

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/13277

Сорбционно-структурные характеристики биоуглей на основе опилок тополя

**Наталия Анатольевна Ходосова^{1✉},
Константин Викторович Жужукин¹, Елена Викторовна Томина^{1,2},
Вячеслав Валерьевич Родаев³, Виктор Федорович Кострюков²**

¹Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация, nhodosova@mail.ru✉

²Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация

³Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Российская Федерация

Аннотация. Изучена сорбция красителя метиленового синего на биоугле, полученном на основе опилок тополя. Уголь получен карбонизацией при 500°C в течение 3 часов со скоростью нагрева до данной температуры 10°C/мин, выход продукта составил 39%. Установлено, что поверхностные характеристики биоугля сильно зависят от типа сырья и вида обработки. При модификации 2 М раствором КОН возрастает плотность в результате уменьшения размера частиц биоугля, снижается отношение О/С от 0.167 до 0.150. Модификация щелочью способствует возрастанию удельной поверхности в 6 раз, объема мезопор в 4 раза, диаметр пор практически не меняется. Обработка биоугля 2 М раствором КОН привела к ряду изменений в его ИК-спектре, которые отражают структурные и химические модификации, ключевые для адсорбционных свойств. Установлено, что на поверхности модифицированного угля отмечается рост количества гидроксильных групп (-ОН), возрастает ароматическая составляющая. Обработка КОН активизирует уголь, создавая микропоры за счет реакций с образованием и последующим вымыванием промежуточных соединений. Адсорбция метиленового синего на исследуемом биоугле представляет собой сложный процесс и включает в себя физическое и химическое взаимодействия. Оценена применимость адсорбционных моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для аппроксимации экспериментальных изотерм адсорбции красителя. Установлено, что адсорбция метиленового синего биоуглями адекватно описывается уравнением Ленгмюра ($R^2=0.99$). Форма полученных изотерм позволяет предположить, что сорбция красителя ограничивается образованием монослоя, адсорбция протекает на активных центрах углеродной поверхности как кислотного, так и основного характера в большей степени на поверхности модифицированного биоугля.

Ключевые слова: древесные опилки, биоуголь, изотермы сорбции, краситель метиленовый синий.

Для цитирования: Ходосова Н.А., Жужукин К.В., Томина Е.В., Родаев В.В., Кострюков В.Ф. Сорбционно-структурные характеристики биоуглей на основе опилок тополя // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2025. Т. 25, № 4. С. 490-498. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13277>

Original article

Sorption and structural characteristics of biochars based on poplar sawdust

**Nataliya A. Khodosova^{1✉}, Konstantin V. ZhuZhukin¹, Elena V. Tomina^{1,2},
Vjacheslav V. Rodaev³, Victor F. Kostryukov²**

¹Morozov Voronezh State University of Forestry and Technologies, Voronezh, Russian Federation, nhodosova@mail.ru✉

²Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation

³Tambov State University, Tambov, Russian Federation

Abstract. The sorption of methylene blue dye on biochar obtained from poplar sawdust was studied. The coal was obtained by carbonization at 500°C for 3 hours with a heating rate of 10°C/min to this temperature; the product yield was 39%. It was found that the surface characteristics of biochar strongly depend on the type of raw material and the type of processing. When modified with 2 M KOH solution, the density increases due to a decrease in the size of biochar particles, the O/C ratio decreases from 0.167 to 0.150. Modification with alkali contributes to an increase in the specific surface area by 6 times, the volume of mesopores by 4 times, and the pore diameter remains virtually unchanged. Treatment of biochar with a 2 M KOH solution led to a number of changes in its IR spectrum, reflecting the structural and chemical modifications key to its adsorption properties. It was found that the number of hydroxyl groups (-OH) on the surface of the modified charcoal increases, while the aromatic component increases. KOH treatment activates the carbon, creating micropores through reactions that form and subsequently wash out intermediate compounds. Methylene blue adsorption on the studied biochar is a complex process involving physical and chemical interactions. The applicability of the Langmuir and Freundlich adsorption models for approximating the experimental dye adsorption isotherms was estimated. It was found that the adsorption of methylene blue by biochars is adequately described by the Langmuir equation ($R^2 = 0.99$). The shape of the obtained isotherms allows us to assume that the sorption of the dye is limited by the formation of a monolayer, adsorption occurs on the active centers of the carbon surface of both acidic and basic nature, to a greater extent on the surface of modified biochar.

