



ОСОБЕННОСТИ ДЕСТРУКЦИИ ТРИ- И ПЕНТАХЛОРБИФЕНИЛОВ И ИХ ГИДРОКСИПРОИЗВОДНЫХ ШТАММОМ *Rhodococcus opacus* KT112-7

Егорова Д.О.^{1*}, Горбунова Т.И.²

¹ Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО
РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

² Институт органического синтеза им И.Я. Постовского
УрО РАН, Екатеринбург, Россия

*E-mail: daryao@rambler.ru

FEATURES OF THE DESTRUCTION OF TRI- AND PENTACHLOROBIPHENYLS AND THEIR HYDROXY DERIVATIVES BY THE *Rhodococcus opacus* STRAIN KT112-7

Egorova D.O.^{1*}, Gorbunova T.I.²

¹ Institute of ecology and genetics of microorganisms
UB RAS, Perm, Russia

² I.Ya. Postovskii Institute of Organic Synthesis UB RAS,
Yekaterinburg, Russia

*E-mail: daryao@rambler.ru

Аннотация

Исследование направлено на установление периодов исчерпывающего биоразложения полихлорбифенилов и их гидроксипроизводных под действием аэробного штамма *Rhodococcus opacus* KT112-7. В качестве модельных соединений использованы 2,4,5-трихлорбифенил, 2,4,5,2',5'-пентахлорбифенил и синтезированные из них смеси гидроксипроизводных. Установлено, что с увеличением числа атомов хлора в исходных полихлорбифенилах время биодegradации хлораренов увеличивается: с 3 сут для 2,4,5-трихлорбифенила до 14 сут для 2,4,5,2',5'-пентахлорбифенила. Для гидроксипроизводных установлен одинаковый период биоокисления – 10 сут, но скорость убыли исходных соединений на 1, 3 и 7 сут была выше в случае более хлорированных субстратов на основе 2,4,5,2',5'-пентахлорбифенила. Представлены возможные причины различного поведения биоразлагаемых соединений с позиций их химического строения и конкурирующего действия ферментов класса оксигеназ штамма *Rhodococcus opacus* KT112-7.

Ключевые слова:

Rhodococcus, деструкция, полихлорбифенилы, гидроксипроизводные, химическая модификация

Поступила в редакцию: 21.04.2026

Принято в печать: 20.05.2026

Abstract

The study aimed to establish the periods of exhaustive polychlorobiphenyl and hydroxy derivative biodegradation under influence of the aerobic strain *Rhodococcus opacus* KT112-7. 2,4,5-Trichlorobiphenyl, 2,4,5,2',5'-pentachlorobiphenyl, and mixtures of hydroxy derivatives, synthesized from them, were used as model compounds. The biodegradation time of chloroarenes increases with an increase in the number of chlorine atoms in the original polychlorobiphenyls: from 3 days for 2,4,5-trichlorobiphenyl to 14 days for 2,4,5,2',5'-pentachlorobiphenyl. The same biooxidation period of 10 days was established for the hydroxy derivatives, but the rate of loss of the parent compounds on days 1, 3, and 7 was higher for the more chlorinated substrates based on 2,4,5,2',5'-pentachlorobiphenyl. Possible reasons for the different behavior of the biodegradable compounds are presented in terms of their chemical structure and the competing action of the oxygenase enzymes of the *Rhodococcus opacus* KT112-7 strain.

Keywords:

Rhodococcus, destruction, polychlorobiphenyls, hydroxy derivatives, chemical modification

Received: 21.04.2026

Accepted: 20.05.2026

Цитировать | Cite as

DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-15> EDN: <https://www.elibrary.ru/ktzvtc>

ВВЕДЕНИЕ

Масштабное поступление в окружающую среду полихлорбифенилов (ПХБ), относящихся к стойким органическим загрязнителям (СОЗ) и ранее широко использовавшихся в качестве диэлектриков, связано как с производственной деятельностью человека (испарение из трансформаторов, конденсаторов, сжигание промышленных и бытовых отходов), так и с халатными действиями отдельных лиц и предприятий (возгорание промышленного оборудования, вывоз на свалки, утечки с другими отходами) [Zanaveskin, Aver'yanov 1998]. По данным за период

1930–1970 г.г. эксплуатации ПХБ, произведенных в количестве более 1 млн т, 354 000 т этих ксенобиотиков попало в окружающую среду и распределилось в ней следующим образом: 27 000 т оказались в воздухе, 54 000 т – в воде и 270 000 т – на свалках [Lin *et al.* 1995].

