



## ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 544.723

doi: 10.17308/sorpchrom.2023.23/11693

### Сорбция метиленового оранжевого на биоуглеродном сорбенте, полученном пиролизом осадка сточных вод

Елена Викторовна Томина<sup>1,2✉</sup>, Ирина Сергеевна Чередниченко<sup>2</sup>,  
Константин Викторович Жужукин<sup>1</sup>, Алексей Алексеевич Самсонов<sup>2</sup>,  
Нгуен Ань Тьен<sup>3</sup>, Во Куанг Май<sup>4</sup>, Александр Иванович Третьяков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия, tomina-e-v@yandex.ru✉

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

<sup>3</sup>Педагогический университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам

<sup>4</sup>Университет Сайгона, Хошимин, Вьетнам

**Аннотация.** Загрязнение водных ресурсов, ухудшение качества воздуха и воды является быстро растущей проблемой, напрямую связанной с образованием сточных вод и накоплением значительного количества осадка сточных вод (ОСВ). Одним из методов утилизации ОСВ является их пиролитическая переработка в биоугольные адсорбенты для очистки от различных загрязнителей. Тип адсорбента и его свойства играют ключевую роль в эффективности процесса очистки, что объясняет актуальность поиска альтернативных материалов для процессов водоподготовки.

Целью работы является создание в процессе пиролиза осадка сточных вод биоуглеродного сорбента и определение его сорбционной способности в отношении красителя метиленового оранжевого.

Для получения образцов биоуглеродного сорбента высушенные и измельченные образцы осадков сточных вод подвергали воздействию температуры 500°C в течение 1.5 часов в вакуумной камере со скоростью нагрева до данной температуры 5°C/мин. Элементный анализ полученного сорбента позволил установить снижение содержания углерода, кислорода, серы: для С – на 2.50 ат.%, для О – на 9.91 ат.%, для S – на 0.4 ат.% относительно ОСВ.

Растровая электронная микроскопия подтверждает значительное уменьшение размера частиц биоугля по сравнению с исходным образцом ОСВ. В исходном образце ОСВ после этапа пробоподготовки дисперсия размеров частиц составляла 10-70 мкм, а после пиролиза осадка дисперсия уменьшается до интервала 10-45 мкм. Рассчитан процент выхода биоугля, составляющий 42% от массы исходных ОСВ и проведены исследования по сорбции метиленового оранжевого. Сорбционная емкость биоугля в отношении анионного красителя метиленового оранжевого через 120 мин сорбции составляет 4.9 мг/г, степень очистки раствора достигает 82%. Кинетика сорбции красителя корректно описывается уравнением псевдо-второго порядка и указывает на полимолекулярный характер сорбции.

**Ключевые слова:** осадок сточных вод, пиролиз, биоуголь, сорбция.

**Благодарности:** исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>

**Для цитирования:** Томина Е.В., Чередниченко И.С., Жужукин К.В., Самсонов А.А., Нгуен Ань Тьен, Во Куанг Май, Третьяков А.И. Сорбция метиленового оранжевого на биоуглеродном сорбенте, полученном пиролизом осадка сточных вод // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2023. Т. 23, № 5. С. 753-761. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11693>



Original article

## Sorption of methylene orange on biocarbon sorbent, obtained by pyrolysis of wastewater sludge

Elena V. Tomina<sup>1,2✉</sup>, Irina S. Cherednichenko<sup>2</sup>, Konstantin V. Zhuzhukin<sup>1</sup>,  
Alexey A. Samsonov<sup>2</sup>, Nguyen Anh Tien<sup>3</sup>, Vo Quang Mai<sup>4</sup>, Alexander I. Tretyakov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State University of Forestry and Technologies Named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia, tomina-e-v@yandex.ru✉

<sup>2</sup>Voronezh State University, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>Ho Chi Minh University of Education, Ho Chi Minh City, Vietnam

<sup>4</sup>Sai Gon University, Ho Chi Minh City, Vietnam

**Abstract.** Water pollution and deterioration of air and water quality is a rapidly growing problem directly related to the generation of waste water and the accumulation of significant amounts of wastewater sludge (WWS). One of the methods for recycling WWS is their pyrolytic processing into biochar adsorbents for purification from various pollutants. The type of adsorbent and its properties play a key role in the efficiency of the purification process, which explains the relevance of the search for alternative materials for water treatment processes.