Keywords: wood sawdust, biochar, sorption isotherms, methylene blue dye.

For citation: Khodosova N.A., ZhuZhukin K.V., Tomina E.V., Rodaev V.V., Kostyukov V.F. Sorption and structural characteristics of biochars based on poplar sawdust. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(4): 490-498. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/13277>

Введение

Интерес к производству биоугля из биомассы в последние десятилетия значительно вырос, что связано с возможностью получения углей пиролизом органической биомассы (древесных, сельскохозяйственных, пищевых отходов и др) [1-4] и активным использованием биоугля в сельском хозяйстве, энергетике, промышленности, строительстве [5,6].

В Воронежской области эффективно реализуется проект, направленный на создание площадок, называемых «углеродными полигонами» [7]. На территории карбонового полигона Воронежского государственного лесотехнического университета высаживают саженцы быстрорастущего тополя «Воронежский гигант», который может стать одним из самых перспективных видов растений для создания подобных полигонов вследствие высокой скорости роста и неприхотливости растения. Однако значительная антропогенная нагрузка, грибковые заболевания и прочие факторы приводят к повреждаемости тополей. Активная фаза роста деревьев сменится необходимостью процедур опиловки и удаления поврежденных деревьев, в результате чего образуется большое количество дре-

весных отходов – опилок, которые необходимо утилизировать с максимальной пользой. Решением проблемы может стать создание биоуглеродных сорбентов для использования в области очистки сточных вод.

Исследование характеристик и свойств биоуглей, полученных из отходов растительного сырья, а также возможности использования биоуглей в области очистки сточных вод изложены в работах [8-10]. Применение биоугля для извлечения органических и неорганических загрязнителей из сточных вод обусловлено сорбционной способностью, которая определяется элементарным составом, площадью поверхности, размером пор, поверхностными функциональными группами и катионно-анионообменной способностью. Эти физико-химические свойства варьируются в зависимости от природы исходного сырья, а также методов и условий технологии карбонизации биомассы [11-13].

В качестве адсорбата использовали кислотно-основной краситель – метиленовый синий (МС). Показатель сорбционной способности по МС позволяет оценить мезопористую структуру угля, а также возможность использования угля

для очистительных сооружений, в пищевой и фармацевтической промышленности [14,15].

Адсорбция красителя зависит как от величины поверхности, так и от ее химического состава, природы и содержания поверхностных функциональных групп. В качестве сорбционного материала обычно используют активированные угли, однако, альтернативным способом является использование более дешевых, эффективных и доступных биоуглей [16, 17].

Цель работы состояла в изучении физико-химических и поверхностных характеристик биоугля на основе опилок тополя, анализа изотерм сорбции красителя метиленового синего (МС) исходным и модифицированным образцами.

Экспериментальная часть

Биоуголь получен на основе опилок тополя, исходная фракция от 1 до 5 мм. Нагрев осуществляли в реакторе со скоростью 10 °С/мин до температуры 500°С, при достижении необходимой температуры образцы выдерживали 3 ч. Выход биоугля составляет ~ 39%. Химическую модификацию осуществляли раствором гидроксида калия с концентрацией 2 М, в соотношении образец – модификатор 1:4 при 21°С. После обработки образцы промывали дистиллированной водой и высушивали до постоянной массы при 105-110°С. Подготовленные образцы для дальнейших исследований просеивали через сито с диаметром 0.315мм. Фракционный состав биоугля, полученного карбонизацией при температуре 400-500°С в большей степени включает фракции с размером частиц от 4 до 25 мм [18]. Использование более высоких температур и времени выдержки приводит к увеличению выхода мелких фракций биоугля (1-2 мм) [19]. В работе [20] установлено, что щелочная модификация приводит к уменьшению размера частиц и исчезновению крупных фракций.

