

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Научная статья

УДК 541.183:674.8

doi: 10.17308/sorpchrom.2025.25/12794

Исследование отходов деревообработки в качестве адсорбентов для очистки сточных вод от полихлорбифенилов

Марина Геннадьевна Первова^{1✉}, Мария Андреевна Саморукова¹,
Даниил Юрьевич Дворянkin², Инна Геннадьевна Первова²,
Виктор Иванович Салоутин¹

¹Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН Екатеринбург, Россия,
pervova@ios.uran.ru ✉

²Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Отходы растительного происхождения (опилки, кора, кожа и т.д.) являются перспективным материалом для использования в качестве сорбентов при очистке водных сред от загрязнителей различной природы. Полихлорированные бифенилы (ПХБ) относятся к одним из самых распространенных загрязнителей антропогенного характера природных и промышленных объектов. ПХБ обладают токсичными свойствами и представляют высокую опасность для окружающей среды и здоровья населения. Целью работы являлось изучение возможности использования сорбентов на основе природного лигноцеллюлозосодержащего сырья (опилок из древесины сосны и липы) для использования в качестве сорбентов ПХБ при очистке водных сред. Концентрацию ПХБ в водных растворах до и после сорбции определяли методом газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектированием. Изучаемые сорбенты показали высокую эффективность при извлечении смеси ПХБ: максимальная сорбционная емкость при исходной концентрации ПХБ 50 мг/дм³ для сорбента на основе сосновых опилок составляет 2500 мг/г, для сорбента на основе опилок древесины липы – 2384 мг/г. Показано, что наибольшая степень извлечения ПХБ достигается при добавлении 20 г/дм³ опилок с размерностью частиц 0.75-2.00 мм. Полное извлечение ПХБ наблюдается за 4 сут при использовании сосновых опилок, в то время как при применении опилок из древесины липы даже через 14 сут степень извлечения составляет лишь 94%. Изучена кинетика сорбции и установлено, что кинетические параметры сорбции соответствуют модели псевдо-второго порядка. Проведена обработка изотерм адсорбции с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радushkevicha. Показано, что для обоих сорбентов процесс сорбции лучше всего описывается моделью Ленгмюра. Значения параметров, рассчитанные на основании значений констант уравнений указанных моделей, свидетельствовали о высокой степени сродства адсорбата к поверхности изучаемых адсорбентов, процесс сорбции ПХБ не является самопроизвольным с образованием монослойной структуры и преимущественно проходит физическая сорбция молекул ПХБ на поверхности сорбентов.

Ключевые слова: сорбция, полихлорбифенилы, опилки липы обыкновенной, опилки сосны обыкновенной, газовая хроматография, кинетика сорбции, изотермы сорбции

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (№ гос. рег. 124020200028-7) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений» (ЦКП «САОС»).

Для цитирования: Первова М.Г., Саморукова М.А., Дворянkin Д.Ю., Первова И.Г., Салоутин В.И. Исследование отходов деревообработки в качестве адсорбентов для очистки сточных вод от полихлорбифенилов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2025. Т. 25, № 1. С. 56-65. <https://doi.org/10.17308/sorpchrom.2025.25/12794>

Original article

Investigation of wastes wood processing as adsorbents for wastewater treatment from polychlorobiphenyls

Marina G. Pervova^{1✉}, Maria A. Samorukova¹, Daniil Yu. Dvoryankin²,
Inna G. Pervova², Victor I. Saloutin¹

¹I.Ya. Postovsky Institute of Organic Synthesis of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia, pervova@ios.uran.ru✉

²Ural State Forestry Engineering University, Yekaterinburg, Russia

Annotation. Waste of plant origin (sawdust, bark, peel, etc.) is a promising material for use as sorbents in the purification of aquatic media from pollutants of various nature. Polychlorinated biphenyls (PCBs) are among the most widespread anthropogenic pollutants in natural and industrial facilities. PCBs have toxic properties and pose a high risk to the environment and public health. The aim of the work was to study the possibility of using sorbents based on natural lignocellulose-containing raw materials (sawdust from pine and linden wood) for use as PCB sorbents in the purification of aqueous media. The concentration of PCBs in aqueous solutions before and after sorption was determined by gas chromatography with flame ionization detection. The sorbents studied showed high efficiency in the extraction of a PCB mixture: the maximum sorption capacity at an initial PCB concentration of 50 mg/dm³ for a sorbent based on pine sawdust is 2500 mg/g, for a sorbent based on linden sawdust – 2384 mg/g. It is shown that the highest degree of PCB recovery is achieved by adding 20 g/dm³ of sawdust with a particle size of 0.75–2.00 mm. Complete recovery of PCBs is observed in 4 days when using pine sawdust, while when using sawdust from linden wood, even after 14 days, the recovery rate is only 94%. Sorption kinetics has been studied and it has been established that the kinetic parameters of sorption correspond to the pseudo-second-order model. The adsorption isotherms were processed using the Langmuir, Freundlich, Temkin, and Dubinin-Radradkevich models. It is shown that for both sorbents, the sorption process is best described by the Langmuir model. The parameter values calculated on the basis of the values of the equation constants these models indicated a high degree of adsorbate affinity to the surface of the adsorbents under study, the PCB sorption process is not spontaneous with the formation of a monolayer structure and mainly physical sorption of PCB molecules on the surface of sorbents takes place.