The purpose of the study was to create a biocarbon sorbent during the pyrolysis of wastewater sludge and determine its sorption capacity for the methylene orange dye. To obtain samples of biocarbon sorbent, dried and crushed samples of wastewater sludge were exposed to a temperature of 500 °C for 1.5 hours in a vacuum chamber with a heating rate to a given temperature of 5°C/min. Elemental analysis of the resulting sorbent allowed to establish a decrease in the content of carbon, oxygen, and sulphur: for C by 2.50 at.%, for O by 9.91 at.%, for S by 0.4 at.%, relative to WWS.

Scanning electron microscopy confirmed a significant reduction in the particle size of biochar compared to the original WWS sample. In the initial WWS sample, after the sample preparation stage, the dispersion of particle sizes was 10-70 µm, and after pyrolysis of the sediment, the dispersion decreased to the range of 10-45 µm. The percentage of biochar yield was calculated, constituting 42% of the weight of the initial WWS and studies on the sorption of methylene orange were carried out.

The sorption capacity of biochar for the anionic dye methylene orange after 120 min of sorption was 4.9 mg/g, the degree of solution purification reached 82%. The kinetics of dye sorption was correctly described by a pseudo-second-order equation and indicated the polymolecular nature of sorption.

**Keywords:** wastewater sludge, pyrolysis, biochar, sorption.

**Acknowledgments:** the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-23-00122, <https://rscf.ru/project/23-23-00122/>

**For citation:** Tomina E.V., Cherednichenko I.S., Zhuzhukin K.V., Samsonov A.A., Nguyen Anh Tien, Vo Quang Mai, Tretyakov A.I. Sorption of methylene orange on biocarbon sorbent, obtained by pyrolysis of wastewater sludge. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2023. 23(5): 753-761. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2023.23/11693>

### Введение

В связи с быстрыми темпами урбанизации и индустриализации очистка сточных вод становится все более актуальной проблемой. Осадки сточных вод (ОСВ) представляют собой отдельный вид отходов, образование которого в крупных городах составляет до 45% от общего количества отходов производства и потребления. Ежегодно в Российской Федерации после очистки сточных вод образуется в

среднем 3-3.5 млн. тонн осадков в пересчете на сухое вещество и сохраняется тенденция к ежегодному их увеличению [1]. Основным методом утилизации ОСВ в настоящее время является сохранение осадков на иловых картах или илонакопителях. Кроме того, в качестве методов утилизации ОСВ используются сжигание осадков и применение в землепользовании с целью ремедиации почв. С увеличением объёмов ОСВ требуется всё больше площадей для их размещения, а при воз-



растании стоимости земель это сопровождается постоянным ростом затрат на эксплуатацию и обслуживание мест складирования. Многолетнее хранение осадков сточных вод на иловых картах несет возрастающие экологические риски загрязнения поверхностных и подземных вод, почв, растительности. Осадки сточных вод имеют в своем составе как полезные компоненты, такие как органическое вещество, микроэлементы и питательные вещества для растений N, P и K, так и органические загрязнители, патогенные микроорганизмы и тяжелые металлы [2]. Поэтому сжигание ОСВ сопровождается образованием вторичных загрязняющих веществ (выхлопных газов, сажи, диоксинов и т.д.). Землепользование сопряжено с риском попадания токсичных и вредных загрязняющих веществ в почву, грунтовые воды и пищевую цепь, что ставит под угрозу окружающую среду и безопасность человека [3-6]. Таким образом, ОСВ обладают двойственными характеристиками: пригодностью для вторичной переработки и экологическим риском.