Для исходных и модифицированных образцов определены физико-химические характеристики: рН, влажность, насыпная и истинная плотность, по методикам, указанным в работе [21].

Количественный элементный анализ проводили методом сканирующей электронной микроскопии, используя термоэмиссионный сканирующий электронный микроскоп (ЕМ6900-ЭМТИОН). ИК-спектры регистрировали на Фурье спектрометре Vertex-70 фирмы Bruker с использованием приставки Platinum ATR, позволяющей снимать спектры в интервале волновых чисел 4000-400 см⁻¹. Анализ удельной поверхности, пористости и суммарного объема пор проводили на газо-сорбционном анализаторе AUTOSORB iQ-C (Quantachrome, США) в режиме низкотемпературной адсорбции азота. Предварительно образцы дегазировали в вакуумной станции прибора при 350°С в течение 4 часов. Удельная поверхность образцов рассчитана по методу БЭТ, значения объема и размера пор оценены по методу NLDFT (адсорбционная ветвь изотермы) на программном обеспечении Quantachrome QuadraWin Software, version 7.1.

Для определения адсорбции МС использована методика, представленная в ГОСТ 4453-74 [22] Водные растворы готовили с использованием красителей квалификации «ч.д.а». Равновесную сорбцию определяли через 24 часа. Концентрацию МС определяли фотометрически на фотоколориметре КФК-2 при 660 нм.

Равновесную сорбционную емкость рассчитывали по формуле:

$$a = \frac{(C_n - C_p) \cdot V}{m},$$

где a – количество адсорбированного красителя, мг/г, C_n и C_p – соответственно начальная и равновесная концентрации раствора, мг/дм³, V – объем раствора, дм³, m – масса образца, г.

Таблица 1 Физико-химические характеристики биоуглей

Table 1. Physicochemical characteristics of biochars

Образец	Влажность, W, %	Насыпная плотность, г/л	Истинная плотность, г/л	pH
БТ	3.7	378.5	1165	7.0
БТ+КОН	4.3	405.7	1212	7.2

Примечание: БТ-биоуголь тополь, БТ+КОН – биоуголь тополь, модифицированный раствором КОН

Таблица 2 Поверхностные характеристики биоуглей

Table 2 Surface characteristics of biochars

Образец	$S_{уд}$, м ² /г	V_{ME} , см ³ /г	d_{ME} , нм
БТ	14.084	0.027	3.954
БТ+КОН	85.099	0.113	3.928

Примечание: БТ-биоуголь тополь, БТ+КОН – биоуголь тополь, модифицированный раствором КОН

Таблица 3. Элементный состав образцов

Table 3. Elemental composition of samples

Образец	Элемент, ат. %						
	C	O	K	Ca	Mg	Si	P
БТ	84.44	14.07	0.26	0.97	0.16	0.05	0.04
БТ+КОН	85.12	12.75	0.50	1.47	0.11	0.05	-

Примечание: БТ – биоуголь тополь; БТ+КОН – биоуголь тополь, модифицированный раствором КОН

Обсуждение результатов

В исходном и модифицированном образцах отмечается возрастание влажности, насыпной и истинной плотности, величины pH водной вытяжки (табл. 1).

Подобные результаты для биоуглей на основе опилок березы и сосны получены и в работе [17]. В результате модификации происходит уменьшение размера частиц фракции биоугля, что способствует увеличению величины плотности и согласуется с исследованиями [23].

Определены поверхностные характеристики биоуглей до и после модификации раствором КОН (табл. 2).