Keywords: sorption, polychlorobiphenyls, linden sawdust, common pine sawdust, gas chromatography, sorption kinetics, sorption isotherms

Acknowledgements: the work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state Registration number 124020200028-7) using the equipment of the Center for Collective Use "Spectroscopy and Analysis of Organic Compounds" (CCP "CAOS").

For citation: Pervova M.G., Samorukova M.A., Dvoryankin D.Yu., Pervova I.G., Saloutin V.I. Investigation of wastes wood processing as adsorbents for wastewater treatment from polychlorobiphenyls. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2025. 25(1): 56-65. (In Russ.). <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2025.25/12794>

Введение

Загрязнение компонентов окружающей среды полихлорированными бифенилами (ПХБ) остается актуальной проблемой для многих регионов мира в связи с их широким использованием в предыдущие годы в составе смазочных материалов, герметиков, красок, диэлектрических наполнителей в трансформаторах и конденсаторах [1]. Небрежная практика утилизации, аварийные и несанкционированные сбросы способствовали постоянному присутствию и накоплению ПХБ

в поверхностных и подземных водах, в донных отложениях рек и озер [2-5]. Токсичность, стойкость, способность к переносу на большие расстояния и аккумуляции в биомассе обуславливают высокую опасность ПХБ для окружающей среды и здоровья населения [6,7]. Попадание ПХБ с промышленными сточными водами в городскую канализацию также негативно влияет на эффективность аэробных и анаэробных процессов биологической очистки на городских очистных сооружениях [8], обуславливая необходимость разработки и применения новых

методов для удаления ПХБ из стоков предприятий и техногенных образований.

Для очистки водных сред от ПХБ используют, в основном, активные угли (АУ), полученные на основе различных сырьевых источников. В [9] проведено исследование сорбции 11 конгенов ПХБ (ди-, три-, тетра- и пентахлорбифенилов) при внесении в речную (природную) воду с использованием колонок, заполненных АУ. Изучение процесса сорбции показало, что в течение 390 дней удастся полностью очистить водную фазу от ПХБ. Однако процессу могут мешать другие органические соединения, которые присутствуют в природных водных образцах. В [10] для удаления ПХБ из сточных вод, использовали гранулированный активированный уголь (ГАУ), помещённый в колонку, через которую пропускали воду со скоростью 10 см³/мин. По результатам исследований эффективность адсорбционной очистки воды от ПХБ составила 83%. При сравнении очистки сточных вод, загрязненных ПХБ, с использованием колонок с ГАУ и АУ, инокулированным бактериальными штаммами (БАУ), способными разлагать ПХБ, показано, что остаточное содержание ПХБ в воде после очистки в течение 3 сут с использованием БАУ составило 1%, ГАУ – 38% [11].

В то же время в ряде работ отмечается актуальность и экономическая целесообразность применения сорбентов на основе природного лигноцеллюлозного сырья ввиду экологичности матрицы такого материала, который не оказывает негативного влияния на природные объекты. Описано сравнительное использование порошкового активированного угля (ПАУ) и нано бамбукового угля (НБУ) для очистки почвы от ПХБ [12]. Из почв получали водные вытяжки, которые смешивали с сорбентами и выдерживали 0.5-8 ч. Показано, что степень извлечения ПХБ при использовании ПАУ составила 96.53 и 93.44% при использовании НБУ.

В [13] для извлечения ПХБ из донных отложений использовали АУ из битуминозного угля и биоуголь (БУ), полученный из древесины лиственных пород. Показано, что степень извлечения ПХБ с использованием обоих сорбентов составила 90%. Для очистки морской воды, почвы и донных отложений от ПХБ и пирена использовали АУ, полученного на основе антрацита, и АУ, полученного на основе биомассы скорлупы кокосового ореха (*Cocos nucifera*) [14]. Показано, что АУ на основе биомассы обладал наибольшей сорбционной способностью. Результаты исследований [15] показали эффективность применения бамбукового угля (*bamboo biochar*) для извлечения тетра- и пентахлорированных бифенилов при обработке почв с низким содержанием органического вещества.

