19]. Нонтронит, как правило, встречается в виде мелкодисперсных чешуйчатых, червеобразных, радиально-сферических минеральных агрегатов, что и подтверждается данными ПЭМ (рис. 3).

Агрегаты нонтронита характеризуются вытянутыми в одном направлении слоистыми образованиями шириной до 100 нм (рис. 3а). Тем-

нопольное изображение подтверждает ультрадисперсную природу минеральных агрегатов нонтронита. В то же время на снимках проявляются округлые частицы размером порядка 10–20 нм, что, вероятно, является следствием незначительного распада микроагрегатов нонтронита на отдельные чешуйки при диспергировании в процессе пробоподготовки.

Нанокompозит CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированный как механическая смесь готовых прекурсоров, представляет собой отдельные частицы округлой формы размером до 20 нм, по всей вероятности, преимущественно кристаллической природы. Как видно из ПЭМ изображения, отсутствуют глинистые частицы природной слоистой формы, характерной для нонтронита, что, видимо, связано с распадом агрегатов природного алюмосиликата на отдельные чешуйки при отжиге нанокompозита. Выражена незначительная агломерация частиц. Размер частиц композита не превышает 20 нм. Преобладающая по размерам фракция частиц находится в диапазоне размеров 6–12 нм.

Общая схема дегидратации смектитов при нагревании согласно [20] выглядит следующим образом: межслоевая вода практически полностью выделяется при 250–300 °С, затем начинается медленное выделение конституционной воды (ОН-групп), которое полностью заканчивается при $T \sim 750$ °С. Процесс дегидратации, пока он полностью не завершен, является частично обратимым. Полное разрушение структуры обычно происходит в интервале 800–900 °С. Более поздние исследования [21] показали, что процесс де-