Проведение модификации раствором щелочи существенно сказывается на поверхности карбонизатов. В работах [24, 25] представлены данные, свидетельствующие как о возрастании удельной поверхности карбонизатов в результате щелочной обработки, так и об уменьшении [26]. Установлено, что характеристики биоугля, модифицированного щелочами,

сильно зависят от типов сырья и от способа обработки.

Отмечается возрастание удельной поверхности угля на основе опилок тополя в 6 раз, а объема пор более чем в четыре раза. При температурах карбонизации до 600⁰С пористость формируется только за счет взаимодействия со щелочью, которая способствует образованию большего количества пор малого размера и развитию губчатой структуры сорбента [27]. Для исследуемых образцов угля на основе опилок тополя не отмечается изменения диаметра мезопор в выбранных условиях карбонизации и модификации.

Определение элементного состава показало, что предварительная модификация биоугля способствует незначительному увеличению содержания углерода и снижению содержания кислорода (табл. 3).

Рассчитано соотношение O/C для исходного и модифицированного образцов. Величина O/C указывает на полярность и обилие полярных кислородсодержащих поверхностных функциональных групп в

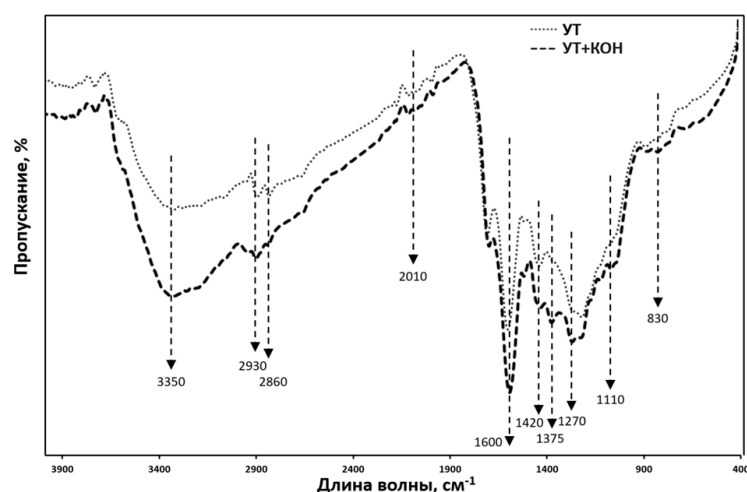


Рис. 1 ИК спектры исходного и модифицированного биоуглей
 Fig. 1 IR spectra of the original and modified biochars

биоугле. Установлено, что модификация приводит к уменьшению соотношения О/С с 0.167 до 0.150. В обоих образцах обнаружены биогенные элементы - кальций, калий, фосфор, магний, кремний, содержание которых при проведении модификации незначительно повышается. В работе [17] установлено аналогичное соотношение для биоуглей на основе опилок сосны и березы. Полученная величина соотношения О/С для биоугля из опилок тополя на 60-70% ниже.

На ИК-спектре биоугля, полученного при пиролизе древесины тополя при 500°C в бескислородной среде, идентифицированы характерные пики, отражающие химические превращения биополимеров (целлюлозы, лигнина, гемицеллюлозы) в процессе карбонизации (рис. 1).

Полоса поглощения при частоте 3350 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям О-Н-связей, что может быть связано с остаточными фенольными гидроксильными группами лигнина или адсорбированной влагой на поверхности угля [28]. При 500°C дегидратация и ароматизация древесины является значительной, в связи с этим интенсивность этой полосы снижена по сравнению с низкотемпературным пиролизом. Области поглощения 2930 и 2860 см⁻¹ относятся к асимметричным и симметричным колебаниям С-Н в

алкильных группах (-CH₂, -CH₃), которые сохраняются как фрагменты не полностью разложившихся углеводородных цепей лигнина или целлюлозы [29]. Максимум в области 2010 см⁻¹ может быть связан с колебаниями тройных связей (C≡C или C≡N), однако для древесного угля это нетипично — вероятно, это артефакт или следы примесей.

