

Оригинальная статья

УДК 628.33

DOI: 10.57070/2304-4497-2026-3(57)-54-64

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОРБЦИОННОЙ ДООЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНОГО СОРБЕНТА ИЗ УГЛЯ МАРКИ Ж**

© 2026 г. Г. Р. Монгуш, Х. Б. Манзырыкчы, Т. В. Сапелкина

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (Россия, 667007, Республика Тыва, Кызыл, ул. Интернациональная, 117А)

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена неудовлетворительным техническим состоянием очистных сооружений г. Кызыл, недостаточной мощностью существующих систем и нестабильностью биологической очистки по ряду показателей (фосфаты, хром, фенолы), что создает угрозу загрязнения водных объектов. Перспективным решением без кардинальной реконструкции схемы является внедрение сорбционной доочистки с использованием отечественных углеродных материалов. Исследован углеродный сорбент, синтезированный щелочной активацией (KOH, 800 °C) каменного угля марки Ж Элегестского месторождения. Методами низкотемпературной азотной порометрии (БЭТ, t-plot, ВЖН, DFT) установлена бипористая иерархическая структура с аномально высокой удельной поверхностью (1967,94 м²/г), преобладанием мезопор (2 – 4 нм) и общим объемом пор 1,0647 см³/г. В статических условиях (доза 3,0 г/л, 60 мин) проведена доочистка реальных сточных вод левобережных очистных сооружений г. Кызыл после биологической ступени. Установлено, что сорбционный этап нивелирует недостатки биоочистки, обеспечивая высокую эффективность извлечения АПАВ (до 97,0 %), фенолов (81,7 %), марганца (83,3 %) и взвешенных веществ (71,9 %). По взвешенным веществам и марганцу остаточные концентрации приближаются к нормативам рыбохозяйственных водоемов. При этом выявлены селективные ограничения: умеренная эффективность в отношении нитратов (33,0 %) и крайне низкая – в отношении фосфатов (9,4 %), что обусловлено анионной природой данных соединений и отсутствием специфических ионообменных центров на поверхности сорбента. Это указывает на необходимость комбинирования сорбционной доочистки с другими технологическими методами для удаления биогенных элементов. Полученные результаты подтверждают перспективность использования тувинских углей для импортозамещения дорогостоящих сорбентов в удаленных регионах Сибири, а также позволяют обосновать технологические решения по совершенствованию существующей схемы очистки сточных вод.

Ключевые слова: углеродный сорбент, щелочная активация, каменный уголь марки Ж, доочистка сточных вод, сорбция, биологическая очистка, Элегестское месторождение

Благодарности: авторы выражают благодарность начальнику лаборатории ООО «Водоканал-Сервис» Марине Яковлевне Михальченко за предоставление анализов сточных вод.

Финансирование. Публикация подготовлена в рамках выполнения государственного задания ТувИКОПР СО РАН по проекту 1023033100464-7-1.5.1.

Для цитирования: Монгуш Г.Р., Манзырыкчы Х.Б., Сапелкина Т.В. Перспективы сорбционной доочистки сточных вод с использованием углеродного сорбента из угля марки Ж. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2026;3(57):54–64. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-54-64](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-54-64)

Original article

**PROSPECTS FOR SORPTION AFTERTREATMENT OF WASTEWATER USING
CARBON SORBENT FROM GRADE F COAL**

© 2026 G. R. Mongush, K. B. Manzyrykchy, T. V. Sapelkina

Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian branch of Russian Academy of Sciences
(117A st. Internatsionalnaya, Kyzyl, Republic of Tuva, 667007, Russian Federation)

Abstract. The relevance of the study is due to the unsatisfactory technical condition of the treatment facilities in Kyzyl, insufficient capacity of the existing systems and instability of biological treatment for a number of indicators (phosphates, chromium, phenols), which creates a threat of pollution of water bodies. A promising solution without a radical reconstruction of the scheme is the introduction of sorption post-treatment using domestic carbon materials. In this work, a carbon sorbent synthesized by alkaline activation (KOH, 800 °C) of grade F coal from the Eleget deposit was studied. Using low-temperature nitrogen porosimetry methods (BET, t-plot, BJH, DFT), a biporous hierarchical structure with an abnormally high specific surface area (1967.94 m²/g), a predominance of mesopores (2–4 nm) and a total pore volume of 1.0647 cm³/g was established. Post-treatment of real wastewater from the left-bank treatment plant in Kyzyl was carried out under static conditions (dose 3.0 g/L, 60 min) after the biological stage. It was found that the sorption stage offsets the deficiencies of biological treatment, ensuring high efficiency of extraction of anionic surfactants (up to 97.0 %), phenols (81.7 %), manganese (83.3 %) and suspended solids (71.9 %). For suspended solids and manganese, residual concentrations approach the standards for fishery waters. At the same time, selective limitations were identified: moderate efficiency with respect to nitrates (33.0 %) and extremely low efficiency with respect to phosphates (9.4 %), which is due to the anionic nature of these compounds and the absence of specific ion-exchange centers on the sorbent surface. This indicates the need to combine sorption post-treatment with other technological methods for removing biogenic elements. The obtained results confirm the potential of using Tuvan coals to replace expensive sorbents in remote regions of Siberia and also allow us to justify technological solutions for improving existing wastewater treatment systems.

Keywords: carbon sorbent, alkaline activation, grade F coal, wastewater post-treatment, sorption, biological treatment, Eleget deposit

Acknowledgments: the authors express their gratitude to Marina Yakovlevna Mikhilchenko, head of the laboratory of Vodoka-nal-Service LLC, for providing wastewater analyses.

Funding. This publication was prepared within the framework of the state assignment of the TuvIENR SB RAS under project 1023033100464-7-1.5.1.

