

Н. П. Шабельская, Е. А. Зеленская, А. В. Вяльцев,  
В. А. Баранова, Ю. А. Гайдукова

## СИНТЕЗ И СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ФЕРРИТА МЕДИ (II)

*Ключевые слова:* шпинели, феррит меди, очистка водных растворов, деструкция метилового оранжевого.

В работе проведено исследование условий формирования и свойств композиционных материалов на основе феррита меди (II) и биочаров, полученных из лузги подсолнуха и пшеничной соломы. Актуальность работы обусловлена наличием у изучаемых материалов комплекса важных технических характеристик. Растущее промышленное производство и урбанизация приводят к образованию опасных и токсичных загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду. В последние годы синтетические красители стали одной из основных причин загрязнения воды. Азокрасители содержат устойчивые к разрушению функциональные группы и вследствие этого являются основным источником загрязнения. Проблема загрязнения воды красителями диктует необходимость поиска эффективных материалов и процессов их минерализации. В работе получены мелкокристаллические ферриты меди (II), предложен механизм формирования их структуры. Изучение синтезированных материалов проведено с применением ряда современных методов, таких как рентгенофазовый анализ, электронная микроскопия, определение размеров кристаллов методом Дебая-Шеррера. Размер кристаллитов составил 90,85 нм. Показано, что оксидные соединения формируются на поверхности биочаров, образуя пленку. Полученные материалы использованы в процессе очистки водного раствора от азокрасителя под действием пероксида водорода. Установлена высокая катализическая активность композиционного материала на основе железо-медь-оксидных соединений и биочара из пшеничной соломы: полную деструкцию красителя наблюдали уже через 30 мин от начала реакции. дихромат-ионов. Полученные данные могут служить ориентиром в поиске высоко активных материалов, пригодных для применения в процессах очистки водных растворов от устойчивых к разрушению органических веществ.

N. P. Shabel'skaya, E. A. Zelenskaya, A. V. Vyal'tsev,  
V. A. Baranova, Yu. A. Gaidukova

## SYNTHESIS AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON COPPER (II) FERRITE

*Keywords:* spinels, copper ferrite, purification of aqueous solutions, destruction of methyl orange.

The paper investigates the conditions of formation and properties of composite materials based on copper (II) ferrite and biochars obtained from sunflower husks and wheat straw. The relevance of the work is due to the presence of a set of important technical characteristics in the studied materials. Growing industrial production and urbanization lead to the formation of dangerous and toxic pollutants released into the environment. In recent years, synthetic dyes have become one of the main causes of water pollution. Azo dyes contain degradation-resistant functional groups and are therefore the main source of contamination. The problem of water pollution by dyes dictates the need to find effective materials and processes for their mineralization. In this work, fine crystalline ferrites of copper (II) were obtained, and a mechanism for the formation of their structure was proposed. The synthesized materials were studied using a number of modern methods, such as X-ray phase analysis, electron microscopy, and Debye-Scherrer crystal sizing. The size of the crystallites was 90.85 nm. It is shown that oxide compounds are formed on the surface of biochars, forming a film. The obtained materials were used in the process of purification of an aqueous solution from an azo dye under the action of hydrogen peroxide. A high catalytic activity of a composite material based on iron-copper oxide compounds and a biochar made from wheat straw was established: complete destruction of the dye was observed as early as 30 minutes after the start of the reaction. dichromate ions. The data obtained can serve as a guide in the search for highly active materials suitable for use in the purification of aqueous solutions from degradation-resistant organic substances.