Область поглощения при 1600 см⁻¹ обусловлена ароматическими С=С-связями в конденсированных углеродных структурах, по-видимому, формирующихся при высокотемпературном пиролизе, а также связываемых с наличием хинонов и гидрохинонов. Максимумы 1420 и 1375 см⁻¹ соответствуют деформационным колебаниям С-Н в ароматических кольцах или метильных группах (-CH₃), что характерно для остатков лигнина [30]. Пики в области 1270 см⁻¹ связаны с валентными колебаниями С-О-связей в фенолах, эфирах или остатках кислородсодержащих структур лигнина, которые частично сохраняются даже при 500°C [31]. Максимум 1110 см⁻¹ может относиться к С-О-колебаниям в силикатных примесях (если они присутствовали в древесине) или остатках гемицеллюлозы [32]. Незначительная полоса в области 830 см⁻¹ соответствует деформационным колебаниям С-Н в ароматических

структурах с заместителями, что подтверждает образование конденсированных ароматических кластеров.

При пиролизе в бескислородной среде при 500°C происходит деструкция кислородсодержащих групп (C=O, C-O), однако их остаточные сигналы на ИК-спектрах указывают на возможное неполное удаление кислорода из матрицы угля. Наличие алкильных и ароматических фрагментов одновременно может отражать промежуточную стадию карбонизации, что возможно связано с частичным образованием графитоподобных структур из исходных биополимеров, а также с наличием минеральных примесей, содержащихся в древесине тополя (например, силикаты), которые также могут вносить вклад в спектр, особенно в области ниже 1000 см⁻¹.

Обработка биоугля из древесины тополя 2 М раствором КОН привела к ряду изменений в его ИК-спектре, которые отражают структурные и химические модификации, ключевые для адсорбционных свойств. Значительное увеличение интенсивности полосы при 3350 см⁻¹ может быть связано с наличием адсорбированной воды и ростом количества гидроксильных групп (-OH) на поверхности угля [33], что, по-видимому, связано с гидролизом сложных эфиров и окислительных реакций, инициированных щелочью. Наличие данных изменений может усиливать способность биоугля к связыванию полярных молекул через водородные связи и ионный обмен.

Изменения в области 2930 и 2860 см⁻¹, где наблюдаются колебания C-H алкильных групп, указывают на деструкцию углеводородных цепей (-CH₂, -CH₃) под действием КОН. Это снижает гидрофобность поверхности, но компенсируется усилением ароматической составляющей. Увеличение интенсивности пика при 1600 см⁻¹, соответствующего ароматическим C=C связям, возможно свидетельствует о начале процесса графитизации углеродной матрицы [34], что может

быть связано с удалением кислородсодержащих функциональных групп и процессом деметилирования, катализируемых щелочью, за счет чего возможно повышение эффективности сорбции неполярных органических соединений (пестициды, углеводороды). Это согласуется с рассчитанной величиной О/С соотношения. Незначительные изменения в области 3100 см⁻¹ (ароматические C-H) свидетельствуют о сохранении базовой ароматической структуры, а слабые модификации пика при 1420 см⁻¹ (деформационные колебания C-H) могут быть связаны с частичным окислением метильных групп или перестройкой боковых цепей. Обработка КОН также активирует уголь, создавая микропоры за счет реакций с образованием и последующим вымыванием промежуточных соединений.

Адсорбция метиленового синего на исследуемом биоугле представляет собой сложный процесс и включает в себя физическое и химическое взаимодействия. Исходя из пористой структуры и размера пор, полученных в результате анализа поверхности биоугля, учитывая размер молекул метиленового синего, можно предположить, что адсорбция происходит за счёт заполнения пор [35]. Наличие гидроксильных и карбоксильных функциональных групп, выявленное ИК-Фурье спектроскопией, способствует адсорбции метиленового синего на поверхности биоугля посредством механизмов ван-дер-ваальсового и электростатического притяжения, а также водородных связей [36]. Хотя в большинстве своем биоуголь представляет собой аморфный углерод, предположительно могут наблюдаться π-π-взаимодействия между поверхностными группами биоугля и ароматическими фрагментами метиленового синего. Кроме того, наличие минеральных компонентов (K, Ca, Mg) по данным элементного анализа, позволяет предположить возможность ионного обмена катионов с метиленовым синим.