For citation: Mongush G.R., Manzyrykchy H.B., Sapelkina T.V. Prospects for Sorption Post-treatment of Wastewater Using a Carbon Sorbent Made from Grade F Coal. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2026;3(57):54–64. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3\(57\)-54-64](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2026-3(57)-54-64)

Введение

Современные системы очистки сточных вод как в России, так и за рубежом сталкиваются с рядом системных вызовов, во многом схожих по своей природе, но различающихся по масштабу и подходам к решению очистки хозяйственно-бытовых стоков [1 – 3]. Ключевой проблемой является старение инфраструктуры: множество очистных сооружений, построенных несколько десятилетий назад, к настоящему времени устарели, имеют недостаточную мощность существующих систем [1; 2] и поэтому не справляются с возросшими нагрузками, чтобы обеспечить качественную очистку сточных вод [1]. Также

проблемой является несовершенство системы нормирования и мониторинга для целого ряда опасных загрязнителей, например, для некоторых стойких органических соединений, для которых отсутствуют утвержденные предельно допустимые концентрации, что делает их контроль невозможным [3]. К нерешенным проблемам относятся вопросы обработки и утилизации осадков сточных вод [1 – 4], что в совокупности приводит к загрязнению почв и водных объектов, создавая угрозу для окружающей среды [5].

В последние годы в России и за рубежом активно внедряются новые способы очистки сточных вод, которые уже доказали свою эффектив-

ность в промышленной эксплуатации с применением энергоэффективных систем аэрации и автоматизированного управления установками глубокого удаления биогенных элементов [6]. К числу технологий, обеспечивающих высокое качество фильтрации и позволяющих существенно повысить степень удаления взвешенных веществ и микроорганизмов, относятся мембранные биореакторы (MBR), а также озонирование в сочетании с биологической фильтрацией [7 – 9].

Наиболее перспективным направлением, сочетающим высокую эффективность с относительно низкими эксплуатационными затратами, являются сорбционные технологии с использованием угольных сорбентов. При этом активно разрабатываются варианты с гранулированными активными углями в фильтрах доочистки и с порошкообразными активными углями, вводимыми непосредственно в аэротенки или на этапе после вторичных отстойников. Подобные решения уже прошли успешные испытания на пилотных установках и показывают стабильное снижение химического потребления кислорода (ХПК) и индекса токсичности очищенных вод [8; 10].

Углеродные материалы, благодаря развитой пористой структуре и большой удельной поверхности, демонстрируют уникальную способность адсорбировать широкий спектр органических загрязнителей, включая остаточные концентрации трудноокисляемой органики, синтетические поверхностно-активные вещества и ряд других соединений, которые не удаляются на этапах биологической очистки [11; 12]. Особого внимания заслуживают разработки отечественных сорбентов из углеродсодержащего сырья (бурого и каменного угля, торфа, растительных отходов), которые позволяют улучшить процесс очистки сточных вод, в том числе для удаления фосфатов и других биогенных элементов [13].

В Республике Тыва очистные сооружения г. Кызыл являются ключевым элементом системы водоотведения с проектной мощностью 16,0 тыс. м³/сут. [14]. Действующая технологическая схема очистки сточных вод [14] включает в себя следующие этапы: механическую очистку с применением песколовок, радиальных отстойников и далее полную биологическую очистку воды в аэротенках [15]. Завершающим этапом является обеззараживание очищенных вод в электролизной установке, после чего очищенные воды сбрасываются в реку Енисей. В настоящее время очистные сооружения находятся в неудовлетворительном техническом состоянии, их производственных мощностей недостаточно для обеспечения надлежащего качества очистки сточных вод [16]. В связи с этим требуется полная модернизация очистных сооружений с тех-

ническим переоснащением и концептуальным пересмотром подходов к очистке сточных вод с внедрением инновационных технологий для обеспечения нормативных показателей [3; 6]. Внедрение сорбционной доочистки на очистных сооружениях г. Кызыл может стать эффективным решением без кардинальной перестройки существующей технологической схемы.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования углеродного сорбента, полученного из каменного угля марки Ж Элегестского месторождения, для доочистки сточных вод очистных сооружений г. Кызыл и обоснование технологических решений по его применению для совершенствования существующей схемы очистки.

В качестве исходного сырья для получения углеродных сорбентов использовали пробы окисленного каменного угля марки Ж с Элегестского месторождения Улуг-Хемского угольного бассейна. Технические и элементные показатели рассматриваемого угля были подробно изучены в работе [17]. Установлено, что исследуемый уголь является малозольным, обладает высоким выходом летучих веществ и высокой теплотворной способностью; содержание общей серы не превышает 0,5 мас. %, что позволяет классифицировать его как низкосернистый. По элементному составу и атомным соотношениям образец характеризуется повышенным содержанием углерода и кислорода. Кроме того, в сравнении с другими тувинскими углями марок ГЖ и Ж исследуемый образец [17] показал более высокие значения удельной поверхности при активации и требовал меньшей концентрации щелочи для достижения сопоставимых результатов, что делает его предпочтительным для дальнейшего изучения. Выбор этого угля обусловлен его промышленной значимостью, доступностью и перспективностью в качестве прекурсора для синтеза пористых углеродных материалов методом химической активации. Полученные характеристики служат основой для выбора режимов щелочной активации и интерпретации свойств синтезированного сорбента в настоящей работе.

Методы и принципы исследования

Синтез проводили щелочной активацией: сырье измельчали до менее 0,2 мм, пропитывали 50 % КОН («х.ч.») при соотношении уголь : КОН = 1 : 3 (24 ч при комнатной температуре), сушили при 105 ± 5 °С. Карбонизацию проводили в муфельной печи в закрытых корундовых тиглях (нагрев 10 °С/мин до 800 °С, выдержка 1 ч); герметизация тиглей обеспечивала восстановительную атмосферу за счет газов, вы-

деляющихся при термическом разложении органической массы. Спекшийся продукт измельчали, промывали дистиллированной водой, обрабатывали 1 М HCl («х.ч.») для удаления силикатов, повторно отмывали до нейтрального pH, сушили при 105 ± 5 °C до постоянной массы и хранили в эксикаторе.