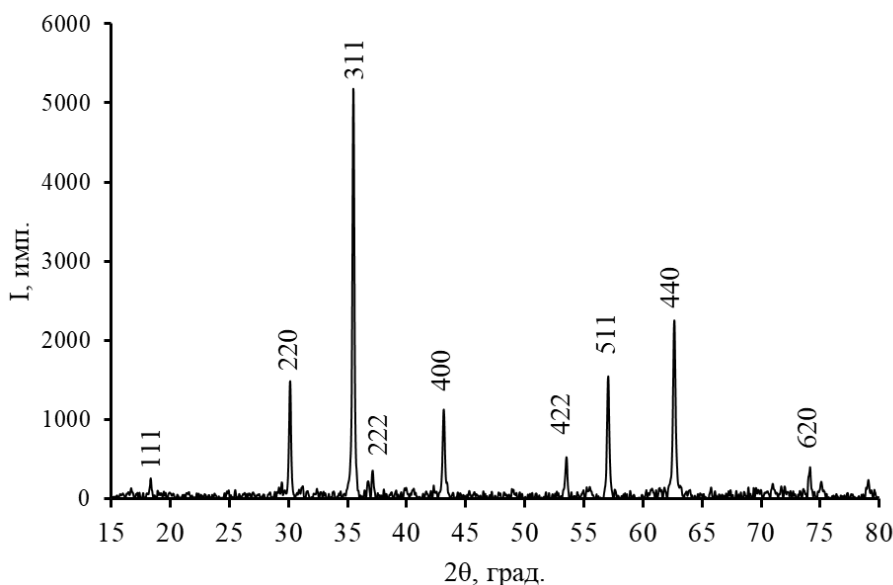


Рис. 1. Дифрактограмма образца CoFe_2O_4 , синтезированного цитратным методом

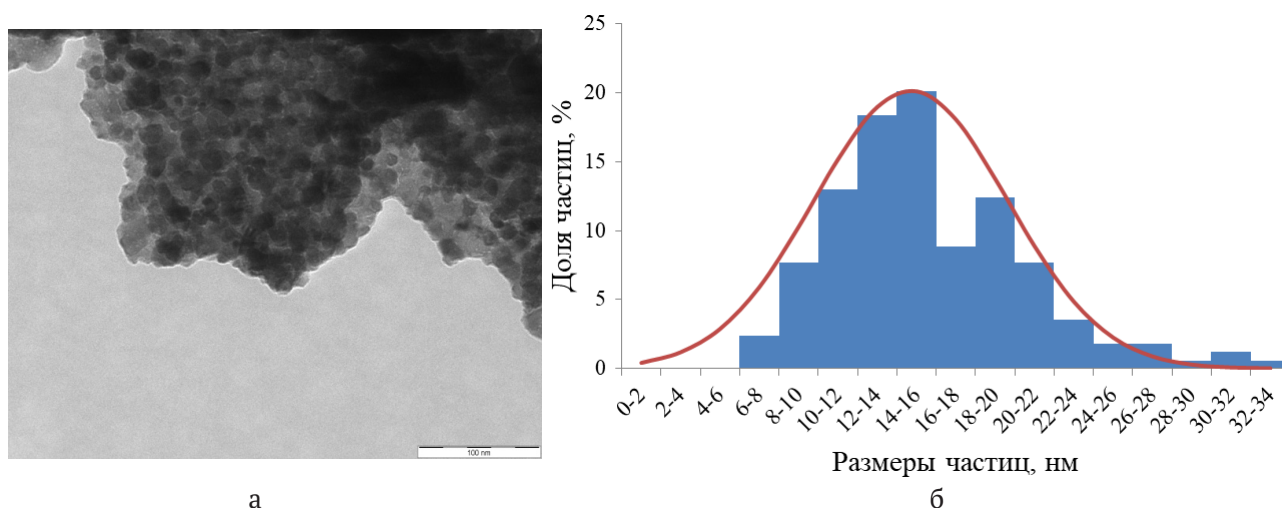


Рис. 2. ПЭМ изображение (а) и гистограмма распределения частиц по размерам (б) CoFe_2O_4

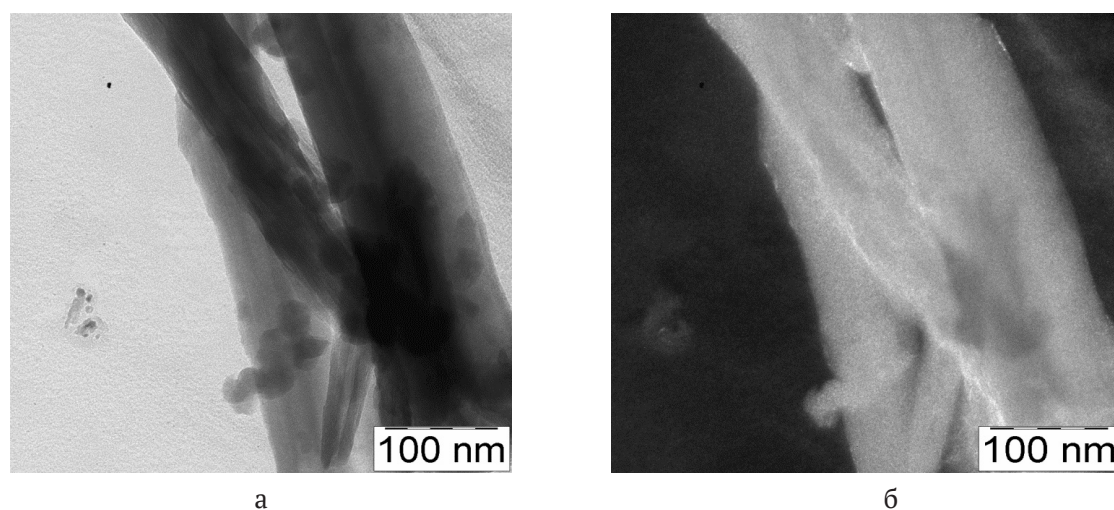


Рис. 3. ПЭМ изображение нонтронита (а) и темнопольное изображение (б)

гидратации смектитов носит более сложный характер. Границы переходов более расплывчаты и не имеют четких и стабильных значений на шкале температур, стадии перехода определяются температурными интервалами. Для нонтронита дегидроксилирование начинается уже в интервале 400–500 °С. При этом слоистая структура сохраняется, однако межслойные пространства разрушаются, площадь поверхности и пористость уменьшаются. При прокаливании при 550 °С слоистый силикат полностью теряет воду и сжимается с образованием слюдоподобной структуры. Рентгенограммы дегидроксилатов достаточно размыты, видны рентгенографические признаки постепенного разрушения минералов.