Известно, что большинство органических ксенобиотиков в таких условиях окружающей среды как повышенная температура, обильные осадки и высокая турбулентность воздушных масс претерпевают структурную деградацию до менее опасных или неопасных соединений [de Boer *et al.* 2023]. Однако для ПХБ это устоявшееся мнение не применимо из-за физико-химических свойств этих хлораренов: высокой гидрофобности [Dunnivant, Elzerman 1988; Huang, Hong 2002; van Noort 2004; Rabodonirina *et al.* 2015], длительных периодов полураспада, измеряющихся десятками лет [Sinkkonen, Paasivirta 2000; Reddy *et al.* 2019; Mastin *et al.* 2022], термической, химической и фотолитической инертностью [Zanaveskin *et al.* 1996; Zanaveskin, Aver'yanov 1998; Gorbunova *et al.* 2010, 2023; Langford *et al.* 2011; Huang *et al.* 2013]. Совокупность данных свойств обуславливает устойчивость ПХБ к воздействию абиотических факторов и, как следствие, их длительному пребыванию в окружающей среде в неизменном виде.

Наиболее эффективным природным инструментом очистки объектов окружающей среды являются бактериальные штаммы, сформировавшиеся в биотах и способные осуществлять обезвреживание (уничтожение) ПХБ-загрязнителей [Chun *et al.* 2013; Gomes *et al.* 2013; Samadi *et al.* 2021; Hassan *et al.* 2023; Zhou *et al.* 2023]. На степень очистки зачастую могут влиять первичные метаболиты, образующиеся на начальных этапах разложения. Одними из первичных метаболитов ПХБ являются их гидроксипроизводные (НО-ПХБ), формирующиеся под действием фермента бифенил-2,3-диоксигеназы (BphA) аэробных бактерий [Xing *et al.* 2020; Khalid *et al.* 2021; Hassan *et al.* 2023; Kumari, Das 2023].

Исходные ПХБ являются опасными для растений, животных и человека и могут вызывать ряд тяжелых заболеваний (канцерогенез, гепатоз, мутагенез *и др.*), а их токсичность с увеличением числа атомов хлора увеличивается [Zanaveskin, Aver'yanov 1998]. Для НО-ПХБ строгая зависимость токсичности от строения соединения к настоящему времени не установлена, но известно, что ряд гидроксильированных производных является более токсичным, чем их хлорированные предшественники [Ptak *et al.* 2005; Sadeghi-Aliabadi *et al.* 2007; Ludewig *et al.* 2008; Kamata *et al.* 2009; Takeuchi *et al.* 2011; Tehrani *et al.* 2012; Chenchen *et al.* 2023]. Токсичность НО-ПХБ может негативно сказываться на деградативном потенциале бактериальных штаммов, полностью блокируя инициацию процесса биораспада НО-ПХБ или рост клеток, вплоть до их гибели, несмотря на дополнительно введенный ростовой косубстрат [Tehrani *et al.* 2012].

Выявление зависимости между строением НО-ПХБ, спонтанно образующихся в природе [Sun *et al.* 2016, 2018], и биодеградативным потенциалом аэробных бактерий, перспективных для создания биоремедиационных препаратов [Назаров *и др.* 2023], является актуальной задачей. Цель настоящего исследования – установить влияния особенностей строения конгенов ПХБ и синтезированных из них НО-ПХБ на степень биораспада под действием аэробного штамма *Rhodococcus opacus* KT112-7.