В настоящее время при выборе сорбционного материала большое внимание уделяется не только его сорбционным характеристикам, но и способам регенерации и утилизации отработанного материала. Зачастую решающим аспектом становится стоимость получения сорбента и доступность сырьевой базы. В этой связи достаточно большой потенциал представляет применение отходов деревообработки (опилки, измельченная кора) в сорбционных процессах при извлечении поллютантов из сточных и природных вод вследствие доступности получения, возобновляемости ресурсов, дешевизны. Поэтому целью данной работы являлось изучение возможности использования сорбентов на основе природного лигноцеллюлозосодержащего сырья (опилки из древесины сосны и липы) для использования в качестве сорбентов ПХБ при очистке водных сред.

Экспериментальная часть

В качестве сорбентов использовали нативные опилки (т.е. в натуральном/природном виде без какой-либо химической обработки) из древесины сосны

обыкновенной (*Pinus sylvestris*) с размером частиц 0.75-2.00 мм (образец 1) и опилки из древесины липы обыкновенной (*Tilia europaea*) с размером частиц 0.75-2.00 мм (образец 2), являющиеся отходами деревообрабатывающих предприятий (г. Екатеринбург).

Изучение сорбции проводили с применением модельных водных растворов смеси ПХБ, состоящей от ди- до гептахлорбифенилов. Для этого готовили растворы смеси ПХБ в ацетоне и их аликваты вносили в воду. Для извлечения ПХБ из модельных водных растворов до и после сорбции использовали жидкостную экстракцию *n*-гексаном при соотношении водной и органической фаз 25:1. После расслоения проводили анализ органической фазы методом газовой хроматографии (ГХ).

Анализ экстрактов проводили с использованием газового хроматографа «GC-2010Plus», фирмы Shimadzu (Япония), с пламенно-ионизационным детектором (условия ГХ-ПИД), кварцевой капиллярной колонкой ZB-5 (полидиметилсилоксан, 5 % мас. фенильных групп), длиной 30 м, диаметром 0.25 мм, толщиной пленки 0.25 мкм. Температура колонки – начальная 40°C (выдержка 3 мин), программирование со скоростью 10°C/мин до 280°C (выдержка 30 мин), температура испарителя – 250°C, детектора – 300°C. Газ-носитель – азот, деление потока 1:30, расход через колонку 1.0 см³/мин.

Количественную оценку содержания ПХБ в экстрактах до и после сорбции проводили по методу абсолютной градуировки, используя *n*-гексановые экстракты модельных водных растворов смеси ПХБ, что позволило учесть неполноту извлечения ПХБ при жидкостной экстракции. Экстракты анализировали методом ГХ, регистрировали хроматограммы, рассчитывали и суммировали площади пиков конгенов ПХБ и с помощью градуировочных зависимостей

определяли их остаточную концентрацию (C , мг/дм³).

Для оценки эффективности сорбентов рассчитывали количественные характеристики сорбции: степень извлечения ПХБ (R , %) и сорбционную емкость исследуемых сорбентов (A , мг/г) по формулам (1, 2):

$$R = \frac{(C_0 - C)}{C_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$A = \frac{(C_0 - C) \cdot V}{m}, \text{ мг/г}, \quad (2)$$

где C_0 и C – концентрации ПХБ в водном растворе до и после сорбции соответственно, мг/дм³; V – объем водного раствора, дм³; m – масса сорбента, г.

Удельную площадь поверхности образцов опилок 1 и 2 определяли, предполагая монослойное заполнение поверхности адсорбента красителем с плоской ориентацией молекул [16] по формуле (3):

$$S_{\text{уд}} = \omega \cdot \Gamma \cdot N_A, \text{ м}^2/\text{г}, \quad (3)$$

где $\omega = 106 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$ – эффективная площадь молекулы метиленового голубого [17]; N_A – число Авогадро; Γ – величина адсорбции (моль/г).

Для определения оптимальной массы сорбента в колбу помещали 50 см³ водного раствора смеси ПХБ с концентрацией 50 мг/дм³, добавляли 0.1-1.2 г сорбента и непрерывно перемешивали с помощью устройства ЛАБ-ПУ-01 со скоростью 130 об/мин в течение 6 ч. Затем декантацией отделяли жидкую и твердую фазы. Далее проводили анализ жидкой фазы как описано выше.

Для определения оптимального времени сорбции в конические колбы помещали 50 см³ водного раствора смеси ПХБ с концентрацией 50 мг/дм³, добавляли 1 г исследуемого сорбента и непрерывно перемешивали в течение 0.25, 1, 2, 3, 4, 7, 10, 14 сут. Далее проводили анализ жидкой фазы как описано выше.