### Введение

Растущее промышленное производство и урбанизация приводят к образованию опасных и токсичных загрязняющих веществ, выбрасываемых в окружающую среду. В последние годы синтетические красители стали одной из основных причин загрязнения воды. Они применяются в качестве окрашивающих веществ для текстиля, косметики, продуктов питания, лекарств, бумаги [1]. Ежегодное мировое производство этих химических веществ достигает 700 тыс. тонн, из которых примерно 10–15 % сбрасывается в водоемы [2, 3]. Азокрасители содержат устойчивые к разрушению функциональные группы и вследствие этого являются основным источником загрязнения. Попадание таких соединений в организм в повышенных количествах может стать причиной аллергии, астмы, экземы, проблем со сном, желудком, нарушений зрения, мигрени. Есть сведе-

ния [1], что подобные вещества вызывают дисфункцию почек и печени или даже рак. Проблема загрязнения воды красителями диктует необходимость поиска эффективных материалов и процессов их минерализации.

Оксиды металлов со структурой шпинели с общей формулой  $MFe_2O_4$  ( $M$  – ион металла в степени окисления +2) представляют академический и практический интерес, поскольку они могут быть легко изготовлены с различным составом, что позволяет варьировать их свойства для конкретных применений [4, 5]. При этом синтез материалов с различным катионным составом приводит к получению ферритов с улучшенными химическими и магнитными свойствами [6, 7]. В частности, феррит меди ( $CuFe_2O_4$ ) со структурой шпинели, находится в стадии интенсивных исследований. Он представляет особый интерес для применения в процессах очистки окружающей среды (очистка воздуха, обеззараж-

живание), биомедицине (как противомикробное средство, лечение рака с помощью гипертермии [4]. Кроме того, CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> представляет собой полупроводниковый материал с умеренной активностью при активации видимым светом; магнитные свойства расширяют его применение в биомедицинской области, предлагая альтернативы для лечения инфекционных заболеваний или уничтожения раковых клеток [8]. В современных исследованиях сообщается о пригодности феррита меди (II) для фотокатализической очистки воды [9].

Биоуголь (или биочар) представляет собой устойчивый пирогенный материал, богатый углеродом, образуется из органических веществ в анаэробных условиях [10, 11]. Высоко пористая структура, ароматический углеводородный состав и другие уникальные свойства биоугля наделяют его исключительными возможностями по иммобилизации загрязняющих веществ и повышению продуктивности процессов очистки [12, 13]. Получают биочары при термической обработке органических отходов (скорлупа кокоса, лузга подсолнечника, шелуха риса и т.п.) без доступа воздуха.

Азокрасители часто не поддаются биологическому разложению и растворимы в воде, поэтому их удаление традиционными методами затруднено [14]. К числу многочисленных методов, которые могут быть использованы для удаления красителей из водных растворов, относятся биологическая очистка [15], процессы окисления [16-19], электрохимические методы [20], флокуляция [21], коагуляция [22], или ионообменный метод [23]. Композитные материалы демонстрируют синергетические эффекты, сочетая преимущества нескольких компонентов для достижения хороших адсорбционных характеристик и более широких возможностей применения.

Учитывая сказанное выше, в данном исследовании было поставлено целью синтезировать сложные окси соединения меди (II)-железа (III) на поверхности биочаров и изучить их каталитическую активность в реакции разложения метилового оранжевого.

### Экспериментальная часть

Оксидные соединения на базе феррита меди (II) были получены по методике, разработанной авторами и описанной в работе [24]. В основе технологии приготовления образцов лежал золь-гель синтез. Кристаллогидраты азотокислых солей меди (II), железа (III) квалификации чда были использованы для приготовления 1 моль/л растворов. В качестве осадителя применяли водный раствор амиака. В качестве структурообразующего компонента использовали лимонную кислоту. Среди различных исходных веществ для золь-гель процессов в качестве источника углерода выделяется лимонная кислота: она представляет собой готовую углеродную цепь, покрытую химически активными карбоксильными группами. Смесь нагревали до образования сухого остатка и далее подвергали термообработке до полного разложения органической составляющей.