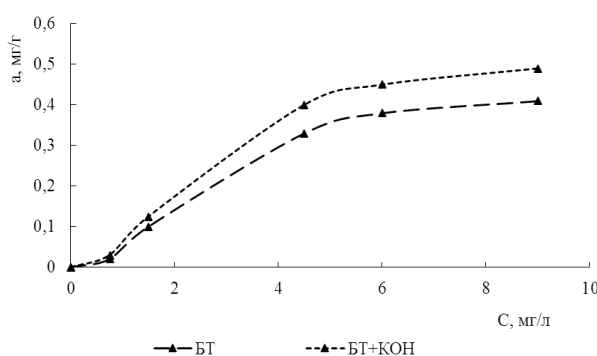


Рис. 2. Изотермы сорбции красителя метиленового синего исследуемыми образцами
Fig. 2. Isotherms of methylene blue dye sorption by the studied samples

Таблица 4. Параметры уравнения моделей адсорбции Ленгмюра и Фрейндлиха
Table 4. Parameters of the equation of the Langmuir and Freundlich adsorption models

Образец	Модель Ленгмюра			Модель Френдлиха		
	Ам, мг/г	K_L	R^2	K_F	$1/n$	R^2
БТ	0.67	0.19	0.98	0.025	1.77	0.93
БТ+КОН	0.83	0.15	0.99	0.1	0.93	0.94

Изучены изотермы сорбции метиленового синего образцами исходного и модифицированного биоугля (рис.2).

При концентрации метиленового синего в растворе (0.75 мг/дм^3) установлен плавный подъем кривой для обоих образцов и рост величины адсорбции, достигающий максимального значения при концентрации 6 мг/дм^3 , что обусловлено сильным взаимодействием адсорбата с поверхностью адсорбента. С ростом концентрации кривая постепенно выходит на плато, что свидетельствует о насыщении поверхности и прекращении процесса связывания метиленового синего. Форма полученных изотерм позволяет предположить, что сорбция красителя ограничивается образованием монослоя. МС адсорбируется на активных центрах углеродной поверхности как кислотного, так и основного характера.

Проведено сравнительное исследование применимости адсорбционных моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для описания экспериментальных изотерм адсорбции. Рассчитаны параметры изотерм Ленгмюра и Фрейндлиха (табл. 4).

Процесс адсорбции метиленового синего биоуглями адекватно описывается

уравнением Ленгмюра ($R^2=0.99$), коэффициент корреляции применимости при использовании модели Френдлиха $R^2=0.93$. Максимальные значения сорбционной емкости, полученные при использовании модели Ленгмюра, свидетельствуют, что образец биоугля, модифицированный КОН, более эффективен. Согласно [37] при $K_L < 1$ процесс сорбции будет протекать на обоих сорбентах.

Принимая во внимание модель Фрейндлиха, K_F является относительным показателем сорбционной емкости, и значения подтверждают, что модифицированный биоуголь имеет большую сорбционную емкость ($K_F=0.1$), параметр $1/n$ указывает на энергию или интенсивность реакции, а также на вероятность ее протекания и емкость системы адсорбент/адсорбат. На основании расчетов установлено, что значения $1/n < 1$ для модифицированного раствором щелочи образца, что также (аналогично параметрам K_L) свидетельствует о возможности сорбции метиленового синего из сточных вод.