В последнее время растет интерес к пиролизу ОСВ как методу производства биоугля. Пиролиз является эффективным и безопасным способом обработки осадка с использованием термохимических методов [7,8]. Осадочный биоуголь широко используется для удобрения почвы, нейтрализации кислот, связывания углерода, фиксации тяжелых металлов в почве и адсорбции загрязняющих веществ [9,10], из-за высокого содержания органического вещества, высокой ароматизации, хорошо развитого порового пространства и огромной удельной площади. Кроме того, биоуголь из осадка, вносимый в почву, может улучшить значение рН почвы, количество катионообмена, способность удерживать воду и плодородие [11]. Пиролиз осадка имеет большие преимущества перед сжиганием в снижении загрязнения тяжелыми металлами при более низкой температуре (600°C) [12]. Минеральные соли и гидроксиды

металлов обычно превращаются в более стабилизированные оксиды или сульфиды металлов, которые были иммобилизованы в биоугле [13,14].

Высокая доступность сырья для производства биоугля, простота методов получения и уникальные физико-химические свойства биоугля делают его привлекательным материалом для изготовления сорбентов, в том числе и композитных, обладающих дополнительно магнитными или фотокаталитическими свойствами.

Целью работы является создание в процессе пиролиза осадка сточных вод биоуглеродного сорбента и определение его сорбционной способности в отношении красителя метиленового оранжевого.

### Экспериментальная часть

Для получения образцов биоуглеродного сорбента в работе использованы образцы осадков сточных вод, предварительно обезвоженные до влажности 27% при температуре 105°C до постоянной массы. Образцы биоугля синтезировали пиролитическим методом аналогично режиму пиролиза в статье [15]. Пиролиз проводили в вакуумной установке Angstrom Engineering Covar II. Начальную откачку атмосферного воздуха осуществляли форвакуумным насосом, а последующее глубокое вакуумирование ( $p_{\text{ост}} \sim 10^{-6}$  Торр) – турбомолекулярным насосом Varian Turbo 301.

Обезвоженные образцы ОСВ механически измельчали и порошок дополнительно сушили в вакуумной установке при атмосферном давлении и  $T=80^\circ\text{C}$  в течение 1.5 часов. После сушки, порошок охлаждали до комнатной температуры и увеличивали температуру в вакуумной камере от 25 до 500 °C в течение 1.5 часов, скорость нагрева камеры составлял 5°C/мин. При достижении 500 °C нагрев останавливали и отжигали образцы в течение 1.5 часа. Схематичное описание процесса представлено на рисунке 1.

Выход биоугля рассчитывали с использованием массы ОСВ и твердого

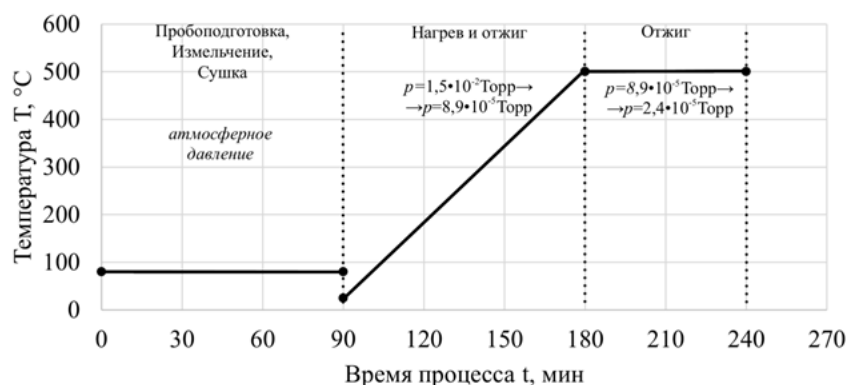


Рис. 1. Схематичное описание процесса.  
 Fig.1. Schematic description of the process

продукта (биоугля). Значения рН раствора МО, осадка сточных вод и биоугля (образец/вода, соотношение 1:20) были протестированы с использованием рН-метра (PHS-3С, Китай).