Органической матрицей, выступающей в качестве носителя неорганической составляющей, выступали биочары, полученные из пшеничной соломы

и лузги подсолнечника. Синтез биочара из лузги подсолнуха осуществляли в герметичном сосуде, при этом нагрев промытого сельскохозяйственного отхода проводили ступенчато, изменяя температуру с фиксированным шагом в 100 °С, изотермическая выдержка 30 мин, набор температуры между выдержками 10 мин, максимальная температура термообработки 600 °С. Синтез биочара из пшеничной соломы осуществляли в герметичном сосуде при температуре термообработки 700 °С, скорость подъема температуры 10 °С/мин, выдержка при максимальной температуре в течение 45 мин; далее биочар извлекали в охлажденном состоянии из реакционного сосуда, выдерживали в течение 8 ч в растворе калиевой щелочи с концентрацией 1 моль/л для увеличения площади поверхности.

Для получения композиционного органо-неорганического материала в реакционный сосуд вносили 10 г биочара, затем – растворы исходных веществ в последовательности: растворы нитратов переходных элементов (10 мл двухвалентного элемента и 20 мл трехвалентного металла), раствор амиака (15 мл 25 %-ного раствора), раствор лимонной кислоты (10 мл 6 моль/л раствора) и нагревали до полной деструкции образующегося геля.

Были получены композиционные материалы CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/биочар солома CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/биочар лузга подсолнечника, обозначенные далее как ФМ/С м ФМ/П соответственно.

Структурно-фазовый анализ образца проводили с помощью дифрактометра ARL X'TRA, оснащенного излучением Cu Kα. Для сбора данных в формате 2θ от 10° до 70° с шагом 0,02° использовали непрерывный режим Анализ размерных эффектов проводили методом BET на аппарате ChemiSorb 2750 Микрофотографии образцов получали на растровом микроскопе Quattro S SEM (ThermoFisherScientific).

Используя метод Дебая-Шеррера, определяли средний размер кристаллов оксидных соединений D, нм, по наиболее характерной для фазы шпинели линии 311:

$$D = \frac{0.9 \cdot \lambda}{B \cdot \cos \Theta},$$

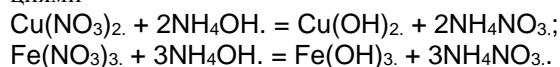
где B – полная ширина пика на уровне половины интенсивности, λ = 1,5406 нм – длина волны, Θ – угол дифракции.

Каталитическую способность синтезированных материалов оценивали по реакции разрушения азокрасителя на модельном растворе метилового оранжевого с концентрацией 0,05 г/л. При этом отвешивали 10 мг материала, помещали в кварцевый реакционный сосуд, заливали раствором, содержащим азо-краситель (объемом 5 мл), добавляли раствор пероксида водорода с концентрацией 3 % (масс.) (в количестве 5 мл), выдерживали определенное время при комнатной температуре. Фиксировали время полной деструкции красителя.

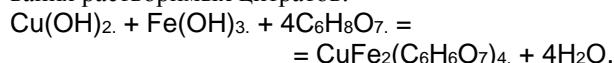
### Результаты и обсуждение

В процессе синтеза композиционных материалов отмечены следующие особенности. При введении

раствора аммиака наблюдали образование аморфных осадков (светло-синено цвета для гидроксида меди (II) и темно-коричневый для  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) гидроксидов переходных элементов в соответствии с реакциями



При введении раствора лимонной кислоты наблюдали переход осадка в раствор за счет образования растворимых цитратов:



Цитраты железа (III)-меди (II) имеют объемную структуру, их формулу можно представить в виде (рис. 1):

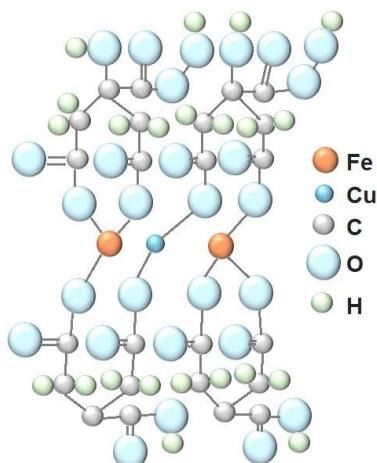
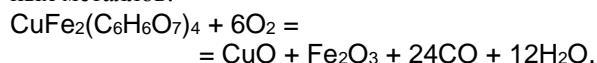