Текстурные параметры (удельная поверхность, объем и размер пор) определяли по изотермам низкотемпературной адсорбции-десорбции азота (77 K) на анализаторе ASAP 2020 (Micromeritics). Перед анализом образцы дегазировали при температуре 300 °C в вакууме в течение 4 ч. Обработку данных выполняли следующим образом: удельная поверхность ($S_{уд}$) рассчитана по модели БЭТ в интервале относительных давлений $P/P_0 = 0,05 - 0,30$; объем микропор – методом *t*-plot; объем и распределение мезопор – по модели *BJH* (десорбционная ветвь); суммарный объем пор определен при величине $P/P_0 \approx 0,99$. Методика является стандартной для углеродных материалов [12; 18].

Объектом исследования служили пробы сточных вод, отобранные на входе и выходе левобережных очистных сооружений г. Кызыл в соответствии с ГОСТ 31861 – 2012. Точки отбора указаны на принципиальной технологической схеме очистных сооружений (рис. 1).

Сорбционные испытания проводили в статическом режиме по методике [21] при следующих условиях: объем пробы 300 мл; доза сорбента 3,0 г/л (0,9 г на 300 мл); время контакта 60 мин; перемешивание на магнитной мешалке 150 ± 10 об/мин; температура 22 ± 2 °C; отделение сорбента фильтрацией через мембрану 0,45 мкм (Владипор). Установленная навеска сорбента 3,0 г/л обоснована предварительными опытами как обеспечивающая максимальное извлечение целевых компонентов при экономичном расходе материала [19], построение изотерм требует варьирования навесок, однако в настоящей работе использована оптимальная доза в области наибольшей эффективности.

Концентрации определяемых компонентов в исходных и очищенных пробах измеряли по аттестованным методикам ПНД Ф: взвешенные вещества – гравиметрически (весы 0,0001 г); нитрат-ион, фосфат-ион, хром (VI) – фотометрически на спектрофотометре ПЭ-5400УФ; АПАВ, цинк, фенолы и марганец – флуориметрически на флуориметре Флюорат-02-Панорама [20]. Все измерения выполняли в трехкратной повторности. Статистическую обработку проводили с расчетом среднего арифметического значения и доверительного интервала при вероятности $P = 0,95$. Погрешность измерений не превышала допустимых значений, установленных

соответствующими нормативными документами. Сорбционные испытания проводили по методикам [19; 21].

Основные результаты и их обсуждения

В табл. 1 представлены результаты исследования синтезированного углеродного сорбента из угля марки Ж Элегестского месторождения на анализаторе ASAP 2020 (Micromeritics).

Синтезированный образец углеродного сорбента демонстрирует уникальные адсорбционные свойства, что подтверждается комплексом взаимодополняющих методов низкотемпературной азотной порометрии (ASAP 2020). Ключевой особенностью материала является высокая удельная поверхность, достигнутая за счет жесткой щелочной активации: значение $S_{БЭТ}$ составляет 1967,94 м²/г, что в 1,5 – 2,0 раза превышает показатели типичных промышленных сорбентов (800 – 1200 м²/г). Высокая достоверность расчета подтверждается значением константы БЭТ $C = 107,85$ и коэффициентом корреляции $R^2 = 0,99997$, что указывает на энергетически однородную поверхность и сильное взаимодействие адсорбата с активными центрами (рис. 2, а).

Детальный анализ вклада различных типов пор, выполненный *t*-plot методом (рис. 2, б), выявляет выраженную мезо-макропористую природу сорбента. Вклад микропористой площади составляет менее 5 % от общей ($S_{micro} = 93,17$ м²/г) при крайне малом объеме микропор ($V_{micro} = 0,0275$ см³/г). Напротив, внешняя (мезо + макро) площадь достигает 1874,77 м²/г, что обуславливает преобладание транспортирующих и сорбционно-доступных каналов большего диаметра. Общий объем пор, рассчитанный при $P/P_0 \approx 0,99$, составляет 1,0647 см³/г, а средний диаметр пор по БЭТ – 2,16 нм.

Для углубленной оценки мезо- и микропористой составляющих применили методы *BJH* и *DFT*. Согласно распределению мезопор по площади (*BJH*, рис. 2, в), доминирующий вклад вносит фракция пор размером 2 – 4 нм с выраженным максимумом примерно 224 м²/г в области 2,1 нм; при этом интегральные параметры мезопор составляют: объем 0,191 см³/г, площадь 158,6 м²/г и средняя ширина 4,82 нм. Дополнительное моделирование по *DFT* (рис. 2, г) подтверждает иерархическую бипористую архитектуру материала, сочетающую наличие ультрамикропор в диапазоне 0,5 – 0,7 нм (объем 0,0155 см³/г для пор менее 0,465 нм) и развитой системы мезопор 2 – 4 нм, что в совокупности дает общую площадь пор (более 0,465 нм) на уровне 1242,31 м²/г.

Таким образом, сформированная в процессе активации структурная организация сорбента (с доминированием мелких мезопор, колоссальной



Рис. 1. Принципиальная схема очистных сооружений г. Кызыл
 Fig. 1. Schematic diagram of the Kyzyl wastewater treatment plant

внешней поверхностью и общим объемом пор свыше 1 см³/г) обеспечивает оптимальные условия для быстрой внутридиффузионной кинетики и свободного доступа сорбатов к активным центрам. Это предопределяет высокую эффективность полученного материала при извлечении крупных органических загрязнителей

(АПАВ, фенолы и гуминовые кислоты) в процессах доочистки сточных вод.