Количественный элементный анализ, определение морфологии поверхности образцов проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ, JSM-6380LV JEOL с системой микроанализа INCA 250). Гистограмму распределения частиц по размерам строили с использованием программы «ImageJ», версия 1.53к.

Сорбцию биоугля из осадков сточных вод исследовали в отношении красителя метиленового оранжевого. Для этого готовили реакционный раствор, содержащий 0.0100 мг/см<sup>3</sup> метиленового оранжевого. Уровень рН раствора – 4.5 поддерживали постоянным с помощью ацетатного буферного раствора. Затем отбирали аликвоты реакционного раствора объемом 15.00 см<sup>3</sup> и добавляли к ним 0.100 г биоуглеродного сорбента. Концентрацию красителя определяли на спектрофотометре ПЭ-5400УФ.

### Обсуждение результатов

Согласно данным [16] повышение температуры пиролиза осадков сточных вод выше 500°C приводит к значительному уменьшению содержания легких элементов, таких как углерод, кислород, азот, сера. В данной работе пиролиз осуществ-

лялся при 500°C, тем не менее содержание углерода, кислорода, серы в биоугле снижается: для С – на 2.50 ат.%, для О – на 9.91 ат.%, для S – на 0.4 ат.%. Это свидетельствует о выделении летучих продуктов пиролиза ОСВ в виде СО<sub>2</sub>, СО, SO<sub>2</sub>. Это подтверждает и выход биоугля, составляющий 42% от массы исходных ОСВ, хотя, конечно, большая потеря массы исходного образца осуществляется за счет испарения воды при сушке на первом этапе пробоподготовки к пиролизу. Элементный состав сточных вод и биоугля представлен на рисунке 2.

Согласно [17-19] молярное отношение О/С должно быть меньше 0.4, чтобы пиролизованная масса считалась биоуглем. Для исходного ОСВ отношение О/С составляет 0.51, тогда как для биоугля – 0.35, что указывает на снижение гидрофильности и полярности биоугля по сравнению с осадком, а также на уменьшение количества кислородных функциональных групп в биоугле. Как правило, увеличение гидрофобности сорбента свидетельствует о возрастании сродства к органическим загрязнителям сточных вод [20]. Неорганические составляющие осадка сточных вод представлены SiO<sub>2</sub>, алюмосиликатными соединениями кальция, содержат сульфаты, фосфаты, силикаты, карбонаты, что подтверждается и данными [21]. Наличие функциональных групп, содержащих серу (данные РЭМ), также повышает гидрофобность

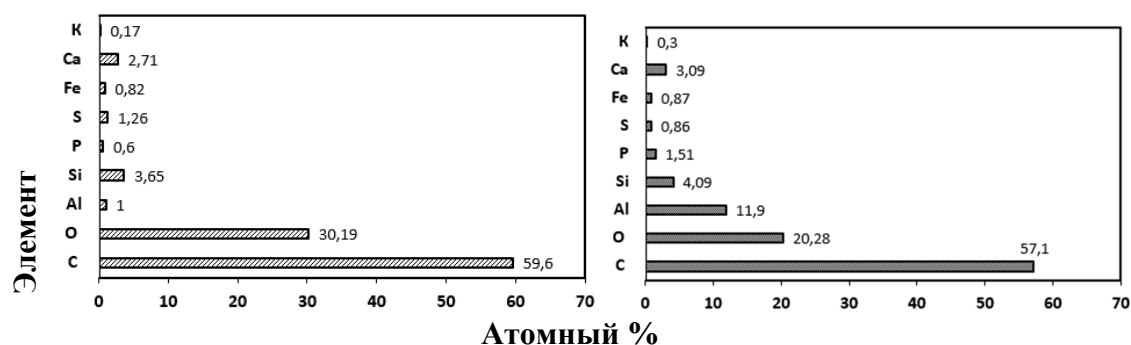


Рис. 2. Элементный состав осадка сточных вод (а) и биоугля (б), полученного пиролизом при 500°C  
 Fig. 2. Elemental composition of wastewater sludge (a) and biochar (b) obtained by pyrolysis at 500°C