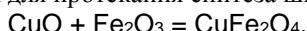
Рис. 1 – Схематическое представление структуры промежуточных продуктов синтеза

Fig. 1 – Schematic representation of the structure of intermediate synthesis products

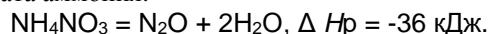
В процессе термолиза происходит разложение промежуточных продуктов с формированием порошка черного цвета, по химическому составу представляющего собой оксидные соединения переходных металлов:



В локальных областях реакционной системы происходит разогрев до повышенных температур, достаточных для протекания синтеза шпинели:



Повышению температуры может способствовать протекание экзотермического процесса разложения нитрата аммония:



При проведении реакции в присутствии биочара на поверхности органического вещества образуется пленка оксидных соединений. В качестве примера на рис. 2 приведены микрофотографии биочара, полученного из соломы (рис. 2а) и композиционного материала  $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ /биочар солома.

На рис. 1б видно, что композиционный материал имеет развитую поверхность, обусловленную присутствием кристаллов неорганических оксидных соединений на поверхности биочара.

Полученные при расшифровке данные о структуре материала следующие: (рис. 3, линия 1) обра-

зец  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ /биочар лузга подсолечника представляют собой феррит меди (II) (PDF Number 010-74-8585), параметр элементарной ячейки  $a = 0.8373 \text{ нм}$ ; со структурой кубической шпинели.

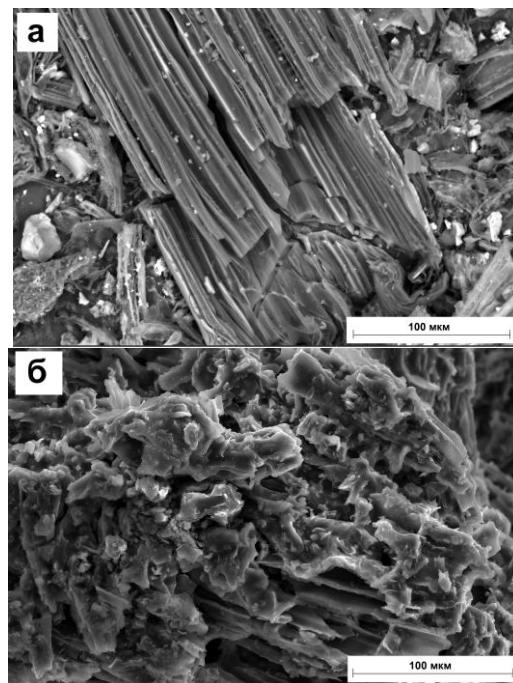


Рис. 2 – Микрофотография биосара из пшеничной соломы (а) и композиционного материала  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ /биочар из соломы (б)

Fig. 2 – Micrograph of bioschar from wheat straw (a) and composite material  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ /bioschar from straw (b)

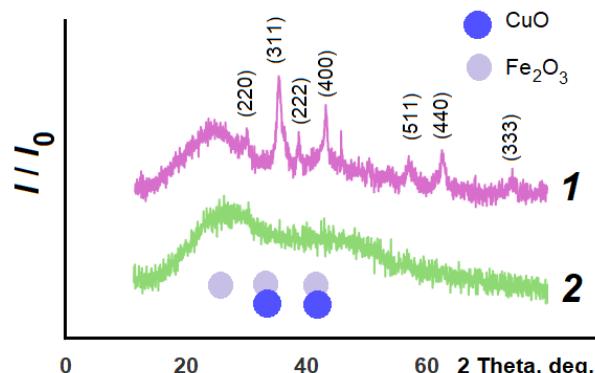


Рис. 3 – Рентгенограммы образцов феррита кобальта (II) (а) и феррита никеля (II) (б)