На дифрактограмме нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, сформированного методом 1 (рис. 5, дифрактограмма 3), идентифицируются все основные рефлексы кобальтовой шпинели

(рис. 5, дифрактограмма 2). Несмотря на то, что условия съемки дифрактограммы композита не позволили увидеть один из основных рефлексов нонтронита в районе 5°, можно идентифицировать оставшиеся рефлексы согласно базе данных JCPDC (рис. 5, дифрактограмма 1), однако их относительная интенсивность значительно снижена. Это свидетельствует об общем увеличении дефектности структуры и дисперсности частиц и может быть связано с разрушением агрегатов природного алюмосиликата, потерей воды за счет процессов дегидратации и частичного дегидроксилирования.

Совершенно иная дифракционная картина характерна для нанокompозита, сформированного методом 2 (рис. 5, дифрактограмма 4). Отсутствие рефлексов феррита кобальта свидетельствует о нахождении шпинели, образовавшейся при сгорании полимерного геля, преи-

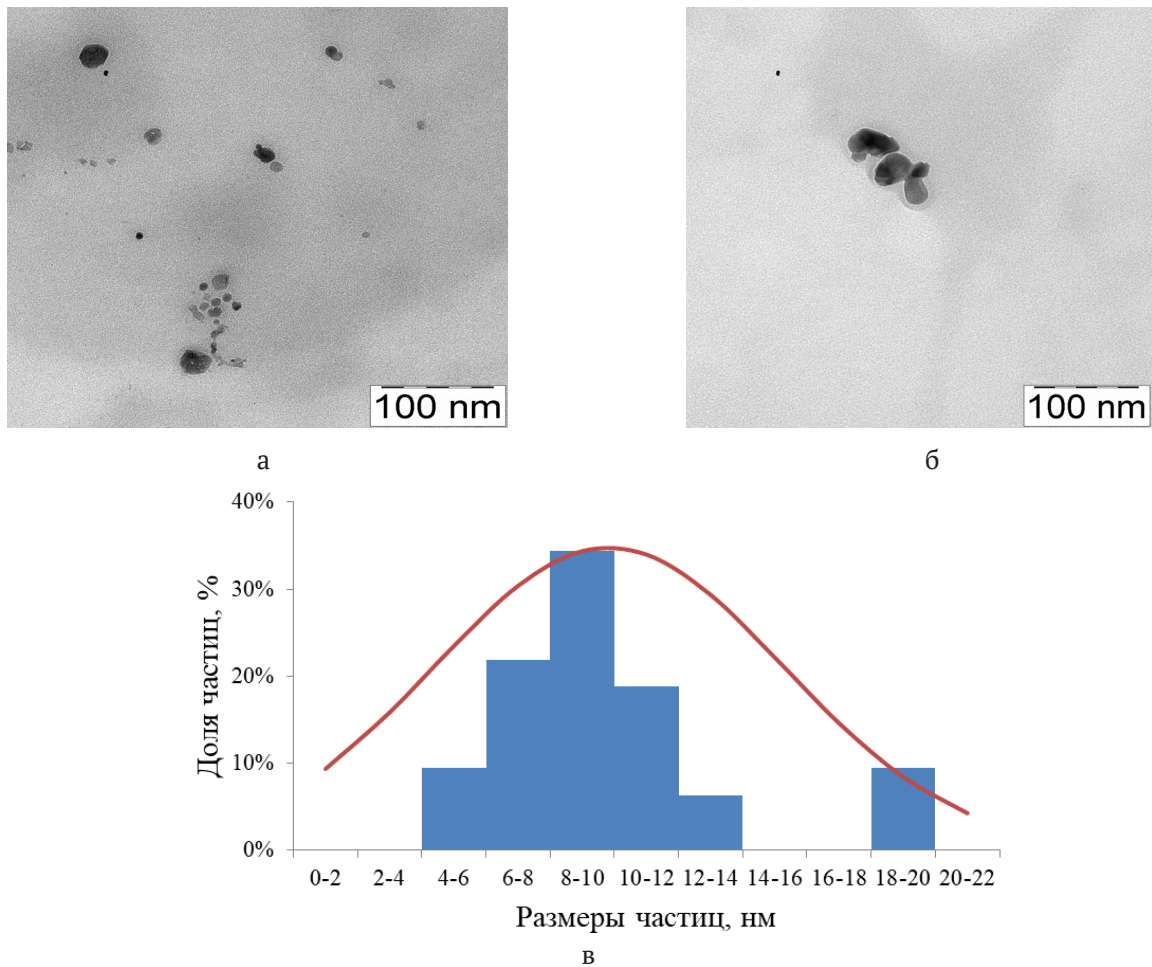


Рис 4. ПЭМ изображение нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированного методом 1, (а), (б) и гистограмма распределения частиц по размерам (в)