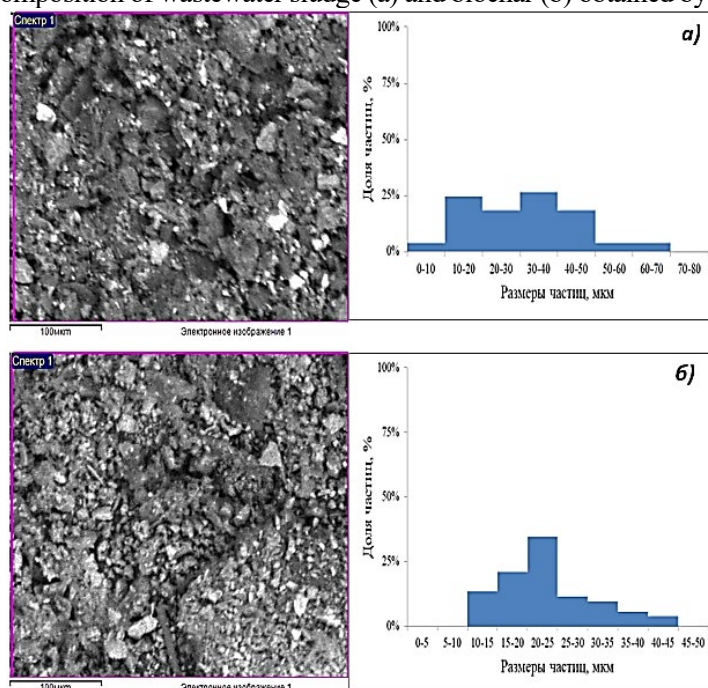


Рис. 3. РЭМ-изображения и гистограммы распределения частиц по размерам осадка сточных вод (а) и биоугля, полученного пиролизом ОСВ при 500°C (б).  
 Fig. 3. SEM images and histograms of particle size distribution of wastewater sludge (a) and biochar obtained by pyrolysis of WWS at 500°C (b).

биоугля, что отмечается и авторами [22, 23].

Растровая электронная микроскопия подтверждает значительное уменьшение размера частиц биоугля по сравнению с исходным образцом ОСВ, несмотря на его предварительное высушивание и механическое измельчение (рис. 3). В исходном образце ОСВ после этапа пробоподготовки дисперсия размеров частиц составляла 10-70 мкм, а преобладающая фракция находилась в интервале 10-50 мкм. После пиролиза осадка в образующемся биоугле дисперсия уменьшается

до интервала 10-45 мкм, а максимальная фракция лежит в диапазоне 10-25 мкм. Естественно предположить, что такое уменьшение размеров частиц биоугля будет сопровождаться и возрастанием порового пространства образцов.

Метиленовый оранжевый (МО) является синтетическим красителем из группы азокрасителей, проявляющим свойства слабого основания. На рис. 4 представлена кинетика сорбции МО на биоугле, полученном пиролизом в вакууме осадка сточных вод. Эффективность адсорбции красителя на

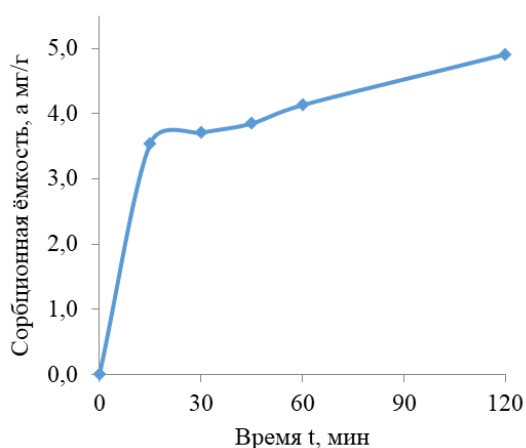


Рис. 4. Кинетика сорбции метиленового оранжевого на биоугле, полученном пиролизом ОСВ