Заключение

Установлены физико-химические и поверхностные характеристики биоугля

на основе опилок древесины тополя Воронежский гигант ЭС 38. Модификация биоугля раствором 2 М КОН способствует возрастанию удельной поверхности и пористости. Для модифицированного образца повышается влажность и плотность. Методом ИК- спектроскопии установлено, что щелочная обработка биоугля увеличивает количество гидроксильных групп на его поверхности. Вероятно, это происходит из-за гидролиза сложных эфиров и окислительных реакций, инициированных щелочью. Модификация угля приводит к усилению его способности к связыванию полярных молекул через водородные связи и ионный обмен. Форма изотерм для обоих образцов идентична, наблюдается плавный

подъем кривой при повышении концентрации раствора. Процесс адсорбции с большей вероятностью описывается моделью Ленгмюра. Модифицированный щелочью образец биоугля показывает большую сорбционную способность в отношении метиленового синего, которая сопоставима с величинами, полученными на углях из опилок березы и сосны.

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/References

1. Selmi, T.; Sanchez-Sanchez, A.; Gadonneix, P.; Jagiello, J.; Seen, M.; Sammouda, H.; Celzard, A.; Fierro, V. *Industrial Crops and Products*. 2018; 115: 146-157.
2. Silvia A Torrellas, Araceli R Rodriguez, Gabriel O Escudero, José María G Martín, Juan G Rodriguez. *Journal of environmental science and health. Part A, Toxic/hazardous substances & environmental engineering*. 2015; 50(12): 1241-8. <https://doi.org/10.1080/10934529.2015.1055149>
3. Chen B, Chen Z. *Chemosphere*. 2009; 76(1): 127-133.
4. Biochar for environmental management: science and technology. Routledge, 2015, 976 p.
5. Lehmann J., Rillig M.C., Thies J., *Soil Biology and Biochemistry*. 2011; 43(9): 1812-1836.
6. Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I. *Soil Research*. 2008; 45(8): 629-634.
7. Armashova-Telnik G.S. GRisk: Resources, Information, Supply, Competition. 2022; 3: 31-40.
8. Chen B, Chen Z, Lv S. *Bioresource Technology*. 2011; 102(2): 716-723.
9. Fang C., Zhang, Li P. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014; 11(9): 9217-9237.
10. Kaetzl K., Lübken M., Nettmann E., Krimmler S., Wichern M. *Scientific Reports*. 2020; 10: 1229.
11. Joyce S.C., Suzanne B., Ted M.K., Joseph M., Cli T.J., Brad J. *Chemosphere* 2017; 170: 216-224.
12. Yang W.; Wang Z.; Song S.; Han J.; Chen H.; Wang X.; Sun R.; Cheng J. *The Marine Pollution Bulletin*. 2019; 149: 110586.
13. Park, J.-H.; Wang, J.J.; Meng, Y.; Wei, Z.; DeLaune, R.D.; Seo, D.-C. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2019; 572: 274-282.
14. Mu Y, Du H, He W, Ma H. *Diamond and Related Materials*. 2022; 121: 108795. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2021.108795>
15. Zhang Z, Xu L, Liu Y, Feng R, Zou T. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2021; 315: 110904. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2021.110904>
16. Salman J.M., Njoku V.O., Hameed B.H. *Chemical Engineering Journal*. 2011; 174(1): 41-48. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.026>
17. Tomina E.V., Khodosova N.A., Nguyen A.T., Manukovskaya V.E., Nguyen H.H. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2024; 24(1): 44-55 <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2024.24/12020>
18. Bovsun M.A., Nesterova O.V., Semal V.A. In book: *Soils and the Noosphere*. 2019; 154-163. <https://doi.org/10.24866/7444-4707-6/154-163>
19. Downie A. Biochar production and use: environmental risks and rewards. The University of New South Wales, 2011; 308 p.
20. Tomina E.V., Khodosova N.A., Manukovskaya V.E., Lukin A.N., Korchagina A.Yu. *Sorbtsionnye I Khromatograficheskie Protssesy*. 2023; 23(3): 384-394. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11318>