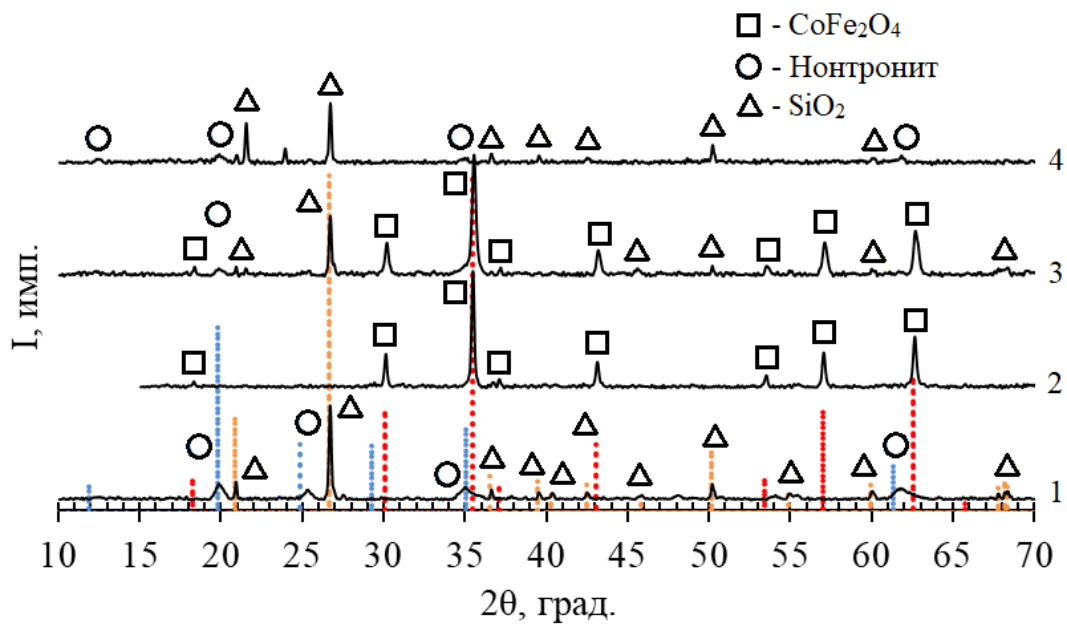


Рис 5. Дифрактограмма образцов нонтронита (1), шпинели CoFe_2O_4 (2), нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, метод 1 (3), нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, метод 2 (4)

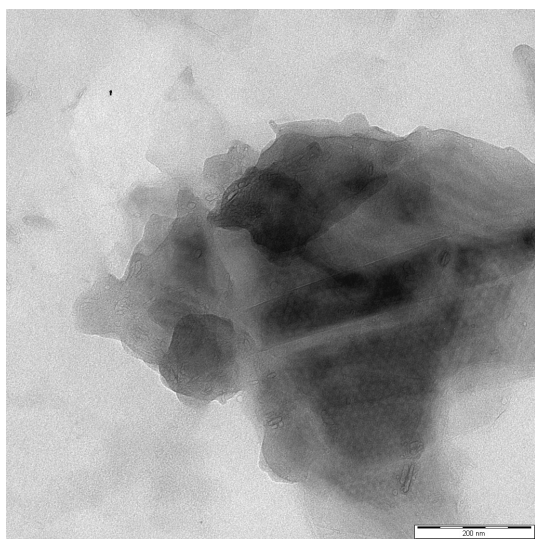
мущественно в рентгеноаморфном состоянии. При этом на дифрактограмме четко фиксируются рефлексы SiO_2 в виде кварца, присутствующие и на дифрактограмме природного нонтронита. Однако в районе угла дифракции 22° идентифицируется, согласно ICDD PDF, самый интенсивный рефлекс кристобалита, отсутствующий на дифрактограммах и природного алюмосиликата, и композита CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированного методом 1. Видимо, при горении гелеобразного цитрата железа-кобальта в сильно неравновесных условиях реализуется переход кварца в кристобалит. Возможность образования метастабильного кристобалита при относительно низких температурах вне классической равновесной схемы перехода кварц – тридимит – кристобалит подчеркивается и в [22]. При дальнейшем нагревании метакристобалит переходит в тридимит и далее в стабильный кристобалит.