Fig. 4. Kinetics of methylene orange sorption on biochar obtained by pyrolysis of WWS

поверхности сорбента зависит в основном от величины этой поверхности, природы и концентрации адсорбционных центров, а дифференцировать эти факторы в большинстве случаев достаточно затруднительно. Из рис. 5 видно, что адсорбция быстро протекает на начальной стадии процесса в первые 15 мин. К 45 мин времени сорбции происходит насыщение поверхности сорбента и можно говорить о формировании монослоя красителя. Сорбционная емкость составляет 3.85 мг/г. Дальнейшее плавное возрастание кинетической кривой сорбции указывает на формирование последующих адсорбционных слоев МО, поскольку строение молекулы метиленового оранжевого способствует образованию сорбат-сорбатных связей и полимолекулярной сорбции. Сорбционная емкость через 120 мин сорбции составляет 4.9 мг/г. Кинетика адсорбции МО на биоугле из ОСВ корректно описывается уравнением псевдо-второго порядка, что обычно характерно для химической сорбции [24], константа скорости составляет  $0.03 \text{ г} \cdot \text{мг}^{-1} \cdot \text{мин}^{-1}$ .

Степень очистки раствора от МО при формировании монослоя составляет 64%, а после 120 мин сорбции возрастает до 82% (рис. 5).

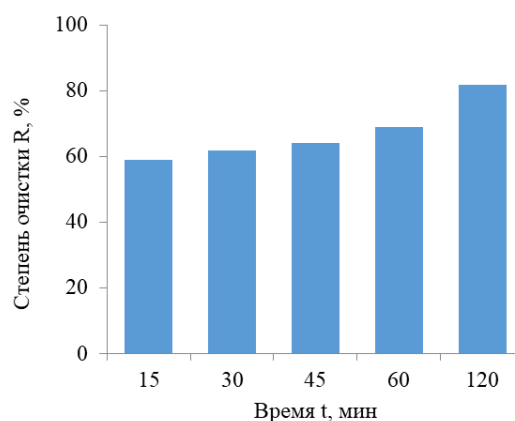


Рис.5. Степень извлечения сорбата (R, %) в зависимости от времени сорбции

Fig.5. The degree of sorbate extraction (R, %) depending on the sorption time

Эффективность биоуглеродного сорбента существенно зависит от pH растворов сорбатов. Как правило, значения pH могут способствовать либо препятствовать электростатическому взаимодействию между адсорбентом и адсорбатом за счет изменения поверхностного заряда адсорбента или путем влияния на ионизацию и осаждение сорбатов в водном растворе [25].

В данной работе pH раствора МО поддерживалось на уровне 4.5, что позволяет предположить протекание адсорбции анионного красителя через стадию протонирования поверхности биоугля за счет протонов из раствора. С другой стороны, pH исходных образцов осадков сточных вод находился в интервале 6.5-6.9, а полученный пиролизом биоуголь демонстрировал pH в диапазоне 7.1-7.4, что свидетельствует о снижении полярности поверхности сорбента, приводящей к усилению сорбции метиленового оранжевого.

### Заключение

Пиролизом осадка сточных вод в вакууме при остаточном давлении порядка  $10^{-6} \text{ Топр}$  получен биоуглеродный сорбент с преобладающей фракцией частиц в ин-



тервале 10-25 мкм и молярным отношением О/С, равным 0,35, что позволяет отнести его к биоуглю. Сорбционная емкость биоугля в отношении анионного красителя метиленового оранжевого через 120 мин сорбции составляет 4,9 мг/г, степень очистки раствора достигает до 82%. Кинетика сорбции красителя корректно описывается уравнением псевдо-

второго ордена и указывает на полимолекулярный характер сорбции.