21. Khodosova N., Tomina E., Manukovskaya V., Baranova P. *BIO Web of Conferences*. 2024; 145: 03004.
22. GOST 4453-74 Active charcoal brightening wood powder. Moscow. 1993. <http://gost.gtsever.ru/Data/414/41448.pdf> (In Russ.)
23. Romanchenko S.B., Trubicin A.A., Kubrin S.S. *BULLETIN of the Scientific Center for Work Safety in the Coal Industry*. 2020; 1: 6-14.
24. Enaïme G.; Ennaciri K.; Ounas A.; Baçaoui A.; Seen M.; Selmi T.; Yaacoubi A. *Journal of Materials and Environmental Science*. 2017; 8: 4125-4137.
25. Cazetta, A.L.; Vargas, A.M.M.; Nogami, E.M.; Kunita, M.H.; Guilherme, M.R.; Martins, A.C.; Silva, T.L.; Moraes, J.C.G.; Almeida, V.C. *Chemical Engineering Journal*. 2011; 174: 117-125.
26. Shen Y.; Zhang N. *Bioresource Technology*. 2019; 282: 294-300.
27. Kucherenko V.A., Shendrik T.G., Khabarova T.V., Tamarkina Yu.V. *Journal of Siberian Federal University. Chemistry*. 2009; 3(2): 223-231.
28. Qin X. *Arabian Journal of Chemistry*. 2023; 16: 104913
29. Di Vincenzo A.A. *Molecules*. 2025; 30(5): 1048.
30. Kelm M.A.P. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019; 26: 28558-28573.
31. Mao Y. *Biochar*. 2023; 5(1): 70.
32. Zhao Y., Qi K., Pan J. *Desalination and Water Treatment*. 2023; 303: 236-244.
33. Tezcan Un U., Ates F. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019; 16: 899-908.
34. Akpomie K. G., Conradie J. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024; 14(1): 539-551.
35. Gupta V. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020; 8: 24-33.
36. Zhang P., Zhang X., Liu F. *Chinese Journal of Pesticide Science*. 2025; 27(2): 233-247.
37. Hameed, B.H., Ahmad, A.L., Latiff, K.N.A. *Dyes Pigments*. 2007; 75(1): 143-149.

Информация об авторах / Information about the authors

Н.А. Ходосова – к.х.н., доцент кафедры химии и биотехнологии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация, nhodosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2809-717X>

К.В. Жужукин – к.т.н., ст. преподаватель кафедры химии и биотехнологии, Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация, kinkon18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

Е.В. Томина – д.х.н., зав. кафедрой химии и биотехнологии, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация; доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, tomina-e-v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

В.В. Родаев – к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и наноматериалы», Тамбовский государственный университет им. Г.Р. Державина, Тамбов, Российская Федерация, rodaev1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3082-6244>

В.Ф. Кострюков – д. х. н., доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Российская Федерация, vc@chem.vsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5753-5653>

N.A. Khodosova – Ph.D (chemistry), Associate Professor at Chemistry and Biotechnology department of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, nhodosova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2809-717X>

K.V. Zhuzhukin – Ph.D, Senior Lecturer at Chemistry and Biotechnology department of the Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation, kinkon18@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7093-3274>

E.V. Tomina – DSc in Chemistry, Head of the Department of Chemistry and Biotechnology, Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russian Federation; associate professor of the Department of Materials Science and Nanosystem Industry, Voronezh state University, Voronezh, Russian Federation, tomina-e-v@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5222-0756>

V.V. Rodaev – Ph.D, Leading Researcher at the Research Institute of Nanotechnology and Nanomaterials, Tambov State University named after G.R. Derzhavin, Tambov, Russian Federation, rodaev1980@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3082-6244>

V.F. Kostryukov – DSc in Chemistry, associate professor of the Department of Materials Science and Nanosystem Industry, Voronezh state University, Voronezh, Russian Federation, vc@chem.vsu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5753-5653>

Статья поступила в редакцию 31.05.2025; одобрена после рецензирования 01.09.2025; принята к публикации 03.09.2025.

The article was submitted 31.05.2025; approved after reviewing 01.09.2025; accepted for publication 03.09.2025.