Fig. 3 – X-ray diffraction patterns of cobalt (II) ferrite (a) and nickel (II) ferrite (b) samples

Образец  $\text{CuFe}_2\text{O}_4$ /биочар солома представлен плохо сформированными кристаллическими фазами (рис. 3, линия 2), положение линий может свидетельствовать о формирующихся фазах оксида меди (II) (PDF Number 010-89-5895) в моноклинной модификации и оксида железа (III) (PDF Number 010-77-9925) в ромбической модификации. По-видимому, в заданных условиях формирование фазы феррита меди (II) не произошло.

Расчет среднего размера кристаллитов феррита меди (II) для образца ФМ/П по уравнению Дебая-Шеррера по наиболее интенсивной линии дает результат  $D = 90.85$  нм.

Синтезированные материалы имеют развитую поверхность. Следовало предположить наличие у таких образцов каталитической активности.

Полученные образцы были испытаны в реакции деструкции метилового оранжевого под действием пероксида водорода. Результаты представлены в табл. 1.

**Таблица 1 – Условия эксперимента и каталитическая активность материалов**

**Table 1 – Experimental conditions and catalytic activity of materials**

Образец	Время полной деструкции красителя, мин
ФМ/С	30
ФМ/П	360
Без катализатора	нет

Следует отметить, что в условиях эксперимента азо-краситель без введения катализатора деструкции не подвергался.

Согласно полученным результатам, изученные композиционные органо-неорганические материалы проявляют высокую каталитическую активность в реакции деструкции азо-красителя под действием пероксида водорода. Особенно высокие показатели демонстрирует образец CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/биочар соломы: в его присутствии полная деструкция красителя происходит в течение 30 мин.

Наличие подобного результата может быть связано с формированием системы Фентона по уравнению



Повышенная каталитическая активность образца ФМ/С может быть связана с высокой реакционной способностью дефектных кристаллов оксидов меди и железа, образующихся на поверхности биочара.

Исклучительно высокая каталитическая активность одного из полученных композиционных материалов открывает возможности поисковых работ по целевому синтезу функциональных материалов для систем водоподготовки.

## Выводы

1. С применением золь-гель метода синтезирован ряд органо-неорганических композиционных материалов на основе феррита меди (II). Показано, что на поверхности органического носителя-биочара формируется пленка неорганического оксидного материала.

2. Используя метод Дебая-Шеррера, определен средний размер кристаллитов образующихся оксидных соединений, который составил 90,85 нм.

3. Обсужден возможный механизм образования неорганической составляющей композитов, включающий стадию формирования гидроксидов, цитратов металлов и их последующего разрушения при нагревании.

4. Установлена высокая каталитическая активность синтезированных материалов в процессе деструкции органического красителя под действием пероксида водорода. Показано, что полная очистка раствора при использовании образца CuFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/биочар соломы происходит в течение 30 мин.

## Благодарности

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

Авторы выражают благодарность сотруднику центра коллективного пользования «Нанотехнологии» Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова к.т.н. Яценко А.Н. за помощь в съемке и расшифровке данных РГА

Авторы выражают благодарность руководителю центра коллективного пользования УдмФИЦ УрО РАН «Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий» к.ф.-м.н. Валееву Р.Г. за помощь в проведении микроскопических исследований композиционных материалов.