В рамках оценки эффективности модернизированной технологической схемы, включающей биологическую очистку и финишную сорбционную доочистку на синтезированном углеродном сорбенте, были проанализированы изменения

Адсорбционно-структурные характеристики синтезированного углеродного сорбента
 Table 1. Adsorption and structural characteristics of the synthesized carbon sorbent

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы
Удельная поверхность по БЭТ	S_{BET}	1967,94	м ² /г
Константа БЭТ	C_{BET}	107,85	—
Коэффициент корреляции БЭТ	R^2	0,99997	—
Микропористая площадь (<i>t</i> -plot)	S_{micro}	93,17	м ² /г
Внешняя (мезо + макро) площадь	S_{ext}	1874,77	м ² /г
Микропористый объем (<i>t</i> -plot)	V_{micro}	0,0275	см ³ /г
Общий объем пор (при $P/P_0 \approx 0,99$)	V_{total}	1,0647	см ³ /г
Средний диаметр пор ($4V/A$ по БЭТ)	D_{avg}	2,16	нм
Объем мезопор (<i>BJH</i> адс., 2 – 300 нм)	V_{meso}	0,191	см ³ /г
Площадь мезопор (<i>BJH</i> адс.)	S_{meso}	158,6	м ² /г
Средняя ширина пор (<i>BJH</i> адс.)	$DBJH$	4,82	нм
<i>DFT</i> : объем ультрамикропор (менее 0,465 нм)	—	0,0155	см ³ /г
<i>DFT</i> : общая площадь пор (более 0,465 нм)	—	1242,31	м ² /г

качественного состава сточных вод по восьми основным показателям (взвешенные вещества, нитраты, фосфаты, АПАВ, хром, цинк, фенолы,

марганец). Результаты систематизированы в табл. 2 и визуализированы на рис. 3, что позволяет провести сравнительный анализ эффектив-

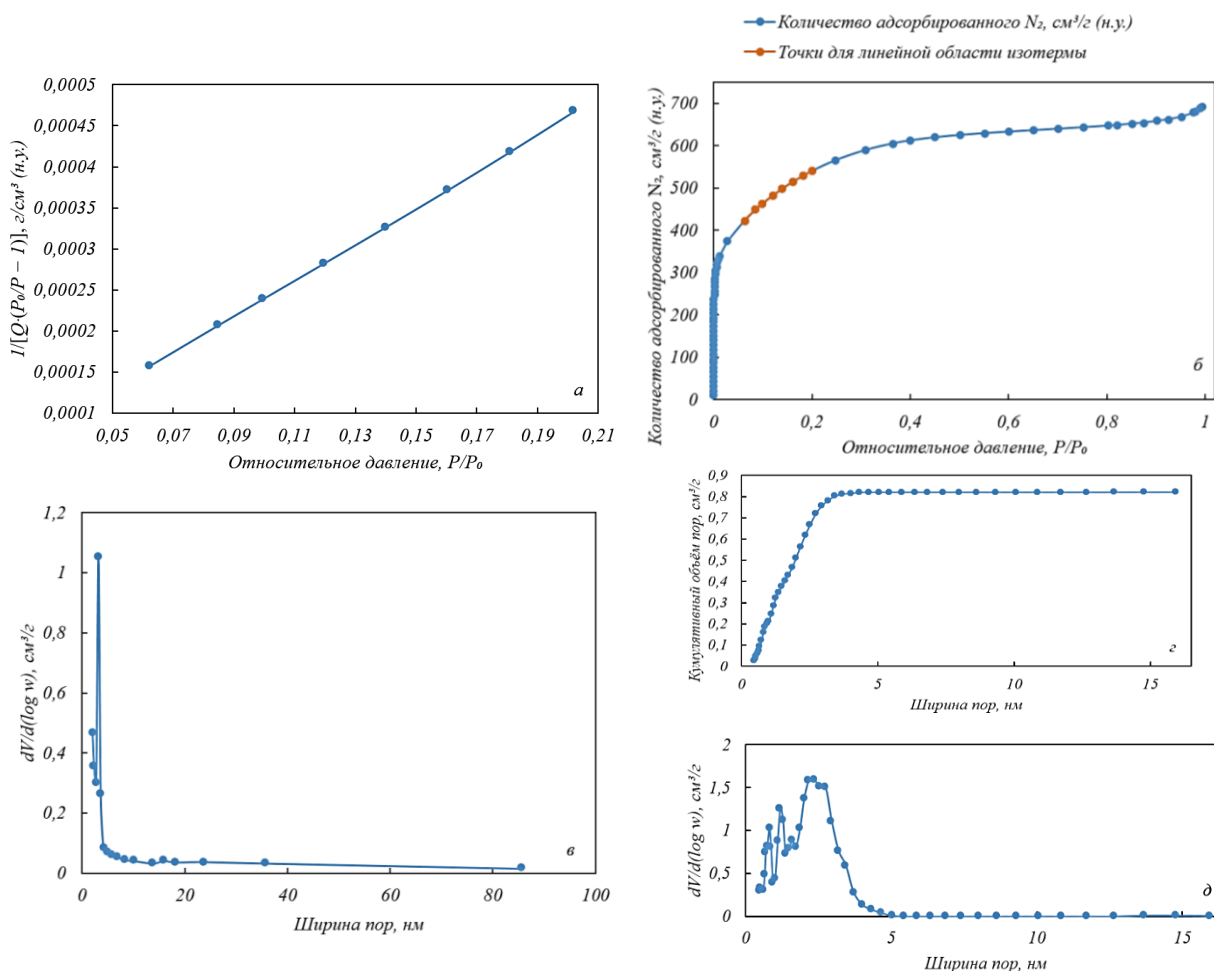


Рис. 2. Анализ пористой структуры углеродного сорбента:

а – линейная аппроксимация изотермы по модели БЭТ; б – определение внешней поверхности и объема микропор методом *t*-plot; в – распределение мезопор по площади (метод *BJH*);
 д – дифференциальное распределение пор по размерам по модели *DFT*

Fig. 2. Analysis of the porous structure of a carbon sorbent:

а – linear approximation of the isotherm using the BET model; б – determination of the external surface area and volume of micropores using the *t*-plot method; в – distribution of mesopores by area (*BJH* method);
 д – differential distribution of pore sizes using the *DFT* model

**Показатели эффективности биологической очистки и сорбционной доочистки
сточных вод**

Table 2. Efficiency indicators of biological treatment and sorption post-treatment of wastewater

Показатель	Норматив*	Вход	Выход (биоочистка)	Выход (био + сорбция)	Эффективность биоочистки, %	Эффективность био + сорбции, %
Взвешенные вещества, мг/л	18,12	64,0	33,0	18,0	48,4	71,9
Нитрат-ион, мг/л	40	10,6	10,0	7,1	5,7	33,0
Фосфат-ион (по P), мг/л	0,05	4,26	6,31	3,86	-48,1	9,4
АПAB, мг/л	0,1	4,45	3,80	0,132	14,6	97,0
Хром, мг/л	0,02	0,172	0,205	0,089	-19,2	48,3
Цинк, мг/л	0,01	0,040	0,034	0,025	15,0	37,5
Фенолы, мг/л	0,0015	0,060	0,144	0,011	-140,0	81,7
Марганец, мг/л	0,01	0,024	0,019	0,004	20,8	83,3

П р и м е ч а н и е: * – нормативы для рыбохозяйственных водоемов [22].

ности двух ступеней очистки и оценить вклад сорбционного этапа в достижение нормативных показателей рыбохозяйственных водоемов [22].

Самостоятельная биологическая очистка демонстрирует крайне нестабильные результаты: по ряду компонентов (фосфаты, хром, фенолы) зафиксирована отрицательная эффективность, что указывает на протекание десорбционных процессов или вторичное образование поллютантов в ходе биохимических реакций [23 – 25]. Например, концентрация фенолов после биоочистки возрастает более чем вдвое (с 0,060 до 0,144 мг/л), а фосфатов – с 4,26 до 6,31 мг/л. В то же время включение сорбционной ступени обеспечивает радикальное улучшение показателей: остаточные концентрации всех загрязнителей снижаются, а суммарная эффективность очистки для большинства веществ достигает

приемлемых значений. По взвешенным веществам и марганцу остаточные концентрации приближаются к установленным нормативам (18,0 и 0,004 мг/л).

Столбчатая диаграмма четко демонстрирует, что биологическая линия проваливается по трем показателям (отрицательный сектор графика), тогда как сорбционная доочистка переводит все значения в положительную область. Особенно заметен прирост эффективности для фенолов (с -140,0 до +81,7 %), АПАВ (с 14,6 до 97,0 %) и хрома (с -19,2 до +48,3 %). Исключение составляют фосфаты и нитраты, для которых сорбция показывает умеренную эффективность (9,4 и 33,0 %), что объясняется преимущественно ионным механизмом их удержания, требующим дополнительного подбора условий сорбции.

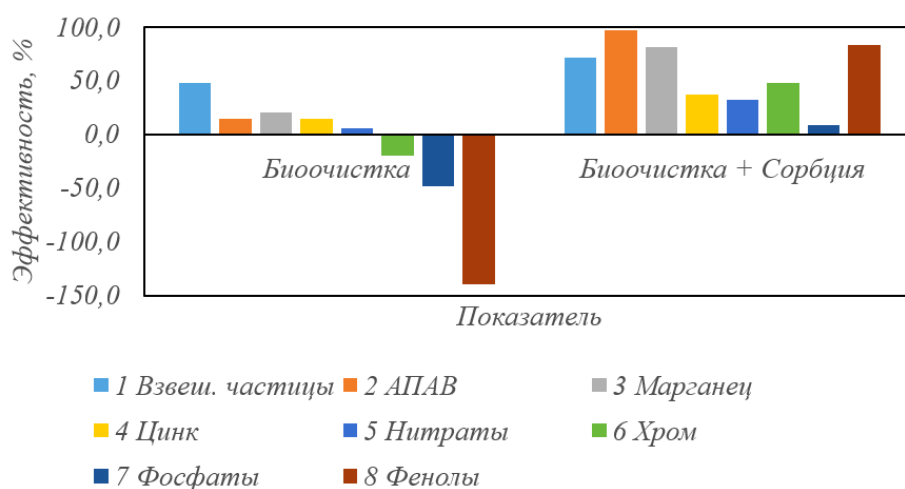


Рис. 3. Сравнительная эффективность биологической очистки и сорбционной доочистки сточных вод углеродным сорбентом из угля Элегестского месторождения

Fig. 3. Comparative efficiency of biological treatment and sorption post-treatment of wastewater with a carbon sorbent from coal of the Elegest deposit

Таким образом, совокупный анализ табличных данных и графического материала подтверждает, что предлагаемая комбинированная схема биоочистка + сорбция является высокоэффективным решением для удаления трудноокисляемой органики (АПАВ, фенолы) и тяжелых металлов (марганец, хром). Высокая удельная поверхность мезопор сорбента ($S_{ext} = 1874,77 \text{ м}^2/\text{г}$) обеспечивает физическую адсорбцию крупных молекул и хемосорбцию металлов, что позволяет не только нивелировать недостатки биологической ступени, но и гарантированно достигать нормативных требований по большинству контролируемых показателей. Выявленные критические ограничения сорбционного метода (низкая эффективность по отношению к нитратам и фосфатам) указывают на необходимость комбинирования сорбционной доочистки с другими технологическими методами для удаления биогенных элементов [26]. Высокая эффективность извлечения марганца (83,3 %) подтверждает данные о способности углеродных сорбентов восстанавливать и адсорбировать ионы металлов в переменных валентных состояниях [27; 28].