В РФ традиционно использовавшимися ранее были технические смеси ПХБ марок Трихлорбифенил и Совол. Именно эти смеси ПХБ сегодня находятся на территории РФ в качестве загрязнителей. Для первой смеси ПХБ характерно преобладание в ней трихлорбифенилов (47.7%), а для второй – пентахлорбифенилов (51.5%) [Горбунова *и др.* 2018]. В связи с этими особенностями объектами исследования в настоящей работе являются 2,4,5-трихлорбифенил (ПХБ 29), 2,4,5,2',5'-пентахлорбифенил (ПХБ 101), а также их гидроксипроизводные НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101 соответственно. Номера индивидуальным конгенам ПХБ присвоены в соответствии с действующей номенклатурой [Mills III *et al.* 2007].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Бактериальный штамм. Штамм *Rhodococcus opacus* KT112-7 (ВКМ Ас-2623D) выделен из почв, длительное время загрязненных соединениями группы СОЗ, и обладает высоким

биodeградативным потенциалом по отношению к ароматическим соединениям [Egorova *et al.* 2020, 2025].

ПХБ и НО-ПХБ. ПХБ 29, ПХБ 101 синтезированы по реакции Гомберга-Бахмана-Хея [Mullins *et al.* 1984], а НО-ПХБ 29, НО-ПХБ 101 – по известной методике в условиях реакции нуклеофильного замещения (S_NAr) взаимодействием ПХБ 29, ПХБ 101 с КОН в среде 2-аминоэтанола [Горбунова *и др.* 2019]. Продукты НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101 представляют собой вязкие многокомпонентные смеси, состав которых представлен в таблице 1.

Таблица 1. Состав смесей НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101 по результатам ГХ-МС и ГХ-ПИД

Table 1. Composition of mixtures of HO-PCB 29 and HO-PCB 101 according to the results of GC-MS and GC-FID

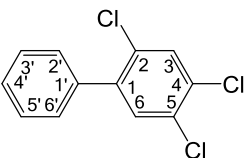
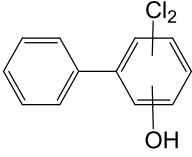
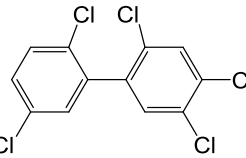
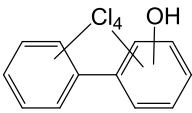
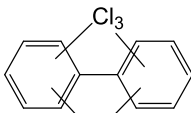
Исходный конгенер ПХБ	Формулы и состав смесей НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101, % (количество изомеров)	
	моногидроксипроизводные	дигидроксипроизводные
ПХБ 29 	 100 (3)	–
ПХБ 101 	 94.8 (3)	 5.2 (3)

Схема эксперимента по деструкции ПХБ/НО-ПХБ. Культуру штамма *R. oracus* KT112-7, предварительно выращенную в среде К1 ($K_2HPO_4 \times 3H_2O$ – 3.2 г/л, $NaH_2PO_4 \times 2H_2O$ – 0.4 г/л, $(NH_4)_2SO_4$ – 0.5 г/л, $MgSO_4 \times 7H_2O$ – 0.15 г/л, $Ca(NO_3)_2$ – 0.01 г/л) с внесением бифенила в качестве источника углерода, осаждали методом центрифугирования с последующим разведением осадка средой К1 до плотности культуры 1.5 о.е. при 600 нм (BioSpec mini, Shimadzu, Япония) и помещали 1.5 мл суспензии в стеклянные флаконы с тефлоновыми крышками объемом 5 мл (Sigma-Aldrich, Германия). Субстрат (ПХБ 29, ПХБ 101, НО-ПХБ 29, НО-ПХБ101) вносили в ацетоновом растворе до конечной концентрации 50 мг/л. Количество флаконов для каждого субстрата рассчитывали исходя из пропорции 5 флаконов на каждую точку пробоотбора. Флаконы с культурой культивировали на при +25°C, 120 об/мин (Environmental Shaker-Incubator ES 20/60, BioSan, Латвия), 14 сут. Образцы для анализа отбирали на 0, 1, 3, 7, 10 и 14 сут.