### 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. Vekshin A.A., Rassoхina E.V., Dyagelev M.Yu., Isakov V.G. Szhiganie osadka kak bezotходny`j sposоb utilizatsii osadka stоchny`x vod. *Privolzhskij nauchny`j zhurnal*, 2023; 2: 100-107.
2. Shi Y. et al. Synergetic conditioning of sewage sludge via Fe<sup>2+</sup>/persulfate and skeleton builder: effect on sludge characteristics and dewaterability. *Chemical Engineering Journal*. 2015; 270: 572-581. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.122>
3. Dichtl N., Rogge S., Bauerfeld K. Novel strategies in sewage sludge treatment. *CLEAN-Soil, Air, Water*. 2007; 35(5): 473-479.
4. Nascimento A.L. Chemical attributes of sewage sludges: Relationships to sources and treatments, and implications for sludge usage in agriculture. *Journal of Cleaner Production*. 2020; 258: 120746. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120746>
5. Schlich K. Hazard assessment of a silver nanoparticle in soil applied via sewage sludge. *Environmental Sciences Europe*. 2013; 25(1): 1-14. <https://doi.org/10.1186/2190-4715-25-17>
6. Lasaridi K.E. The evaluation of hazards to man and the environment during the composting of sewage sludge. *Sustainability*. 2018; 10(8): 2618. <https://doi.org/10.3390/su10082618>
7. Zaker A. Microwave-assisted pyrolysis of sewage sludge: A review. *Fuel processing technology*. 2019; 187: 84-104. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.12.011>
8. Racek J. et al. Biochar-recovery material from pyrolysis of sewage sludge: a review. *Waste and biomass valorization*. 2020; 11: 3677-3709.
9. Lwin C.S. Application of soil amendments to contaminated soils for heavy metal immobilization and improved soil quality – A critical review. *Soil science and plant nutrition*. 2018; 64(2): 156-167. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1440938>
10. Wang Y., Li H., Lin S. Advances in the Study of Heavy Metal Adsorption from Water and Soil by Modified Biochar. *Water*. 2022; 14(23): 3894.
11. Shaaban M. A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of environmental management*. 2018; 228: 429-440. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.006>
12. Zhang X. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*. 2022; 26: 102288.
13. Udayanga W.D.C. Fate and distribution of heavy metals during thermal processing of sewage sludge. *Fuel*. 2018; 226: 721-744.
14. Hu Y. Characterization into environmentally persistent free radicals formed in incineration fly ash and pyrolysis biochar of sewage sludge and biomass. *Journal of Cleaner Production*. 2022; 373: 133666.
15. Aobo Geng, Lijie Xu, Lu Gan, Changtong Mei, Linjie Wang, Xingyu Fang,





Meirun Li, Mingzhu Pan, Shuguang Han, Juqing Cui Using wood flour waste to produce biochar as the support to enhance the visible-light photocatalytic performance of BiOBr for organic and inorganic contaminants removal. *Chemosphere*. 2020; 250: 1-7.

16. Yu G. In situ reforming of the volatile by char during sewage sludge pyrolysis. *Energy & Fuels*. 2016; 30(12): 10396-10403.

17. Schmidt, Hans Peter; Bucheli, Thomas; Kammann, Claudia; Glaser, Bruno; Abiven, Samuel; Leifeld, Jens (2016). European Biochar Certificate – Guidelines for a sustainable production of Biochar. Arbaz (CH): European Biochar Foundation (EBC). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>

18. Thomas S.C., Gale N. Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests*. 2015; 46(5-6): 931-946.

19. Rosas J.G. Assessment of sustainable biochar production for carbon abatement from vineyard residues. *Journal of analytical and applied pyrolysis*. 2015; 113: 239-247.