Выводы

Углеродный сорбент, синтезированный из каменного угля марки Ж Элегестского месторождения методом щелочной активации (KOH, соотношение 1:3, температура 800 °C), является эффективным материалом для доочистки сточных вод, однако выявленные селективные ограничения не позволяют рассматривать его как универсальное средство очистки.

Полученный сорбент характеризуется уникальными текстурными параметрами: удельная поверхность по БЭТ составляет 1967,94 $\text{м}^2/\text{г}$, внешняя (мезо-макропористая) площадь достигает 1874,77 $\text{м}^2/\text{г}$, что превышает 95 % общей поверхности. Общий объем пор равен 1,0647 $\text{см}^3/\text{г}$, а средний диаметр пор – 2,16 нм. С использованием методов низкотемпературной азотной порометрии (БЭТ, t -plot, BJH, DFT) установлена бипористая иерархическая структура материала, сочетающая ультрамикропоры (0,5 – 0,7 нм) и развитую систему мезопор (2 – 4 нм), что обеспечивает высокую доступность активных центров и благоприятную внутридиффузионную кинетику.

Результаты статических сорбционных испытаний на реальных сточных водах левобережных очистных сооружений г. Кызыл показали, что существующая схема биологической очистки характеризуется нестабильной эффективностью: зафиксирована отрицательная эффективность по фосфатам, хрому и фенолам, что свидетельствует о вторичном загрязнении. Введение сорбционной ступени (доза 3,0 г/л; время контакта

60 мин) обеспечивает значительное улучшение показателей: эффективность извлечения АПАВ достигает 97,0 %, фенолов – 81,7 %, марганца – 83,3 %. По взвешенным веществам и марганцу остаточные концентрации приближаются к нормативам рыбохозяйственных водоемов.

Выявлены критические ограничения сорбционного метода: низкая эффективность по отношению к нитратам и фосфатам, что обусловлено анионной природой данных соединений и отсутствием на поверхности сорбента специфических ионообменных центров. Это указывает на необходимость комбинирования сорбционной доочистки с другими технологическими методами для удаления биогенных элементов.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования углей Элегестского месторождения в качестве сырья для производства отечественных сорбционных материалов, что открывает возможности для импортозамещения дорогостоящих промышленных активных углей, особенно актуальные для удаленных регионов Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гайнулова Д.В. Проблемы модернизации устаревших канализационных очистных сооружений. *Экономика строительства*. 2025;1:459–462.
2. Fukushima T., Nishimura F. Application of Sewage Treatment Plant Simulator for the Evaluation of Different Plant-Reconstruction Options. *Journal of Japan Sewage Works Association*. 2017;54(655):100–107. https://doi.org/10.24748/jswa.54.655_100
3. Gimeno P., Severyns J., Acuña V., Comas J., Corominas L. Balancing environmental quality standards and infrastructure upgrade costs for the reduction of microcontaminant loads in rivers. *Water Research*. 2018;143:632–641. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.002>
4. Chen J., Ni Y., Gou Y., Zhu T., Sun L., Chen Z., Huang J., Yang D., Lai Y. Hydrophobic organogel sorbent and its coated porous substrates for efficient oil/water emulsion separation and effective spilled oil remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;461:132674. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132674>
5. Dregulo A., Khodachek A., Awasthi M. Sustainable Water Resources Management. Weaknesses of sustainable water use in the North: wastewater treatment and sanitation in the Arctic region of Russia. *Sustainable Water Resources Management*. 2025;11(49):5–15. <https://doi.org/10.1007/s40899-025-01229-0>