Анализ количества субстрата. Для определения количества субстрата проводили экстракцию из всего объема флакона, для чего во флакон вносили смесь конц H_2SO_4 : 12.5%-ный додецил сульфат натрия : гексан (1:10:25). Экстракцию производили в режиме встряхивания (200 об/мин) при 30°C, 120 мин. Содержимое флаконов переносили в центрифужные пробирки и центрифугировали (Mini Spin, Eppendorf, Германия) 3 мин при 11000 об/мин для лучшего разделения фаз. Для анализа отбирали гексановую фазу и обезвоживали ее внесением безводного сульфата натрия. Анализ производили на газовом хроматографе GC6890N (Agilent Technology, США) с кварцевой капиллярной колонкой HP-5MS (длина 30 м, диаметр 0,25 мм) и с масс-селективным детектором MSD5973N (Agilent Technology, США). Режим программирования температуры при проведении анализа согласно [Hernandez *et al.* 1997]. Идентификацию соединений осуществляли на основе значений масс-спектров согласно базе данных NIST. Количественную оценку проводили с использованием метода внутренней нормализации. Количество исходных соединений оценивали на основании площадей пиков, полученных при хроматографировании.

Анализ продуктов деструкции. Для выявления основных продуктов биодеструкции исходных соединений содержимое флакона переносили в центрифужную пробирку и центрифугировали при 15000 об/мин 5 мин (Mini Spin, Eppendorf, Германия). Для дальнейшего анализа отбирали надосадочную жидкость. Образование продукта *мета*-расщепления ароматического кольца фиксировали методом спектрофотометрии при сканировании образца в диапазоне волн от 390 нм до 440 нм (BioSpec mini, Shimadzu, Япония). Анализ хлор/гидроксибензойных кислот проводили методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (хроматограф LC-20AD Prominans, Shimadzu, Япония) в системе ацетонитрил – 0.1%-ная H_3PO_4 (70:30). Идентификацию осуществляли на основании сравнения со стандартными соединениями. Наличие ионов хлора в культуральной жидкости определяли методом качественной реакции ионов хлора с азотнокислым серебром и измерением оптической плотности полученной суспензии при длине волны 450 нм (BioSpec mini, Shimadzu, Япония). Количество оценивали на основании калибровочного графика [Резников и др. 1970].

Анализ путей деструкции. Наиболее вероятные пути окисления ПХБ и НО-ПХБ предложены на основании экспериментальных данных и анализа генома штамма *R. opacus* KT112-7 с использованием международных баз KEGG (<http://www.genome.jp>) и GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>).

