

МРНТИ 61.37.37 : 61.51.91

А.Н. Кыдырали<sup>1</sup> – основной автор, | ©  
Е.К. Онгарбаев<sup>2</sup>



<sup>1</sup>Докторант, <sup>2</sup>Д-р хим. наук, профессор

ORCID

<sup>1</sup><https://orcid.org/0009-0002-5111-6831> <sup>2</sup><https://orcid.org/0009-0002-0418-9360>



<sup>1,2</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

<sup>1,2</sup>Институт проблем горения, Алматы, Казахстан



<sup>1</sup>[aksaule2014r@gmail.com](mailto:aksaule2014r@gmail.com)

<https://doi.org/10.55956/KEJP6440>

## СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЕНТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОДНЫХ СРЕД ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ КРАСИТЕЛЕЙ

**Аннотация.** В настоящей работе представлены результаты синтеза азотсодержащих углеродных сорбентов на основе рисовой шелухи (РШ), модифицированного мочевиной в массовых соотношениях 1:1 и 1:2. Средний выход твердого остатка составил 37,3 % от массы исходного сырья. Сорбционная ёмкость достигла 140 мг/г при температуре карбонизации 500 °С. Метод СЭМ показал, что структура материала характеризуется пористостью с размерами пор 5–15 мкм, что способствует эффективному поглощению загрязнителей. Таким образом, синтезированные материалы демонстрируют потенциал в качестве эффективных сорбентов для очистки водных сред от органических загрязнителей.

**Ключевые слова:** углеродный сорбент, органический краситель, адсорбция, растительное сырье, мочевина.



Кыдырали, А.Н. Синтез и исследование сорбентов для очистки водных сред от органических красителей [Текст] / А.Н. Кыдырали, Е.К. Онгарбаев // Механика и технологии / Научный журнал. – 2026. – №1(91). – С.383-390. <https://doi.org/10.55956/KEJP6440>

**Введение.** В последние годы в связи с быстрым ростом населения и промышленности спрос на качественную воду для антропогенной и производственной деятельности вырос в геометрической прогрессии [1]. Нынешнее снижение количества питьевой воды во всем мире связано не только с изменением климата, но и с достижениями цивилизации человека, в частности с выделением вредных загрязняющих веществ из промышленных секторов [2]. В то время как изменение климата меняет характер осадков и усугубляет засуху, промышленное загрязнение значительно снижает качество воды из-за выделения токсичных веществ, таких как тяжелые металлы, химические вещества и микропластик [3]. Важным источником загрязнения воды являются сточные воды промышленности [4].

Красители считаются органическими соединениями или добавками которые используются для добавления цвета в конечные продукты различных отраслей промышленности, таких как текстиль, живопись, целлюлозно-бумажная промышленность, косметика, продукты питания, кожа, резина, фармацевтика и производство красок [5-7]. Появление этих

продуктов приводит к образованию сточных вод, загрязненных всеми классами красителей [8]. Красители классифицируются на основе структуры и применения: это натуральные красители, синтетические красители, пищевые красители и красители, используемые в кожевенной, лазерной, бумажной промышленности и т. д.

Существуют много методов удаления загрязняющих веществ из сточных вод. Это биологическая очистка, флокуляция, химическое окисление, адсорбция и электрохимическая очистка. Адсорбция является популярным и широко используемым методом удаления загрязняющих веществ, в том числе органических красителей. Адсорбция считается простым низкоэнерготребляемым и высокоэффективным методом очистки. В процессе адсорбции широко используется активированный уголь в качестве адсорбента, но активированный уголь обычно получает из невозобновляемых ресурсов, как нефтяной кокс или бурый уголь. Поэтому исследователи подготовили биоуголь используя отходы растительного сырья в качестве адсорбента [9].