6. Zhao Y., Zhang L., Li C., Liu X., Li X., Zhang Q., Peng Y. Sustainable intensification of A2/O process through dual anammox pathways: A two-step biofilm-based retrofitting strategy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(6):120453. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120453>
7. Oppenlander T. *Photochemical purification of water and air: advanced oxidation processes (AOPs): principles, reaction mechanisms, reactor concepts*. Weinheim, Wiley VCH, 2003:383.
8. *CWPharma Project: Pilot studies on ozonation and activated carbon*. Kompetenzzentrum Wasser Berlin. URL: <https://rephor-net.de> (Дата обращения: 06.07.2026).
9. Yin W., Sun W., Yuan Y., Zhang D., Zhang Y., Zheng F. Exploring the fate and chemical transformation of organics by UV/H₂O₂-GAC and UV/H₂O₂-BAC based on pilot-scale systems in the treatment of micro-polluted surface water. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 2025;19(7):88. <https://doi.org/10.1007/s11783-025-2008-5>
10. *EMPEREST Project: Pilot plants for micropollutant removal. Interreg Baltic Sea Region*. 2025. URL: <https://interreg-baltic.eu> (Дата обращения: 06.07.2026).
11. Azam K., Shezad N., Shafiq I., Akhter P., Akhtar F., Jamil F., Shafique S., Park Y.-K., Hussain M. A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes. *Chemosphere*. 2022;306:135566. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135566>
12. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. *Activated carbon*. Amsterdam, Elsevier, 2006:542.
13. Samaraweera H., Edwards J., Reid C., Perera S.S., Thirumalai R.V.K.G., Pittman C.U., Mlsna T. Pyrolyzed Ca-impregnated lignite for aqueous phosphate removal: Batch and column studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(5):106077. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106077>
14. *Технологическая схема Левобережных очистных сооружений канализации г. Кызыла*. ООО «ВКС», 2013:28.
15. *Руководство по эксплуатации очистных сооружений канализации с аэротенками*. Москва: НИИ ВОДГЕО, 2010:187.
16. Никитина И.С. План подсчета запасов подземных вод на участке водозабора ООО «ВКС» на левобережных очистных сооружениях г. Кызыла. Кызыл. 2013:45.
17. Монгуш Г.Р., Баранова М.П., Сапелкина Т.В. Физико-химические основы технологии получения сорбентов из каменных углей активацией гидроксидом калия. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022;30(5):534–542. <https://doi.org/10.15372/KhUR2022411>
18. Zhu Y., Liu H., Wang T., Wang Y., Liu H. Evolution of pore structures and fractal characteristics of coal-based activated carbon in steam activation based on nitrogen adsorption method. *Powder Technology*. 2023;424:118522. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118522>
19. *ГОСТ 33587 – 2015. Уголь активированный. Стандартный метод определения адсорбционной способности при малых концентрациях адсорбируемых веществ*. Москва: Стандартинформ, 2019:7.
20. *ГОСТ 33588 – 2015. Уголь активированный. Стандартный метод определения адсорбционной способности*. Москва: Стандартинформ, 2019:11.
21. *ГОСТ 27869 – 2019 Вещества особо чистые. Метод концентрирования микропримесей ионным обменом (в части статической сорбции)*. Москва: Стандартинформ, 2019:12.
22. *О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в сфере водоотведения: Постановление Правительства РФ от 05.01.2015 № 3 (ред. от 22.05.2020)*. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=260900> (дата обращения: 06.07.2026).
23. Di Capua F., Iannaccone F., Sabba F., Esposito G. Simultaneous nitrification–denitrification in biofilm systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. *Bioresource Technology*. 2022;361:127702. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127702>
24. Baimukasheva S., Issayeva A.U., Antkowiak W., Aitimova A., Altybayeva Z., Syrlybekkyzy S., Suleimenova B., Koishina A. The Influence of Abiotic Factors on Organisms-Hydrobionts of Activated Sludge. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(10):125–133. <https://doi.org/10.12911/22998993/170165>
25. Lember E., Retšnoi V., Pachel K., Loigu E. Combined effect of heavy metals on the activated sludge process. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2018;67(4):305–314. <https://doi.org/10.3176/proc.2018.4.02>
26. Ait Baha A., Zrikam N., Idouhli R., Tabit K., El Fels L., Khadiri M.E., Abouelfida A. Strengthened pollutants abatement in wastewater through electrocoagulation and zeolite adsorption: analytical and microbial assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025;32(23):13768–13781. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36492-3>
27. Egbosiuba T.C., Abdulkareem A.S., Kovo A.S., Afolabi E.A., Tijani J.O., Roos W.D. Enhanced adsorption of As(V) and Mn(VII) from industrial wastewater using multi-walled carbon nanotubes and carboxylated multi-walled carbon nanotubes. *Chemosphere*. 2020;254:126780.

- <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126780>
28. Jeirani Z., Sadeghi A., Soltan J., Roshani B., Rindall B. Effectiveness of advanced oxidation processes for the removal of manganese and organic compounds in membrane concentrate. *Separation and Purification Technology*. 2015;149:110–115.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.009>
- ### REFERENCES
1. Gainulova D.V. Problems of modernization of outdated sewage treatment plants. *Ekonomika Stroitel'stva*. 2025;1:459–462. (In Russ.).
 2. Fukushima T., Nishimura F. Application of Sewage Treatment Plant Simulator for the Evaluation of Different Plant-Reconstruction Options. *Journal of Japan Sewage Works Association*. 2017;54(655):100–107.
https://doi.org/10.24748/jswa.54.655_100
 3. Gimeno P., Severyns J., Acuña V., Comas J., Corominas L. Balancing environmental quality standards and infrastructure upgrade costs for the reduction of microcontaminant loads in rivers. *Water Research*. 2018;143:632–641.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.002>
 4. Chen J., Ni Y., Gou Y., Zhu T., Sun L., Chen Z., Huang J., Yang D., Lai Y. Hydrophobic organogel sorbent and its coated porous substrates for efficient oil/water emulsion separation and effective spilled oil remediation. *Journal of Hazardous Materials*. 2024;461:132674.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.132674>
 5. Dregulo A., Khodachek A., Awasthi M. Sustainable Water Resources Management. Weaknesses of sustainable water use in the North: wastewater treatment and sanitation in the Arctic region of Russia. *Sustainable Water Resources Management*. 2025;11(49):5–15.
<https://doi.org/10.1007/s40899-025-01229-0>
 6. Zhao Y., Zhang L., Li C., Liu X., Li X., Zhang Q., Peng Y. Sustainable intensification of A2/O process through dual anammox pathways: A two-step biofilm-based retrofitting strategy. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2025;13(6):120453.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120453>
 7. Oppenlander T. *Photochemical purification of water and air: advanced oxidation processes (AOPs): principles, reaction mechanisms, reactor concepts*. Weinheim, Wiley VCH, 2003:383.
 8. *CWPharma Project: Pilot studies on ozonation and activated carbon*. Kompetenzzentrum Wasser Berlin. URL: <https://rephor-net.de> (Accessed: 06.07.2026).
 9. Wenxuan Yin, Wenjun Sun, Yongqin Yuan, Daoyi Zhang, Yuanna Zhang, Fengyi Zheng. Exploring the fate and chemical transformation of organics by UV/H₂O₂-GAC and UV/H₂O₂-BAC based on pilot-scale systems in the treatment of micro-polluted surface water. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2025;19(7):88.
<https://doi.org/10.1007/s11783-025-2008-5>
 10. *EMPEREST Project: Pilot plants for micropollutant removal. Interreg Baltic Sea Region*. 2025. URL: <https://interreg-baltic.eu> (Accessed: 06.07.2026).
 11. Azam K., Shezad N., Shafiq I., Akhter P., Akhtar F., Jamil F., Shafique S., Park Y.-K., Hussain M. A review on activated carbon modifications for the treatment of wastewater containing anionic dyes. *Chemosphere*. 2022;306:135566.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135566>
 12. Marsh H., Rodriguez-Reinoso F. *Activated carbon*. Amsterdam, Elsevier, 2006:542.
 13. Samaraweera H., Edwards J., Reid C., Perera S.S., Thirumalai R.V.K.G., Pittman C.U., Mlsna T. Pyrolyzed Ca-impregnated lignite for aqueous phosphate removal: Batch and column studies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021;9(5):106077.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106077>
 14. *Technological scheme of Left-bank sewage treatment plants in Kyzyl*. OOO "VKS", 2013:28. (In Russ.).
 15. *Operating instructions for sewage treatment plants with aerotanks*. Moscow: NII VODGEO, 2010:187. (In Russ.).
 16. Nikitina I.S. *The plan for calculating groundwater reserves at the water intake site of LLC "VKS" at the left-bank sewage treatment plants in Kyzyl*. Kyzyl, 2013:45. (In Russ.).
 17. Mongush G.R., Baranova M.P., Sapelkina T.V. Physical and chemical foundations of the technology for obtaining sorbents from coals by activation with potassium hydroxide. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2022;30(5):534–542. (In Russ.).
<https://doi.org/10.15372/KhUR2022411>
 18. Zhu Y., Liu H., Wang T., Wang Y., Liu H. Evolution of pore structures and fractal characteristics of coal-based activated carbon in steam activation based on nitrogen adsorption method. *Powder Technology*. 2023;424:118522.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118522>
 19. GOST 33587 – 2015. *Activated carbon. Standard method for determination of adsorption capacity at low concentrations of adsorbable substances*. Moscow: Standartinform, 2019:7. (In Russ.).
 20. GOST 33588 – 2015. *Activated carbon. Standard method for determination of adsorption capacity*. Moscow: Standartinform, 2019:11. (In Russ.).
 21. GOST 27869 – 2019. *High-purity substances. Method for concentration of microimpurities by ion exchange (in terms of static sorption)*. Moscow: Standartinform, 2019:12. (In Russ.).
 22. *On Amendments to Certain Acts of the Government of the Russian Federation in the Field of Wastewater Disposal: Resolution of the Govern-*