Для изучения сорбции в статических условиях в колбу помещали 1.0 г сорбента, добавляли 50 см³ водного раствора смеси ПХБ с концентрацией 50-250 мг/дм³ и непрерывно перемешивали в течение 6 ч.

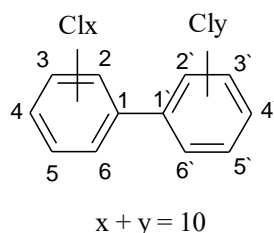


Рис. 1. Структура и положение атомов хлора в конгенерах ПХБ
 Fig. 1. Structure and position of chlorine atoms in PCB congeners

Таблица 1. Физико-механические характеристики древесных опилок
 Table 1. Physical and mechanical characteristics of sawdust

Показатели	Сорбент	
	1 [20]	2
Влажность (ГОСТ 16483.7-71), %	5.84	5.55
Набухаемость (ГОСТ 10898.4-84), %	23.50	15.10
Адсорбционная активность по йоду (ГОСТ 6217-74), %	21.57	31.75
Адсорбционная активность по МГ (ГОСТ 4453-74), мг/г	31.20	44.20
Суммарный объем пор (ГОСТ 17219-71), см ³ /г	5.78	6.37
Насыпная плотность (ГОСТ 10898.2-74), г/дм ³	105.09	134.93
Удельная поверхность, м ² /г	62.25	88.14
Кислотность сорбентов (метод Боэма), мг·экв /г	2.30	1.83

Далее проводили анализ жидкой фазы как описано выше.

Обсуждение результатов

ПХБ представляют собой органические соединения ароматической структуры, индивидуальные изомеры которых отличаются друг от друга количеством атомов хлора (от 1 до 10), их расположением в ароматических ядрах и называются конгенерами (рис. 1). Всего существует 209 конгенеров ПХБ и, в зависимости от расположения атомов хлора в структуре, проведена их нумерация [18]. В работе использована смесь ПХБ, состоящая из ди- (4.7%), три- (23.0%), тетра- (21.6%), пента- (40.0%), гекса- (9.0%) и гептахлорбифенилов (0.5%). Эффективность извлечения ПХБ сорбентами исследовали для всей суммы ПХБ.

Характеристики опилок из древесины сосны и липы (сорбенты 1 и 2), использованных в качестве объектов исследования, представлены в табл. 1. Отметим, что образец 2 имеет более развитую пористую структуру, о чем свидетельствует суммарный объем пор и удельная поверх-

ность. В обоих образцах опилок присутствуют макро- и микропоры, что по мнению авторов [19] обуславливает как эффективность, так и селективность извлечения ПХБ из растворов с помощью сорбентов на основе природного лигноцеллюлозного растительного сырья.

При исследовании зависимости извлечения ПХБ от массы сорбента показано, что с увеличением добавляемых сорбентов 1 и 2 (от 0.1 до 1.0 г) остаточная концентрация суммы ПХБ постепенно уменьшалась, а степень извлечения, соответственно, увеличивалась. Однако стоит отметить, что увеличение массы сорбентов до 1.2 г приводит к уменьшению объема контактирующего водного раствора за счет впитывания воды сорбентом, определяя нестабильность получаемых результатов. В целом же, с увеличением массы исследуемых сорбентов 1 и 2 от 0.1 г до 1.0 г степень извлечения возрастает до 86 и 72%, соответственно (рис. 2).

При исследовании влияния на сорбцию ПХБ продолжительности контакта фаз установлено, что за первые 6 ч наблюдается эффективное извлечение

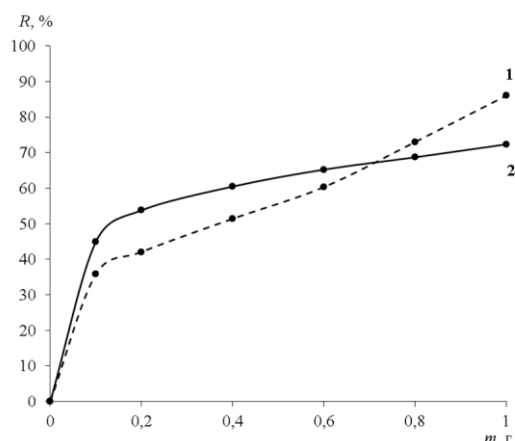


Рис. 2. Зависимость степени извлечения смеси ПХБ от массы сорбента: 1 – сорбент 1; 2 – сорбент 2

Fig. 2. Dependence of the degree of extraction of the PCB mixture on the mass of the sorbent: 1 – sorbent 1; 2 – sorbent 2