Для улучшения адсорбционных свойств биоугля исследователи стремятся оптимизировать его удельную поверхность, пористость и химические характеристики поверхности. Легирование атомами азота углеродной матрицы увеличивает гидрофильность, а также количество активных центров на поверхности сорбента. Исследователи установили, что адсорбционная емкость биоугля, легированного азотом увеличивается в 1,41 раз. Биоуголь, легированный азотом получают путем карбонизации, пиролиза в атмосфере аммиака или совместного пиролиза биомассы с азотосодержащими донорами [10].

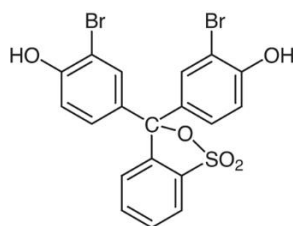
Гетероатомное легирование, введение атомов азота рассматриваются как перспективная стратегия повышения каталитической активности биоугля. Модификация атомами азота способствует нарушению  $\pi$ -структуры углеродной матрицы и созданию дополнительных каталитически активных центров. Однако связь между различными формами азота – пиридиновый, пирроловый и графитовый и доминирующими нерадикальными путями активации и прямой перенос электронов остается недостаточно изученной. Исследования указывают, что краевые конфигурации азота такие как пиридиновый и пирроловый азот, способствуют усилению пути переноса электронов. Это может модифицировать распределение электронной плотности в структуре биоугля, тем самым улучшая перенос электронов от загрязнителей к поверхностно-координированным реакционноспособным центрам [11,12].

Целью настоящего исследования является получение азот легированного биоугля и изучение его характеристик в качестве сорбента для удаления бромфенолового красного из водных растворов.

**Условия и методы исследований.** В качестве сырья для получения биоугля использовали рисовую шелуху (РШ), выращенную в Казахстане. Рисовая шелуха очищена и промыта несколько раз дистиллированной водой высушена при температуре 100-105°C в течении 24 часов.

Химические реактивы, использованные в работе, были аналитически чистыми и применялись без дополнительной очистки: мочевины (карбамид) (РусХим, Россия), азот технический, первый сорт (99,6%) – расход азота составил 3 л/мин.

Бромфеноловый красный имеет молекулярную массу равной 480.16 г/моль и следующую структурную формулу:



*Метод получения биоугля легированного азотом.* Были синтезированы карбонизованные биоугли с легированием азота. Синтез азотсодержащего биоугля, легированного мочевиной, из рисовой шелухи осуществилось в два этапа.

Предварительно высушенная и гомогенизированная рисовая шелуха была пропитана водным раствором мочевины (10%) при различных массовых соотношениях РШ: мочевины – 1:1, 1:2. Каждому образцу биоугля добавляли 10%-ный раствор мочевины, смеси тщательно перемешивали. Процесс предварительного нагрева проводился в интервале температур 70-80°C с выдержкой в течение 3 часов, что обеспечивало равномерное распределение азотсодержащего реагента в структуре биомассы. После обработки пробы высушивали в электропечи при 105 °С для удаления влаги.

Пиролиз азот-пропитанных образцов проводился при температурном диапазоне 500–700 °С со скоростью нагрева 5 °С/мин. После достижения заданной температуры образцы выдерживали в течение 1 часа, обеспечивая полное разложение органических соединений и внедрение азота в углеродную матрицу. На протяжении всего процесса и в фазе охлаждения в печь подавался инертный газ (азот) с целью предотвращения окисления и стабилизации структуры получаемого материала. Полученный азотсодержащий биоуголь промывали дистиллированной водой удаляя растворимые побочные продукты. После промывки образцы сушили при 100–105 °С до постоянной массы и сохраняли в герметичных контейнерах для последующего анализа.

*Метод инфракрасной (ИК) спектроскопии.* Биоуголь, легированный азотом, исследован методом инфракрасной спектроскопии Фурье (ALPHA, Bruker) для определения химического состава. Анализ включал 24 сканов с интервалом 1см<sup>-1</sup>. Измерения проводили в интервале частот колебаний 4000-500 см<sup>-1</sup>

*Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).* Морфология полученных азотсодержащих биоуглей исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии, для получения изображения СЭМ.