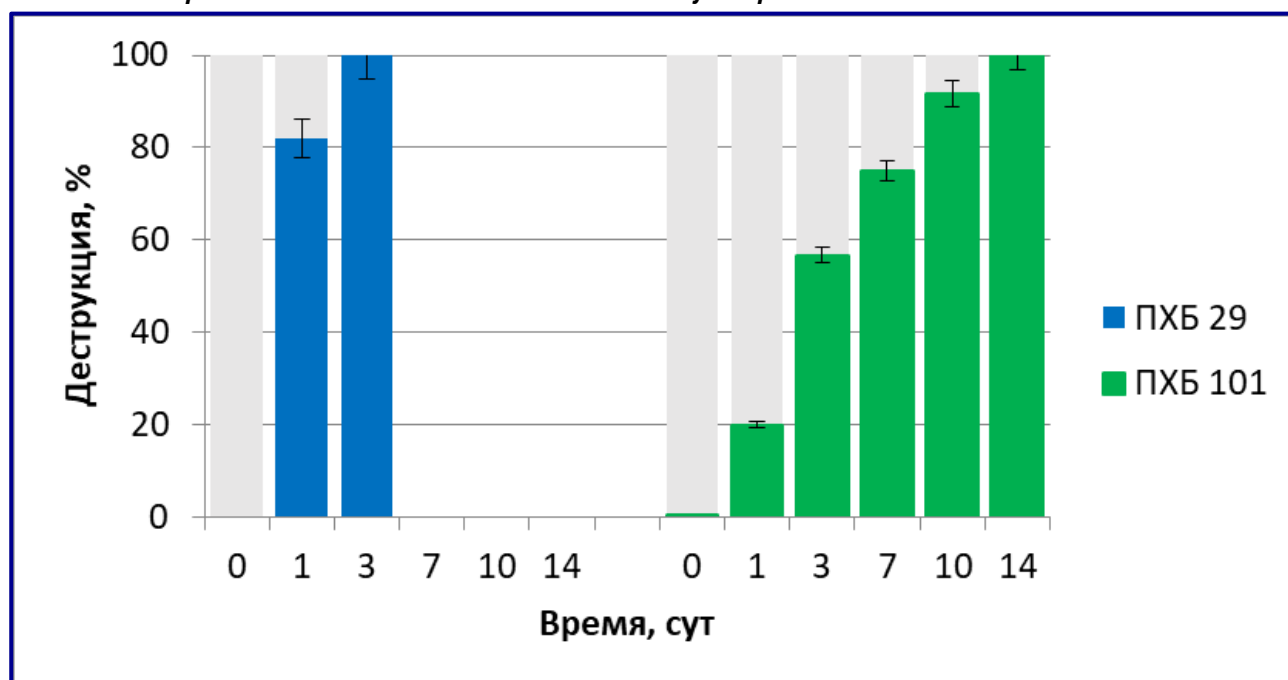
Статистический анализ проводили с использованием программного пакета MS Excel с дополнительными надстройками «Анализ данных» и «Kutools».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетние исследования процессов аэробной бактериальной трансформации ПХБ показали, что окисление молекулы ПХБ предпочтительнее происходит по ароматическому кольцу, свободному от заместителей, либо по кольцу, в котором есть два незамещенных вицинальных атома углерода [Gorbunova et al. 2024]. Используемые в настоящей работе конгенеры ПХБ 29 и ПХБ 101 имеют одинаковое расположение заместителей в одном из колец молекулы (положения 2, 4, 5), при этом у ПХБ 29 второе кольцо не несет заместителей, а у ПХБ 101 во втором кольце атомы хлора располагаются в 2' и 5' положениях (табл. 1). Установлено, что аэробный бактериальный штамм *R. opacus* KT112-7 осуществляет разложение ПХБ 29 за 3 сут, а ПХБ 101 за 14 сут (рис. 1).

Рисунок 1. Деструкция конгенов ПХБ штаммом *R. opacus* KT112-7

Figure 1. Degradation of PCB congeners by *R. opacus* strain KT112-7



Анализ метаболитов показал, что при разложении ПХБ 29 и ПХБ 101 в среде аккумулируется 2,4,5-трихлорбензойная кислота. Свободные ионы хлора в культуральной жидкости были зафиксированы только в случае биодеструкции ПХБ 101 в количестве 27.1% от максимально возможного при полном разложении внесенного субстрата. Накопления детектируемых количеств продукта *meta*-расщепления ароматического кольца ПХБ 29 и ПХБ 101 не зафиксированы.