## Литература

1. A. Jankowska, R. Panek, W. Franus, J. Goscianska, *Microp. Mesopor. Mat.*, **395**, 113683, (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2025.113683>.
2. A. Srivastava, R.M. Rani, D.S. Patle, S. Kumar. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **97**, 26-41 (2022). DOI: 10.1002/jctb.6891.
3. L. Lianmawii, K.B. Singh, N.R. Singh, N.M. Singh. *Braz. J. Chem. Eng.* (2024). DOI: 10.1007/s43153-023-00425-9.
4. J.H. Martínez-Montelongo, R. Hernandez-Rangel, I. Campos-Avelar, I. Betancourt, L.H. Quintero, M.E. Cano, J.A. Zapien, I.E. Medina-Ramírez. *Ceram. Intern.*, **51**, 2, 2452-2466 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.229>.
5. I.S. Di, T. Ning, J. Yu, P. Chen, H. Yu, J. Wang, H. Yang, S. Zhu. *Trends Anal. Chem.*, **126**, 115864 (2020). DOI: 10.1016/j.trac.2020.115864.
6. N. Akhlaghi, G. Najafpour-Darzi. *J. Ind. Eng. Chem.*, **103**, 292-304 (2021). DOI: 10.1016/j.jiec.2021.07.043.
7. A.G. Ramu, S. Salla, S. Chandrasekaran, P. Silambarasan, S. Gopi, S. yoon Seo, K. Yun, D. Choi. *Environ. Pollut.*, **270**, 116063 (2021). DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116063.
8. A. Soufi, H. Hajjaoui, R. Elmoubarki, M. Abdennouri, S. Ourzal, N. Barka. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, **6**, 100145 (2021). DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100145.
9. R. Suresh, S. Rajendran, P.S. Kumar, D.V.N. Vo, L. Cornejo-Ponce. *Chemosphere*, **274**, 129734 (2021). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129734.
10. H. Zhao, X. Xiang, H. Zhang, J. Chen, M. Yang, H. Chen, X. Tian. *J. Environ. Chem. Eng.*, **13**, 3, 116409 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116409>.
11. H. Qu, L. Chen, F. Yang, J. Zhu, C. Qi, G. Peng. *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 3609 (2023). DOI: 10.3390/ijms24043609.
12. S.K. Bhatia, A.K. Palai, A. Kumar, R.K. Bhatia, A.K. Patel, V.K. Thakur, Y.H. Yang. *Bioresour. Technol.*, **340**, 125644 (2021). DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125644.
13. Z. Fu, J. Zhao, D. Guan, Y. Wang, J. Xie, H. Zhang, Y. Sun, J. Zhu, L. Guo. *Sci. Total Environ.*, **912**, 168822 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168822.
14. M.M. Hassan, C.M. Carr. *Chemosphere*, **209**, 201-219 (2018). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.043.
15. H. Zeghioud, N. Khellaf, A. Amrane, H. Djelal, M. Bouhelassa, A.A. Assadi, S. Rtimi. *Environ. Sci. Pollut.*

- Res.*, **28**, 12490-12499 (2021). DOI: 10.1007/s11356-020-11282-1.
16. М.В. Дицик, Р.М. Деветиарова *Вестн. Технол. унив.*, **28**, 3, 6-17 (2025). DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_3\_12.
17. Ф.А. Быков, А.С. Одинцов, Е.Л. Владимирцева, О.И. Одинцова *Вестн. Технол. унив.* **27**, 11, 138-146 (2024). DOI: [https://doi.org/10.55421/1998-7072\\_2024\\_27\\_11\\_138](https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_11_138).
18. Е.В. Томина, А.А. Meshcheryakova, Н.А. Tien, S.A. Titov, B.V. Sladkopevtsev, A.A.Sinel'nikov. *Inorg Mater.*, **60**, 10, 1216-1225 (2024). DOI: 10.1134/S0020168524701516.
19. Е.В. Томина, Н.А. Kurkin, I.S. Cherednichenko, A.N. Lukin. *Rus. J. Inorg. Chem.*, **69**, 11, 1626-1636 (2024). DOI: 10.1134/s0036023624602654.
20. R. Li, T. Li, Y. Wan, X. Zhang, X. Liu, R. Li, H. Pu, T. Gao, X. Wang, Q. Zhou. *J. Hazard. Mater.*, **421**, 126740 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126740.
21. S.-N. Zhuo, H.-Y. Ren, B.-F. Liu. *J. Hazard. Mater.*, **424**, 127737 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127737.
22. T.K. Hussein, N.A. Jasim. *Mater. Today Proc.*, **42**, 1946-1950 (2021). DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.240.
23. L. Cseri, F. Topuz, M.A. Abdulhamid, A. Alammam, P.M. Budd, G. Szekely. *Adv. Mater. Technol.*, **6**. 2000955 (2021). DOI: 10.1002/admt.202000955.
24. Н.П. Шабельская, А.М. Раджабов, С.С. Манджиева, Т.В. Баур, Т.М. Минкина, А.В. Арзуманова. *Физ. и хим. стекла*, **50**, 5, 438-452 (2024). DOI: 10.31857/S0132665124050071.