*Метод ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии.* Оптические спектры поглощения были получены с помощью УФ спектрофотометра. Для калибровочного графика использовали модельные растворы бромфенолового красного с концентрацией от 2 до 10 мг/л.

Для определения сорбционной способности биоугля, легированного азотом, навески образцов массой 100 мг помещали в конические колбы, содержащие 25 мл модельного раствора бромфенолового красного красителя. Содержимое колб перемешивали с помощью мешалки со скоростью вращения 300 об/мин в течение 30-180 мин, затем анализировали остаточное содержание бромфенолового красителя методом УФ-спектроскопии при длине волны 437 нм.

Сорбционную ёмкость ( $q_e$ ) рассчитывали по формуле:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (1)$$

где:  $q_e$  – сорбционная способность (мг/г);  $C_0$  – начальная концентрация красителя (мг/л);  $C_e$  – концентрация после сорбции (мг/л);  $V$  – объем (л);  $m$  – масса (г).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Проведены исследования сорбционной способности карбонизованной рисовой шелухи, легированной азотом с мочевиной. Биоуголь, легированный азотом, получен в разных соотношениях РШ:мочевина 1:1, 1:2 при температурах 500 и 600°C. В таблице 1 приведен выход биоугля, после карбонизации. Как видно из таблицы температура незначительно влияют на выход биоугля легированного азотом, который в среднем составляет 37,3% (табл. 1)

Таблица 1

Выход биоугля легированного азотом после карбонизации рисовой шелухи

Исходная смесь и их соотношение	Температура карбонизации, °С	Выход, масс %
Рисовая шелуха: Мочевина (1:1)	500	35,6
Рисовая шелуха: Мочевина (1:1)	600	36,8
Рисовая шелуха: Мочевина (1:2)	500	39,9
Рисовая шелуха: Мочевина (1:2)	600	37,1

Увеличение соотношения РШ:мочевина с 1:1 до 1:2 привело к повышению выхода биоугля с 35,6% до 39,9% при 500°C и 36,8 до 37,1% при 600°C.

**Результаты ИК спектроскопии.** Методом инфракрасной спектроскопии изучены химический состав и функциональные группы образцов. На рисунках 1 и 2 приведены ИК спектры биоугля с легированием азота.

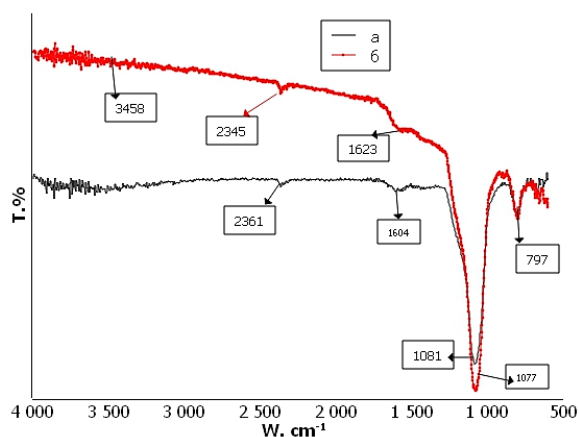


Рис. 1. ИК – спектры сорбентов: а – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при 600° С; б – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при 600°С

На рисунке 1 в спектре в области 3300-3500  $\text{cm}^{-1}$  наблюдается широкое поглощение, что может указывать на присутствие связей N-H (амины, мочевины). Присутствие пика в области 1623  $\text{cm}^{-1}$  может быть отнесено к колебаниям N-H, или валентным колебаниям C=C/C=O связей. Полосы

поглощения в диапазоне  $2800-300\text{ см}^{-1}$  подтверждают наличие С-Н связей характерных для алкильных связей. Совокупность данных свидетельствует о присутствии в образце органического соединения, содержащего азот, вероятно в виде аминогруппы.