На ПЭМ изображении (рис. 6) нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированного методом 2, видно наложение друг на друга достаточно крупных плоскокристаллических объектов размером до 400 нм. Это является следствием дегидроксилирования нонтронита и образования слюдоподобной структуры. Высокое содержание железа, согласно [23], и является причиной относительно низкой термостойкости нонтронита. В нижней части рис. 6б проявляется своеобразная сетчатая структура из расположенных в шахматном порядке отверстий. Такое образование характерно для скелетных остатков некоторых видов диатомовых водорослей. На изображении рис. 6а, снятом при меньшем увеличении, в его правом верхнем

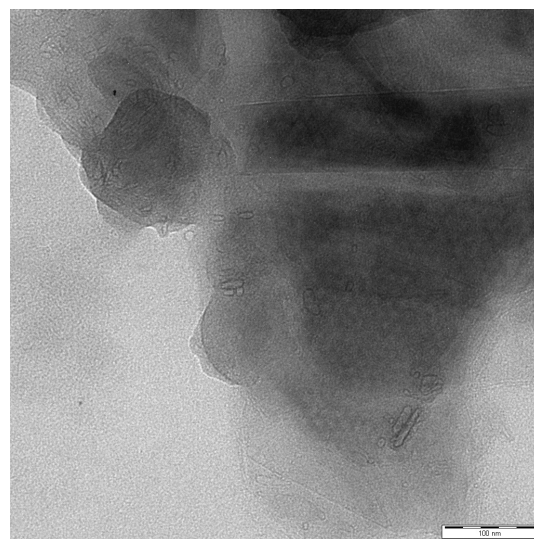
углу видны расположенные параллельно темные полосы, представляющие обломок скелета другого вида диатомовых организмов. Коллоидные растворы (золи) кремнезема служат пищей диатомей, благодаря чему скелеты этих организмов прекрасно сохраняются в ископаемом состоянии даже в древнейших отложениях.

Чистый нонтронит, кобальтовая шпинель CoFe_2O_4 и композиты, сформированные 1 и 2 методами, были протестированы в качестве сорбентов формальдегида (табл. 1). Феррит кобальта имеет наиболее низкую сорбционную активность к формальдегиду, определяемую по величине удельной адсорбции ($a = 13$ мг/г). Для природного нонтронита величина адсорбционной емкости выше – 27 мг/г. Адсорбция формальдегида на композите CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированном методом 1, превосходит таковую на феррите кобальта и на чистом нонтроните ($a = 30$ мг/г). Для CoFe_2O_4 /нонтронит, сформированного методом 2, величина удельной сорбции при всех концентрациях формальдегида ниже, чем у нонтронита и композита, синтезированного методом 1. Это вызвано, прежде всего, дегидроксилированием нонтронита в процессе синтеза композита, приводящего к разрушению октаэдрического слоя и сильному уменьшению пористости.

Таким образом, первый метод формирования композита на основе нонтронита с добавлением феррита кобальта открывает перспективы получения экономичных эффективных сорбентов, чувствительных к внешнему магнитному полю.