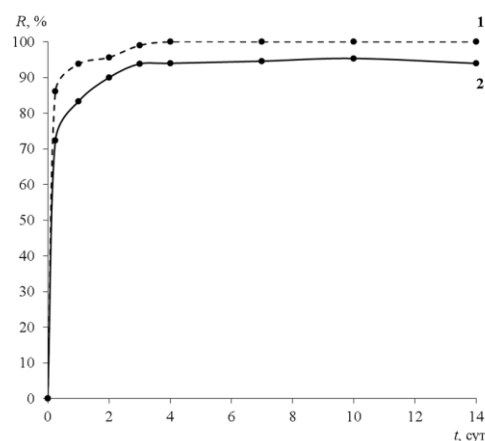


Рис. 3. Зависимость степени извлечения смеси ПХБ сорбентами от времени контакта фаз: 1 – сорбент 1; 2 – сорбент 2

Fig. 3. Dependence of the degree of extraction of the PCB mixture by sorbents on the contact time of the phases: 1 – sorbent 1; 2 – sorbent 2

Таблица 2. Кинетические параметры адсорбции ПХБ на сорбентах
Table 2. Kinetic parameters of PCB adsorption on sorbents

Модель	Параметр	Значение	
		Сорбент 1	Сорбент 2
Псевдо-первого порядка	$A_{\text{эксп}}$, Г/Г	2.50	2.38
	$A_{\text{теор}}$, Г/Г	3.54	2.77
	k_1	0.5636	0.2751
	r^2	0.6918	0.8009
Псевдо-второго порядка	$A_{\text{теор}}$, Г/Г	2.74	2.61
	k_2	0.3981	0.4168
	r^2	0.9999	0.9998

смеси ПХБ при применении исследуемых сорбентов 1 и 2 (рис. 3). Причём степень извлечения ПХБ из раствора после шестичасового контактирования с сосновыми опилками (образец 1) составила 86%, через 2 сут – 96%, а на 4 сут ПХБ в водной фазе уже не обнаруживались. При использовании же образца 2 на основе опилок из древесины липы процесс сорбции происходит менее эффективно. Так, за 6 ч степень извлечения смеси ПХБ составила только 72%. Далее степень извлечения немного увеличивалась до 83% за 1 сут и достигла 95% за 10 сут. Попытка увеличить время сорбции до 14 сут не привела к положительному результату: остаточная концентрация смеси ПХБ не

снизилась, а, наоборот, увеличилась, что, возможно, связано с вымыванием ПХБ из сорбента за счет набухания его в водной среде (рис. 3). Таким образом, полная сорбция ПХБ опилками липы не достигается.

Максимальная сорбционная емкость ($A_{\text{эксп}}$ при исходной концентрации ПХБ 50 мг/дм³) для сорбента 1 на основе сосновых опилок составляет 2500 мг/г, для сорбента 2 на основе опилок древесины липы – 2384 мг/г.

Данные о влиянии времени контакта фаз на эффективность извлечения ПХБ углеродными сорбентами обработаны в рамках моделей псевдо-первого и псевдо-

второго порядка [21-23]. Кинетические параметры приведены в табл. 2.

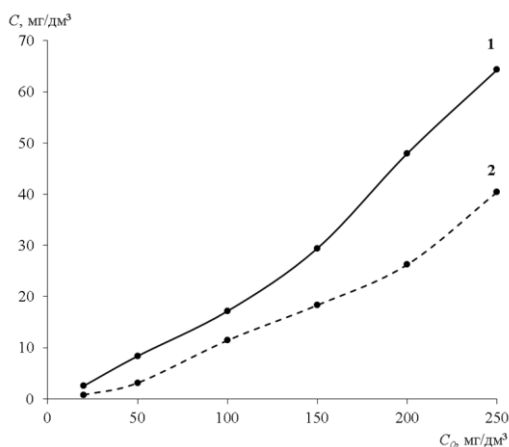


Рис. 4. Зависимость остаточной концентрации смеси ПХБ в водных растворах в результате сорбции на сорбентах от исходного содержания: 1 – сорбент 2; 2 – сорбент 1

Fig. 4. Dependence of the residual concentration of the PCB mixture in aqueous solutions as a result of sorption on sorbents on the initial content: 1 – sorbent 2; 2 – sorbent 1