ИК – спектры образцов сорбентов из биоугля, легированного азотом при  $500^\circ\text{C}$  представлены рисунке 2, доказано различия в составе функциональных групп. В спектре образца, где более выражены полосы поглощения в области  $1574\text{ см}^{-1}$  имеются ароматические связи С=C и С=N, а также полосе при  $1383\text{ см}^{-1}$  соответствует С-N или  $\text{NO}_2$  группам, что указывает на более высокую степень азотного легирования по сравнению с образцом биоугля, полученного при соотношении РШ:мочевина 1:1.

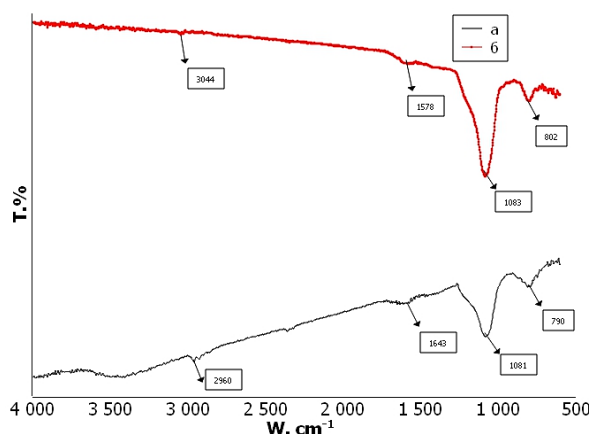


Рис. 2. ИК – спектры сорбентов: а – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при  $500^\circ\text{C}$ ; б – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при  $500^\circ\text{C}$

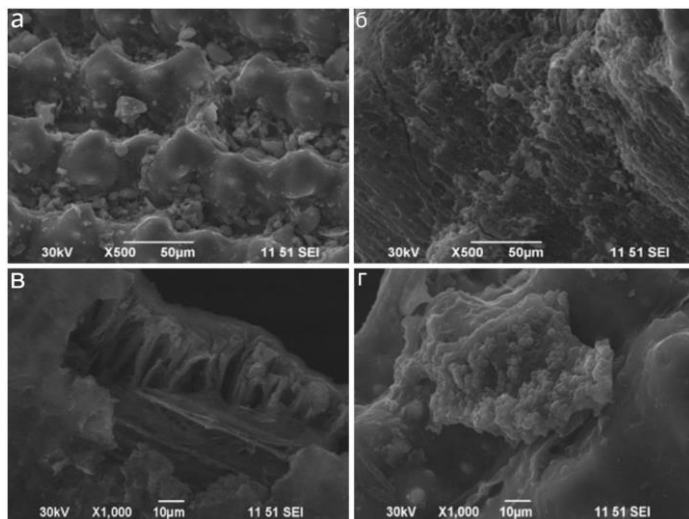


Рис. 3. СЭМ изображения сорбентов: а – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при  $600^\circ\text{C}$ ; б – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при  $600^\circ\text{C}$ ; в – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при  $500^\circ\text{C}$ ; г – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при  $500^\circ\text{C}$

Результаты сканирующего электронного микроскопического анализа. Методом СЭМ определена структура поверхности биоугля легированного азотом. Как показано на рисунке 3 в СЭМ изображениях образцы имеют поры со средним диаметром 5-15 мкм.

Результаты сорбции бромфенолового красного красителя. Проведены исследования по определению сорбционной емкости биоугля, легированного азотом, полученного путем модификации мочевиной и последующей карбонизации. Образец РШ:мочевина 1:2 полученный при карбонизации при 500°C, и соотношениях РШ:мочевина 1:2 показал максимальную сорбционную ёмкость 140 мг/г после 180 мин сорбции.

На рисунке 4 представлены зависимости влияния времени контакта сорбента с раствором на сорбцию бромфенолового красного. Как показана на рисунке с увеличением времени контакта улучшается сорбционная емкость. Адсорбция красителя резко увеличивается в начале, что указывает на пористость сорбента. Процесс адсорбции после 15 мин достигая равновесия, имея незначительные скачки в некоторых этапах. За время контакта 180 минут максимальная сорбционная емкость достигла значения 140 мг/г.