а



б

Рис. 6. ПЭМ изображение нанокompозита CoFe_2O_4 /нонтронит, синтезированного методом 2

Таблица 1. Сорбционная способность нонтронита, феррита кобальта и композитов на их основе по отношению растворам формальдегида различной концентрации

Образец	Удельная адсорбция, мг/г			
	0.038 М	0.102 М	0.201 М	0.388 М
Нонтронит	3.15	14.2	20.8	27.0
CoFe_2O_4	4.2	10.5	11.2	13.2
CoFe_2O_4 /нонтронит метод 1	4.1	15.6	22.6	30
CoFe_2O_4 /нонтронит метод 2	4.0	12.0	19.5	22.5

4. Заключение

Методом цитратного горения синтезирован не содержащий примесей нанопорошок феррита кобальта с преобладающей фракцией частиц в интервале 8–24 нм. Предложены два метода формирования нанокompозита 20 % CoFe_2O_4 /80 % нонтронит с целью получения недорогого магнитоактивного сорбента. Установлено влияние методов синтеза на состав, структуру композита, сорбционную активность по отношению к растворам формальдегида различной концентрации. Нанокompозит CoFe_2O_4 /нонтронит, сформированный механическим смешением готовых прекурсоров с последующим отжигом, несмотря на разрушение субмикрoагрегатов природного нонтронита и частичное дегидроксилирование, является более эффективным сорбентом в сравнении с исходным глинистым минералом. Формирование композита горением цитрата железа-кобальта в присутствии нонтронита приводит к образованию крупнокристаллических структур кремнезема с худшей сорбционной активностью в сравнении с природным алюмосиликатом.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Kefeni K. K., Msagati A. M., Mamba B. B. Ferrite nanoparticles: synthesis, characterisation and applications in electronic device. *Materials Science and Engineering B*. 2017;215: 37–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2016.11.002>

2. Tomina E. V., Mittova I. Y., Stekleneva O. V., Kurkin N. A., Perov N. S., Alekhina Y. A. Microwave synthesis and magnetic properties of bismuth ferrite nanopowder doped with cobalt. *Russian Chemical*

Bulletin. 2020;69(5): 941–946. <https://doi.org/10.1007/s11172-020-2852-1>

3. Leila Roshanfekar Rad, Babak Farshi Ghazani, Mohammad Irani, Mohammad Sadegh Sayyafan, Ismaeil Haririan. Comparison study of phenol degradation using cobalt ferrite nanoparticles synthesized by hydrothermal and microwave methods. *Desalination and Water Treatment*. 2014;56(12): 1–10. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.977960>

4. Tkachenko I. A., Panasenko A. E., Odinokov M. M., Marchenko Y. V. Magnetoactive composite sorbents CoFe_2O_4 - SiO_2 . *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2020;65(8): 1142–1149. <https://doi.org/10.1134/S0036023620080173>

5. Mittova I. Ya., Perov N. S., Tomina E. V., Pan'kov V. V., Sladkoyevtsev B. V. Multiferroic nanocrystals and diluted magnetic semiconductors as a base for designing magnetic materials. *Inorganic Materials*. 2021;57(13): 22–48. <https://doi.org/10.1134/S0020168521130033>

6. Rashidi S., Ataie A. One-step synthesis of CoFe_2O_4 nano-particles by mechanical alloying. *Advanced Materials Research*. 2014;829: P. 747–751. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.829.747>

7. Agú U. A., Oliva M. I., Marchetti S. G., Heredia A. C., Casuscelli S. G., Crivello M. E. Synthesis and characterization of a mixture of CoFe_2O_4 and MgFe_2O_4 from layered double hydroxides: band gap energy and magnetic responses. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2014;369: 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2014.06.046>

8. Rao K. S., Nayakulu S. V. R., Varma M. C., Choudary G. S. V. R. K., Rao K. H. Controlled phase evolution and the occurrence of single domain CoFe_2O_4 nanoparticles synthesized by PVA assisted sol-gel method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2018;451(1): 602–608. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.069>

9. Томина Е. В., Павленко А. А., Куркин Н. А. Синтез нанопорошка феррита висмута, допированного ионами эрбия. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(1): 93–100. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3309>

10. Rehman F., Sayed M., Khan J. A., Shah L. A., Shah N. S., Khan H. M., Khattak R. Degradation of

crystal violet dye by fenton and photo-fenton oxidation processes. *Zeitschrift Fur Physikalische Chemie*. 2018;232(12): 1771–1786. <https://doi.org/10.1515/zpch-2017-1099>

11. Indu Sharma Somnath, Kotnala R. K., Singh M., Kumar Arun, Dhiman Pooja, Singh Virender Pratap, Verma Kartikey, Kumar Gagan. Structural magnetic and mössbauer studies of Nd-doped Mg-Mn ferrite nanoparticles. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2017;444: 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.08.017>

12. Ципурский С. И., Дриц В. А., Чекин С. С. Выявление структурной упорядоченности нонтронитов электронографическим методом косых текстур. *Известия Академии наук СССР, серия геологическая*. 1978;10: 105–113.