мг/дм³ степень извлечения составила 96%, а для растворов с концентрацией

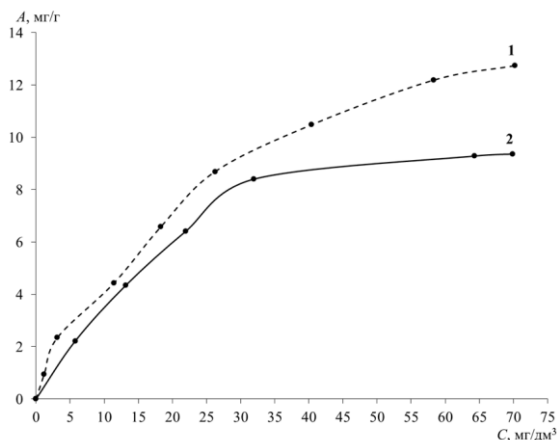


Рис. 5. Изотермы адсорбции ПХБ сорбентах: 1 – сорбент 1; 2 – сорбент 2

Fig. 5. Isotherms of PCB adsorption on sorbents: 1 – sorbent 1; 2 – sorbent 2

Таблица 3. Эффективность извлечения смеси ПХБ сорбентами

Table 3. Efficiency of PCB mixture extraction by sorbents

Исходная концентрация смеси ПХБ, мг/дм ³	Степень извлечения, %	
	Сорбент 1	Сорбент 2
20	96.06	87.32
50	93.74	83.26
100	88.57	82.84
150	87.79	80.38
200	86.88	76.02
250	83.83	74.27

Расчетные значения сорбционной емкости ($A_{\text{теор}}$) и коэффициента корреляции r^2 показали, что наилучшее соответствие сорбции ПХБ на опилках обеспечивается кинетической моделью псевдо-второго порядка.

Изучение сорбции ПХБ в статических условиях. Показано, что при использовании сорбента 1 с увеличением концентрации смеси ПХБ в водном растворе остаточная концентрация смеси ПХБ увеличивается (рис. 4), а эффективность извлечения уменьшается (табл. 3). Так, для растворов с исходной концентрацией 20

250 мг/дм³ – 84%. Степень извлечения смеси ПХБ в присутствии сорбента 2 ниже, чем при использовании сосновых опилок, и с увеличением концентрации смеси ПХБ в водном растворе уменьшилась с 87 до 74% для растворов с концентрацией 20 и 250 мг/дм³ соответственно (табл. 3).

Согласно классификации изотерм адсорбции–десорбции Брунауэра, Деминга, Деминга и Теллера (БДДТ) [24], полученные изотермы адсорбции (рис. 5) относятся к I типу, который характерен для сорбентов с микропористой структурой и

Таблица 4. Параметры изотерм адсорбции смеси ПХБ на сорбентах
Table 4. Parameters of isotherms of adsorption of a mixture of PCBs on sorbents

Модели изотерм	Параметры	Значение	
		Сорбент 1	Сорбент 2
Ленгмюра	Уравнение	$y = 2.2436x + 0.0593$	$y = 2.1946x + 0.035$
	R_L	0.9960	0.9975
	k_L	0.0264	0.0159
	r^2	0.9993	0.9960
	ΔG , кДж/моль	8.940	10.187
Фрейндлиха	Уравнение	$y = 0.7817x - 0.195$	$y = 0.6197x - 0.0734$
	k_f	0.6383	0.8445
	n	1.2793	1.6137
	$1/n$	0.781	0.619
	r^2	0.9869	0.9378
Темкина	Уравнение	$y = 4.1678x - 5.1753$	$y = 3.1319x - 3.2929$
	B_{TE} , кДж/моль	2.895	5.311
	r^2	0.9829	0.9669
Дубинина-Радуш-кевича	Уравнение	$y = -0.8496x + 5.404$	$y = -0.4631x + 3.3344$
	E , кДж/моль	2.669	3.615
	r^2	0.7988	0.7202

относительно малой долей внешней поверхности [25, 26].

Проведена согласно [23, 26] обработка изотерм адсорбции с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича (табл. 4). Значения коэффициента разделения R_L и стандартной свободной энергии ΔG , вычисленные на основании значений констант уравнения Ленгмюра для обоих сорбентов, свидетельствуют о высокой степени сродства адсорбата к поверхности углеродных адсорбентов, и, что процесс сорбции ПХБ не является самопроизвольным с образованием монослойной структуры [27]. Величины константы Темкина B_{TE} , степени нелинейности n (в соответствии с моделью Фрейндлиха) и значение энергии сорбции E (в рамках модели Дубинина-Радушкевича) свидетельствуют о преимущественной физической сорбции молекул ПХБ на поверхности сорбентов 1 и 2.

Заключение

Показана возможность использования нативных опилок из древесины сосны и липы, являющихся отходами деревообрабатывающих предприятий, для очистки водных сред от ПХБ. Показано, что

наиболее эффективным сорбентом являются древесные опилки сосны – за 4 сут достигается полное извлечение смеси ПХБ, при использовании опилок древесины липы за 14 сут степень извлечения смеси ПХБ составляет 94%. Установлено, что наибольшая степень извлечения смеси ПХБ достигается при добавлении 20 г/дм³, а максимальная сорбционная емкость для сосновых опилок составляет 2500 мг/г, опилок липы – 2384 мг/г. Кинетические параметры сорбции соответствуют модели псевдо-второго порядка. Обработка изотерм адсорбции с применением моделей Ленгмюра, Фрейндлиха, Темкина и Дубинина-Радушкевича показала, что для обоих сорбентов процесс сорбции описывается моделью Ленгмюра. Установлено, что ПХБ обладают высокой степенью сродства к поверхности изучаемых адсорбентов и преимущественно проходит физическая сорбция молекул ПХБ на поверхности сорбентов с образованием монослойной структуры.