20. Hale S. E. et al. A synthesis of parameters related to the binding of neutral organic compounds to charcoal. *Chemosphere*. 2016; 144: 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.08.047>

21. Zhang X. Effects of pyrolysis temperature on biochar's characteristics and speciation and environmental risks of heavy metals in sewage sludge biochars. *Environmental Technology & Innovation*. 2022; 26: 102288. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102288>

22. Uchimiya M. Sorption of deisopropylatrazine on broiler litter biochars. *Journal of agricultural and food chemistry*. 2010; 58(23): 12350-12356. <https://doi.org/10.1021/jf102152q>

23. Ahmad M. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource technology*. 2012; 118: 536-544. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.042>

24. Shi Y.Y., Shan R., Yuan H.R. Effects and mechanisms of methyl orange removal from aqueous solutions by modified rice shell biochar. *Huan Jing ke Xue= Huanjing Kexue*. 2019; 40(6): 2783-2792. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201811227>

25. Yin G. Novel Fe-Mn binary oxide-biochar as an adsorbent for removing Cd (II) from aqueous solutions. *Chemical Engineering Journal*. 2020; 389: 124465.

### Информация об авторах / Information about the authors

**Е.В. Томина** – д.х.н., зав. кафедрой химии, Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Российская Федерация; доцент кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**И.С. Чередниченко** – магистр 2 года кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**К.В. Жужукин** – преподаватель кафедры химии, м.н.с. НИИ ИТЛК Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия; e-mail: [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru)

**А.А. Самсонов** – к.х.н., ведущий инженер кафедры материаловедения и индустрии наносистем, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

**E.V. Tomina** – DSc in Chemistry, Head of the Department of Chemistry, 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, Russia; e-mail: [tomina-e-v@yandex.ru](mailto:tomina-e-v@yandex.ru)

**I.S. Cherednichenko** – 2-year Master of Materials Science and Nanosystems Industry Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia, e-mail: [chrchrdn@gmail.com](mailto:chrchrdn@gmail.com)

**K.V. Zhuzhukin** – Lecturer, Department of Chemistry, Junior Researcher NII ITLC Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia; e-mail: [kinkon18@yandex.ru](mailto:kinkon18@yandex.ru)

**A.A. Samsonov** – PhD in Chemistry, leading engineer of the Department of Materials Science and Nanosystem Industry, Voronezh state University, Voronezh, Russia; e-mail: [samsonjr@mail.ru](mailto:samsonjr@mail.ru) <https://orcid.org/0000-0002-9338-815X>





**Нгуен Ань Тьен** – к.х.н., доцент, заведующий кафедрой неорганической химии, Педагогический университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам

**Во Куанг Май** – к.х.н., доцент, Факультет естественных наук, Университет Сайгона. ул. Ан Зьонг-Вьонг, Хошимин, Вьетнам

**А.И. Третьяков** – к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, Воронеж, Россия

**Nguyen Anh Tien** – Ph.D. Sc., Associate Professor, Head of the Department of Inorganic Chemistry, Ho Chi Minh City University of Education, Ho Chi Minh City, Vietnam e-mail: [tienna@hcmue.edu.vn](mailto:tienna@hcmue.edu.vn).  
iD: 0000-0002-4396-0349

**Vo Quang Mai** – PhD, Associate Professor, Faculty of Natural Sciences Education, Sai Gon University, Ho Chi Minh City, Vietnam, e-mail: [voquangmai@sgu.edu.vn](mailto:voquangmai@sgu.edu.vn)

**A.I. Tretyakov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines G.F. Morozov, Voronezh, Russia; e-mail: [tretyakov-ai@mail.ru](mailto:tretyakov-ai@mail.ru)

*Статья поступила в редакцию 18.07.2023; одобрена после рецензирования 08.08.2023; принята к публикации 16.08.2023.*

*The article was submitted 18.07.2023; approved after reviewing 08.08.2023; accepted for publication 16.08.2023.*