13. Al-Ahmed A. (Ed.). Advanced applications of micro and nano clay II: synthetic polymer composites. In: *Materials Research Foundations*. Millersville, PA: Material Research Forum LLC; 2022. 290 p. <https://doi.org/10.21741/9781644902035>

14. Bel'chinskaya L. I., Khodosova N. A., Novikova L. A., Strel'nikova O. Y., Roessner F., Petukhova G. A., Zhabin A. V. Regulation of sorption processes in natural nanoporous aluminosilicates. 2. Determination of the ratio between active sites *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2016;52(4); 599–606. <https://doi.org/10.1134/s2070205116040055>

15. Ходосова Н. А., Томина Е. В., Бельчинская Л. И., Жабин А. В., Куркин Н. А., Волков, А. С. Физико-химические характеристики нанокompозитного сорбента нонтронит/ CoFe_2O_4 . *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2021;21(4); 520–528. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2021.21/3636>

16. JCPDC PCPDFWIN: A Windows retrieval/display program for accessing the ICDD PDF — 2 Data Base, International Centre for Diffraction Data, 1997.

17. Brandon D., Kaplan W.D. *Microstructural characterization of materials*. John Wiley & Sons Ltd; 1999. 409 p. <https://doi.org/10.1002/9780470727133>

18. The list of substances, products, production processes, domestic and natural factors that are carcinogenic to humans. GN 1.1.029-98. Moscow: Goskomsanepidnadzor Russia; 1995. 17 p.

19. Стефан В: *Большой справочник минералов Ляпис. Все минералы от А до Я и их свойства. 5-е издание полностью переработанное и дополненное*. Мюнхен: Weise; 2008 г., ISBN 978-3-921656-70-9.

20. Нуризянов Р. М. *Геология Минералы и горные породы*. Альметьевск: Альметьевский государственный нефтяной институт; 2012. 84 с.

21. Bergaya F., Lagaly G. *Handbook of Clay Science. Developments in Clay Science 5*. Amsterdam: Elsevier; 2013. 787 p. Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com>

[rect.com/bookseries/developments-in-clay-science/vol/5/suppl/C](https://www.sciencedirect.com/bookseries/developments-in-clay-science/vol/5/suppl/C)

22. Горшков В. С., Савельев В. Г., Федоров Н. Ф. *Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений*. М.: Высшая школа; 1988. 400 с.

23. Крупская В. В., Закусин С. В., Тюпина Е. А. Доржиева О. В., Чернов М. С., Бычкова Я. В. Преобразование структуры и адсорбционных свойств монтмориллонита при термохимическом воздействии. *Геохимия*, 2019;64(3): 300–319. <https://doi.org/10.31857/S0016-7525643300-319>

Информация об авторах

Томина Елена Викторовна, д. х. н., доцент, зав. кафедрой химии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация).

tomina-e-v@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

Ходосова Наталья Анатольевна, к. х. н., доцент кафедры химии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация).

nhodosova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2809-717X>

Синельников Александр Алексеевич, к. ф.-м. н., директор Центра коллективного пользования научным оборудованием, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

rnileme@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0549-4615>

Жабин Александр Васильевич, к. г.-м. н., доцент кафедры общей геологии и геодинамики, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

zhabin01@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3844-6302>

Куркин Николай Андреевич, аспирант кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация). kurkin.nik@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0468-8207>

Новикова Людмила Анатольевна, к. х. н., доцент кафедры химии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова (Воронеж, Российская Федерация).

yonk@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-1635-7739>

Поступила в редакцию 04.03.2022; одобрена после рецензирования 15.03.2022; принята к публикации 15.05.2022; опубликована онлайн 25.09.2022.