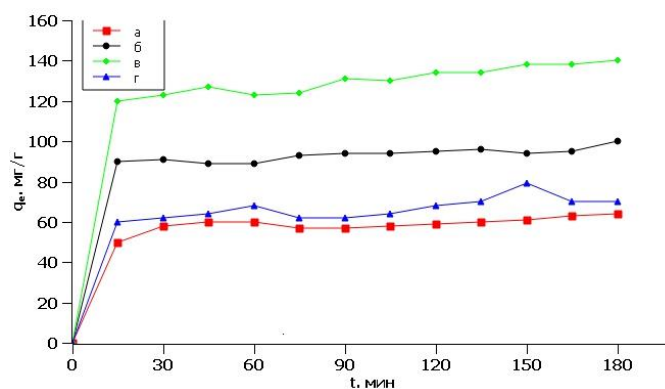


Рис. 4. Влияние времени контакта сорбента с раствором на адсорбцию бромфенолового красного: а – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при 600°C; б – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при 600°C; в – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:1 при 500°C; г – сорбент из биоугля, легированного азотом в соотношении 1:2 при 500°C

**Заключение.** В результате термохимической модификации рисовой шелухи (РШ) с использованием мочевины в массовых соотношениях 1:1 и 1:2 были синтезированы азотсодержащие углеродные сорбенты. Процесс модификации включал предварительное смешение компонентов с последующей сушкой и карбонизацией полученных композиций в инертной атмосфере в температурном диапазоне 500-600°C. Проведение термической обработки в указанных условиях обеспечивало эффективное внедрения азотсодержащих функциональных групп в структуру углеродного материала, что способствовало повышению его сорбционных характеристик. Средний выход твердого углеродного остатка после карбонизации составил 37,3% от массы исходного материала, что свидетельствует об удовлетворительной термической стабильности полученных образцов и приемлемой степени сохранения углеродной фазы в процессе пиролиза. Азотсодержащее

сорбенты были использованы для адсорбции органического красителя – бромфенолового красного. Сорбционная емкость азотосодержащего сорбента карбонизованного при температуре 500°C составило 140 мг/г.

По изображениям СЭМ, размер пор азотосодержащих сорбентов составляет в среднем 5-15 мкм.

#### Список литературы

1. Sharma K., Rajan S., Nayak S.K. Water pollution: Primary sources and associated human health hazards with special emphasis on rural areas // *Water Resources Management for Rural Development*. – Elsevier, 2024. – P. 3-14. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18778-0.00014-3>.
2. Jones K.C., de Voogt P. Persistent Organic Pollutants (POPs) // *Environmental Pollution*. – 1999. – Vol. 100. – P. 209-221. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00098-6](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00098-6).
3. Alharbi O.M.L., Basheer A.A., Khattab R.A., Ali I. Health and environmental effects of persistent organic pollutants // *Journal of Molecular Liquids*. – 2018. – Vol. 263. – P. 442-453. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.05.029>.
4. Mukhopadhyay A., Duttgupta S., Mukherjee A. Emerging organic contaminants in global community drinking water sources and supply: A review of occurrence, processes and remediation // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2022. – Vol. 10. – No. 3. – P. 107560. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107560>.
5. Pavithra K.G., et al. Removal of colorants from wastewater: A review on sources and treatment strategies // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2019. – Vol. 75. – P. 1-19.
6. Agorku E.S., Pandey A.C., Mamba B.B., Mishra A.K., Gd C.N.S. Multi-doped ZrO<sub>2</sub> for photocatalytic degradation of indigo carmine dye from synthetic water under simulated solar light // *Materials Today: Proceedings*. – 2015. – Vol. 2. – No. 7. – P. 3909-3920.
7. Rosa J.M., Fileti A.M.F., Tambourgi E.B., Santana J.C.C. Dyeing of cotton with reactive dyestuffs: the continuous reuse of textile wastewater effluent treated by ultraviolet (UV)/hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) homogeneous photocatalysis // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Vol. 90. – P. 60-65.
8. Tahir U., Yasmin A., Khan U.H. Phytoremediation: potential flora for synthetic dyestuff metabolism // *Journal of King Saud University – Science*. – 2016. – Vol. 28. – No. 2. – P. 119-130.
9. Santana M.S., Alves R.P., Santana L.S., Gonçalves M.A., Guerreiro M.C. Structural, inorganic, and adsorptive properties of hydrochars obtained by hydrothermal carbonization of coffee waste // *Journal of Environmental Management*. – 2022. – Vol. 302, Part A. – P. 114021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114021>.
10. Lin Z., Wang R., Tan S., Zhang K., Yin Q., Zhao Z., Gao P. Nitrogen-doped hydrochar prepared by biomass and nitrogen-containing wastewater for dye adsorption: Effect of nitrogen source in wastewater on the adsorption performance of hydrochar // *Journal of Environmental Management*. – 2023. – Vol. 334. – P. 117503. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117503>.
11. Wang H., Guo W., Liu B., Wu Q., Luo H., Zhao Q., Si Q., Sseguya F., Ren N. Edge-nitrogenated biochar for efficient peroxydisulfate activation: An electron transfer mechanism // *Water Research*. – 2019. – Vol. 160. – P. 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.059>.
12. Wan Y., Hu Y., Zhou W. Catalytic mechanism of nitrogen-doped biochar under different pyrolysis temperatures: The crucial roles of nitrogen incorporation and carbon configuration // *Science of The Total Environment*. – 2022. – Vol. 816. – P. 151502. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151502>.