## References

1. A. Jankowska, R. Panek, W. Franus, J. Goscianska, *Microp. Mesopor. Mat.*, **395**, 113683, (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2025.113683>.
2. A. Srivastava, R.M. Rani, D.S. Patle, S. Kumar. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, **97**, 26-41 (2022), DOI:10.1002/jctb.6891.
3. L. Liammawii, K.B. Singh, N.R. Singh, N.M. Singh. *Braz. J. Chem. Eng.* (2024). DOI:[10.1007/s43153-023-00425-9](https://doi.org/10.1007/s43153-023-00425-9).
4. J.H. Martinez-Montelongo, R. Hernandez-Rangel, I. Campos-Avelar, I. Betancourt, L.H. Quintero, M.E. Cano, J.A. Zapien, I.E. Medina-Ramirez. *Ceram. Intern.*, **51**, 2, 2452-2466 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.11.229>.
5. I.S. Di, T. Ning, J. Yu, P. Chen, H. Yu, J. Wang, H. Yang, S. Zhu. *Trends Anal. Chem.*, **126**, 115864 (2020). DOI: 10.1016/j.trac.2020.115864.
6. N. Akhlaghi, G. Najafpour-Darzi. *J. Ind. Eng. Chem.*, **103**, 292-304 (2021). DOI: 10.1016/j.jiec.2021.07.043.
7. A.G. Ramu, S. Salla, S. Chandrasekaran, P. Silambarasan, S. Gopi, S. yoon Seo, K. Yun, D. Choi. *Environ. Pollut.*, **270**, 116063 (2021). DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116063.
8. A. Soufi, H. Hajjaoui, R. Elmoubarki, M. Abdennouri, S. Sourzal, N. Barka. *Appl. Surf. Sci. Adv.*, **6**, 100145 (2021). DOI: 10.1016/j.apsadv.2021.100145.
9. R. Suresh, S. Rajendran, P.S. Kumar, D.V.N. Vo, L. Cornejo-Ponce. *Chemosphere*, **274**, 129734 (2021). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129734.
10. H. Zhao, X. Xiang, H. Zhang, J. Chen, M. Yang, H. Chen, X. Tian. *J. Environ. Chem. Eng.*, **13**, 3, 116409 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116409>.
11. H. Qu, L. Chen, F. Yang, J. Zhu, C. Qi, G. Peng. *Int. J. Mol. Sci.*, **24**, 3609 (2023). DOI: 10.3390/ijms24043609.
12. S.K. Bhatia, A.K. Palai, A. Kumar, R.K. Bhatia, A.K. Patel, V.K. Thakur, Y.H. Yang. *Biore sour. Technol.*, **340**, 125644 (2021). DOI: 10.1016/j.biortech.2021.125644.
13. Z. Fu, J. Zhao, D. Guan, Y. Wang, J. Xie, H. Zhang, Y. Sun, J. Zhu, L. Guo. *Sci. Total Environ.*, **912**, 168822 (2024). DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168822.
14. M.M. Hassan, C.M. Carr. *Chemosphere*, **209**, 201-219 (2018). DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.06.043.
15. H. Zeghoud, N. Khellaf, A. Amrane, H. Djelal, M. Bouhelassa, A.A. Assadi, S. Rtimi. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **28**, 12490-12499 (2021). DOI: 10.1007/s11356-020-11282-1.
16. M.V. Didik, R.M. Devetiarova, *Herald of Technological University*, **28**, 3, 6-17 (2025). DOI 10.55421/3034-4689\_2025\_28\_3\_12.
17. F.A. Bykov, A.S. Odintsov, E.L. Vladimirceva, O.I. Odintsova, *Herald of Technological University*. 27, 11, 138-146 (2024). DOI: [https://doi.org/10.55421/1998-7072\\_2024\\_27\\_11\\_138](https://doi.org/10.55421/1998-7072_2024_27_11_138).
18. E.V. Tomina, A.A. Meshcheryakova, N.A. Tien, S.A. Titov, B.V. Sladkopevtsev, A.A.Sinel'nikov. *Inorg Mater.*, **60**, 10, 1216-1225 (2024). DOI: 10.1134/S0020168524701516.
19. Е.В. Томина, Н.А. Kurkin, I.S. Cherednichenko, A.N. Lukin. *Rus. J. Inorg. Chem.*, **69**, 11, 1626-1636 (2024). DOI: 10.1134/s0036023624602654.
20. R. Li, T. Li, Y. Wan, X. Zhang, X. Liu, R. Li, H. Pu, T. Gao, X. Wang, Q. Zhou. *J. Hazard. Mater.*, **421**, 126740 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.126740.
21. S.-N. Zhuo, H.-Y. Ren, B.-F. Liu. *J. Hazard. Mater.*, **424**, 127737 (2022). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.127737.
22. T.K. Hussein, N.A. Jasim. *Mater. Today Proc.*, **42**, 1946-1950 (2021). DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.240.
23. L. Cseri, F. Topuz, M.A. Abdulhamid, A. Alammam, P.M. Budd, G. Szekely. *Adv. Mater. Technol.*, **6**. 2000955 (2021). DOI: 10.1002/admt.202000955.
24. Н.П. Шабельская, А.М. Раджабов, С.С. Манджиева, Т.В. Bauer, Т.М. Минкина, А.В. Арзуманова. *Phys. and Chem. of Glass*, **50**, 5, 438-452(2024). DOI: 10.31857/S0132665124050071.