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. Treger Yu. A., Stojkie organicheskie zagryazniteli. Problemy i puti ih resheniya, *Vestnik MITHT*, 2011; 6 (5): 87-97. (In Russ.)
2. Montano L., Pironti C., Pinto G., Ricciardi M., Buono A., Brogna C., Venier M., Piscopo M., Amoresano A., Motta O., Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: occupational and exposure events, effects on human health and fertility, *Toxics*, 2022; 10 (7): 365. <https://doi.org/10.3390/toxics10070365>
3. Melymuk L., Blumenthal J., Sánka O., Shu-Yin A., Singla V., Šebková K., Fedinick K.P., Diamond M.L., Persistent Problem: Global Challenges to Managing PCBs, *Environ. Sci. Technol.*, 2022; 56 (12): 9029-9040. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c01204>
4. Hale S.E., Kwon S., Ghosh U., Werner D., Polychlorinated biphenyl sorption to activated carbon and the attenuation caused by sediment, *Global NEST Journal*, 2010; 12 (3): 318-326.
5. Deng B., Zhou X., Yang X., Dang Z., Lu G., Removal of polychlorinated biphenyls and recycling of tween-80 in soil washing eluents, *Desalinat. Water Treatment*, 2017; 64: 109-117. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0235>
6. Tanabe S., PCB problems in the future: foresight from current knowledge, *Environ. Pollution*, 1988; 50: 5-28.
7. Kryatov I.A., Avhimenko M.M., Tsapkova N.N., Polihlorirovannye bifenily i dioksiny – opasnye i persistentnye zagryazniteli okruzhayushchej sredy (obzor), *Gigiena i sanitariya*, 1991; 2: 68-72. (In Russ.)
8. Yao M., Li Z., Zhang X., Lei L., Polychlorinated biphenyls in the centralized wastewater treatment plant in a chemical industry zone: source, distribution, and removal, *J. Chem.*, 2014; 2014: 352675. <https://doi.org/10.1155/2014/352675>
9. Fairey J.L., Wahman D.G., Lowry G.V., Effects of natural organic matter on PCB-activated carbon sorption kinetics: implications for sediment capping applications, *J. Environ. Quality*, 2010; 39: 1359-1368. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0505>
10. Ryoo K.S., Kim T.D., Kim Y.H., Adsorption of specific organics in water on GAC and regeneration of GAC by countercurrent oxidative reaction, *Bull. Korean Chem. Soc.*, 2002; 23: 817-823.
11. Ghosh U., Weber S.A., Jensen J. N., Smith J.R., Granular activated carbon and biological activated carbon treatment of dissolved and sorbed polychlorinated biphenyls, *Water Environ. Research*, 1999; 71(2): 232-240. <https://doi.org/10.2175/106143098X121761>
12. Binglu D., Xingqiu Z., Xingjian Y., Zhi D., Guining L., Removal of polychlorinated biphenyls and recycling of tween-80 in soil washing eluents, *Desalinat. Water Treatment*, 2017; 64: 109-117. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0235>
13. Zhou Y., Miao D., Gomez-Eyles L.J., Ghosh U., Bi M., Li J., Ren F., Comparative study on polychlorinated biphenyl sorption to activated carbon and biochar and the influence of natural organic matter, *Chemosphere*, 2022; 287: 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132239>
14. Amstaetter K., Eak E., Cornelissen G., Sorption of PAHs and PCBs to activated carbon: coal versus biomass-based quality, *Chemosphere*, 2012; 87(5): 573-578. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.01.007>
15. Huang S., Bao J., Shan M., Qin H., Wang H., Yu X., Chen J., Xu Q., Dynamic changes of polychlorinated biphenyls (PCBs) degradation and adsorption to biochar as affected by soil organic carbon content, *Chemosphere*, 2018; 211: 120-127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.133>
16. Ben'ko E.M., Lunin V.V., Adsorbciya metilenovogo golubogo na lignocellyuloznych rastitel'nyh materialah, *Zhurnal fizicheskoy himii*, 2018; 92(9): 1465-1469. (In Russ.)
17. GOST 13144-79 Grafit. Metody opredeleniya udel'noj poverhnosti. Izdatel'stvo standartov. 1999. 7 p. (In Russ.)
18. Mills III S. A., Thal D.I., Barney J., A summary of the 209 PCB congener nomenclature, *Chemosphere*, 2007; 68(9): 1603-1612.
19. Kawashima A., Matsumoto N., Honda K., Effects of manufacturing conditions on the adsorption capacity of dioxin-like polychlorinated biphenyl by bamboo charcoal and activated carbon, *J. Environ. Chem.*, 2012; 22(1): 9-14.
20. Dvoryankin D. Yu., Pervova I. G., Maslakova T. I., Klepalova I. A., Issledovanie