Материал поступил в редакцию 08.08.25, принят 06.02.26.

А.Н. Қыдырәлі<sup>1,2</sup>, Е.К. Онгарбаев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан

### СУЛЫ ОРТАЛАРДАН ОРГАНИКАЛЫҚ БОЯҒЫШТАРДЫ ТАЗАЛАУҒА АРНАЛҒАН СОРБЕНТТЕР СИНТЕЗДЕУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

**Аңдатпа.** Бұл жұмыста 1:1 және 1:2 массалық қатынасында мочевиімен модификацияланған күріш қауызы негізіндегі азоты бар көміртекті сорбенттер синтезінің нәтижелері берілген. Қатты қалдықтың орташа шығымы бастапқы шикізат массасының 37,3% құрады. Сорбциялық қабілеті 500°C карбонизация температурасында 140 мг/г құрады. СЭМ нәтижелері материалдың құрылымы ластаушы заттардың тиімді сіңірілуіне ықпал ететін кеуек өлшемдері 5-15 мкм болатын кеуектілікпен сипатталатынын көрсетті. Осылайша, синтезделген материалдар сулы ортаны органикалық ластаушы заттардан тазарту үшін тиімді сорбенттер ретінде потенциалды көрсетеді.

**Тірек сөздер:** көміртекті сорбент, органикалық бояғыш, адсорбция, өсімдік материалдары, мочевина.

А.Н. Кыдырәлі<sup>1,2</sup>, Е.К. Ongarbayev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute Combustion Problems, Almaty, Kazakhstan

### SYNTHESIS AND STUDY OF SORBENTS FOR THE REMOVAL OF ORGANIC DYES FROM AQUEOUS MEDIA

**Abstract.** This paper presents the results of the synthesis of nitrogen-containing carbon sorbents based on plant raw materials modified with urea in mass ratios of 1:1 and 1:2. The average yield of solid residue was 37.3% of the initial raw material mass. The sorption capacity reached 140 mg/g at a carbonization temperature of 500°C. SEM showed that the structure of the material is characterized by porosity with pore sizes of 5–15 μm, which contributes to the effective absorption of pollutants. Thus, the synthesized materials demonstrate potential as effective sorbents for the purification of aqueous media from organic pollutants.

**Keywords:** carbon sorbent, organic dye, adsorption, vegetable raw materials, urea.