- ment of the Russian Federation No. 3 of 05.01.2015 (as amended on 22.05.2020). URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=260900> (accessed: 06.07.2026). (In Russ.).
23. Di Capua F., Iannaccone F., Sabba F., Esposito G. Simultaneous nitrification–denitrification in bio-film systems for wastewater treatment: Key factors, potential routes, and engineered applications. *Bioresource Technology*. 2022;361:127702. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127702>
 24. Baimukasheva S., Issayeva A.U., Antkowiak W., Aitimova A., Altybayeva Z., Syrlybekkyzy S., Suleimenova B., Koishina A. The Influence of Abiotic Factors on Organisms-Hydrobionts of Activated Sludge. *Journal of Ecological Engineering*. 2023;24(10):125–133. <https://doi.org/10.12911/22998993/170165>
 25. Lember E., Retšnoi V., Pachel K., Loigu E. Combined effect of heavy metals on the activated sludge process. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2018;67(4):305–314. <https://doi.org/10.3176/proc.2018.4.02>
 26. Ait Baha A., Zrikam N., Idouhli R., Tabit K., El Fels L., Khadiri M.E., Abouelfida A. Strengthened pollutants abatement in wastewater through electrocoagulation and zeolite adsorption: analytical and microbial assessment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025;32(23):13768–13781. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36492-3>
 27. Egbosiuba T.C., Abdulkareem A.S., Kovo A.S., Afolabi E.A., Tijani J.O., Roos W.D. Enhanced adsorption of As(V) and Mn(VII) from industrial wastewater using multi-walled carbon nanotubes and carboxylated multi-walled carbon nanotubes. *Chemosphere*. 2020;254:126780. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126780>
 28. Jeirani Z., Sadeghi A., Soltan J., Roshani B., Rindall B. Effectiveness of advanced oxidation processes for the removal of manganese and organic compounds in membrane concentrate. *Separation and Purification Technology*. 2015;149:110–115. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2015.05.009>

Сведения об авторах

Григорий Романович Монгуш, к.т.н., старший научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН
E-mail: mongush983@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5303-3525

SPIN-код: 9555-5702

Херелмаа Борисовна Манзырыкчы, младший научный сотрудник Лаборатории ХТЛ, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН

E-mail: Herelka_geotom@mail.ru

ORCID: 0009-0003-5787-4331

SPIN-код: 4659-6100

Татьяна Валерьевна Сапелькина, научный сотрудник, Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН

E-mail: sapelkina_geotom@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2462-0365

SPIN-код: 1724-4758

Information about the authors:

Grigory R. Mongush, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Federal State Budgetary Institution of Sciences Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian branch of Russian Academy of Sciences

E-mail: mongush983@mail.ru

ORCID: 0000-0001-5303-3525

SPIN-код: 9555-5702

Kherelmaa B. Manzyrykchy, Junior Researcher at the Chemical Technology Laboratory, Federal State Budgetary Institution of Sciences Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian branch of Russian Academy of Sciences

E-mail: Herelka_geotom@mail.ru

ORCID: 0009-0003-5787-4331

SPIN-код: 4659-6100

Tatyana V. Sapelkina, Research Associate, Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: sapelkina_geotom@mail.ru

ORCID: 0000-0002-2462-0365

SPIN-код: 1724-4758

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 14.07.2026

После доработки 21.08.2026

Принята к публикации 25.08.2026

Received 14.07.2026

Revised 21.08.2026

Accepted 25.08.2026