fiziko-himicheskikh karakteristik modificirovannykh uglerodnykh sorbentov na osnove drevesnykh othodov, *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*, 2023; 23(5): 868-878. <https://doi.org/10.17308/sorp-chrom.2023.23/11721>. (In Russ.)

21. Ho Y.S., McKay G., Kinetic models for the sorption of dye from aqueous solution by wood, *Trans IChemE*, 1998; 76(B): 183-191.

22. Ho Y.S., McKay G., Pseudo-Second Order Model for Sorption Processes, *Process Biochem.*, 1999; 34: 451-465. [https://doi.org/10.1016/S0032-9592\(98\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0032-9592(98)00112-5)

23. Nandiyanto A.B.D., Nugraha V.K., Yustia I., Ragadhita R., Fiandini M., Mejrnavati H., Vulcan D.R., Izoterma i kineticheskaya adsorbciya chastic risovoj sheluihi kak model'nogo adsorbenta dlya resheniya problem ustojchivoj dobychi zolota v rezul'tate vyshchelachivaniya rtuti, *Zapiski Gornogo instituta*, 2024; 265: 104-120. (In Russ.)

24. Greg S., Sing K. Adsorbciya. Udel'naya poverhnost'. Poristost'. Moscow, Mir Publ., 1984, 306 p. (In Russ.)

25. Adamova L.V. Sorbcionnyj metod issledovaniya poristoj struktury nanomaterialov i udel'noj poverhnosti nanorazmernykh sistem: uchebnoe posobie. Ekaterinburg, UrGU im. A.M. Gor'kogo Publ., 2008, 62 p. (In Russ.)

26. Galimova R.Z., Shajhiev I.G., Sverguzova S.V. Obrabotka rezul'tatov issledovaniya processov adsorbicii s ispol'zovaniem programmnoho obespecheniya Microsoft Excel: praktikum: uchebnoe posobie. Kazan'-Belgorod, BGTU Publ., 2017, 60 p. (In Russ.)

27. Ragadhita R., Nandiyanto A.B.D., How to calculate adsorption isotherms of particles using two-parameter monolayer adsorption models and equations, *Indonesian J. Sci. Technol.*, 2021; 6(1): 205-234. <https://doi.org/10.17509/ijost.v6i1.32354>

Информация об авторах / Information about the authors

М.Г. Первова – к.х.н., старший научный сотрудник, лаборатория фторорганических соединений, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

М.А. Саморукова – ведущий инженер-исследователь, лаборатория фторорганических соединений, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Д.Ю. Дворянкин – магистрант, кафедра физико-химической технологии защиты биосферы, Химико-технологический институт, Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

И.Г. Первова – д.х.н., профессор кафедры физико-химической технологии защиты биосферы Уральского государственного лесотехнического университета, Екатеринбург, Россия

В.И. Салоутин – член-корреспондент РАН, д.х.н., заведующий, лаборатория фторорганических соединений, Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия

M.G. Pervova – senior researcher, Laboratory of Organofluorine Compounds, Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, e-mail: pervova@ios.uran.ru, ORCID 0000-0003-4620-5418

M.A. Samorukova – leading research engineer, Laboratory of Organofluorine Compounds, Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, eremina-masha@yandex.ru, ORCID 0009-0003-2841-2760

D.Yu. Dvoryankin – master's student, Department of Physical and Chemical Technologies in environmental engineering, Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: daniil.dvoryankin.02@mail.ru, ORCID 0009-0006-8710-1446

I.G. Pervova – professor of chemistry, Department of Physical and Chemical Technologies in environmental engineering, Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia, e-mail: pervovaig@m.usfeu.ru, ORCID 0000-0002-1635-8643

V.I. Saloutin – head Laboratory of Organofluorine Compounds, Postovsky Institute of Organic Synthesis, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia, e-mail: saloutin@ios.uran.ru, ORCID 0000-0003-1976-7861

Статья поступила в редакцию 18.10.2024; одобрена после рецензирования 25.02.2025; принята к публикации 26.02.2025.

The article was submitted 18.10.2024; approved after reviewing 25.02.2025; accepted for publication 26.02.2025.