© Н. П. Шабельская – д.т.н., доцент, заведующий кафедрой, кафедра «Экология и промышленная безопасность» (ЭПБ), Южно-Российский государственный политехнический университет (ЮРГПУ(НПИ)) имени М.И. Платова, Новочеркаск, Россия, nina\_shabelskaya@mail.ru; Е. А. Зеленская – к.т.н., доцент, кафедра «Общая химия и технология силикатов», ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова; В. А. Вяльцев – к.т.н., доцент, кафедра ЭПБ, ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова; В. А. Баранова – ассистент, кафедра кафедра ЭПБ, ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова; Ю. А. Гайдукова – к.х.н., доцент, кафедра ЭПБ, ЮРГПУ(НПИ) имени М.И. Платова.

© N. P. Shabel'skaya – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Head of Department, Department of Ecology and Industrial Safety (EIS), South Russian State Polytechnic University (SRSPU(NPI)) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russia, nina\_shabelskaya@mail.ru; E. A. Zelenskaya – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of General Chemistry and Technology of Silicates, SRSPU(NPI) named after M.I. Platov; A. V. Vyal'tsev – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, the EIS department, SRSPU(NPI) named after M.I. Platov; V. A. Baranova – Assistant, the EIS department, SRSPU(NPI) named after M.I. Platov; Yu. A. Gaidukova – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, the EIS department, SRSPU(NPI) named after M.I. Platov.

Дата поступления рукописи в редакцию – 11.07.25.

Дата принятия рукописи в печать – 24.08.25.