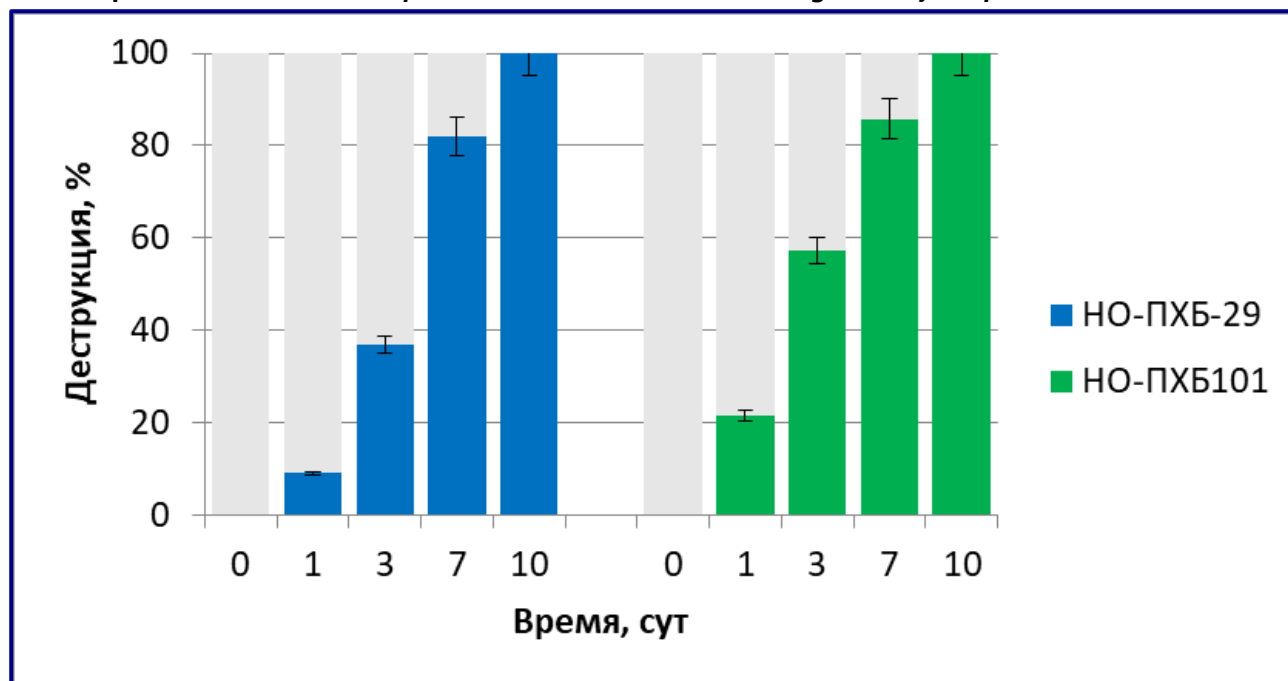
Полученные результаты позволяют предположить, что биодеструкция данных конгенов осуществляется штаммом *R. oracus* KT112-7 по классическому пути аэробной бактериальной деструкции бифенила [Xing *et al.* 2020; Khalid *et al.* 2021; Kumari, Das 2023]. При этом бифенил-2,3-диоксигеназа (BphA) штамма *R. oracus* KT112-7 предпочтительнее атакует незамещенное кольцо молекулы ПХБ 29, очевидно, образуя классический *cis*-2,3-дигидрокси-2,3-дигидробифенил (диол). Появление заместителей в 2' и 5' положениях второго ароматического цикла в случае ПХБ 101 приводит к отсутствию двух свободных вицинальных углеродных атомов, что затрудняет взаимодействие хлорарена с ферментом BphA. Аналогичный вывод можно сделать относительно тризамещенного кольца в ПХБ 101.

Ранее показано, что штамм *R. oracus* KT112-7 несет гены классической бифенил-2,3-диоксигеназы, характеризующейся высоким уровнем сходства с бифенил-2,3-диоксигеназой штамма-деструктора ПХБ *Rhodococcus jostii* RHA1, окисляющей вицинальные атомы углерода в молекуле ПХБ в 2 и 3 положениях [Egorova *et al.* 2025]. Таким образом, различие в скорости деструкции ПХБ 29 и ПХБ 101 штаммом *R. oracus* KT112-7 обусловлено различиями в строении молекул данных конгенов.

Не смотря на инертность ПХБ к физическому и химическому воздействию, длительное присутствие в окружающей среде приводит к их трансформации как под действием абиотических, так и под действием биотических факторов. Результатом такого воздействия является образование и накопление в природных средах НО-ПХБ [Sun *et al.* 2016, 2018]. Для моделирования процессов бактериальной деструкции НО-ПХБ в настоящем исследовании были использованы смеси НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101 (табл. 1). Установлено, что штамм *R. oracus* KT112-7 осуществляет 100%-ную деструкцию данных смесей за 10 сут (рис. 2).

Рисунок 2. Деструкция гидрокси-производных конгенов ПХБ штаммом *R. oracus* KT112-7

Figure 2. Degradation of hydroxy derivatives of PCB congeners by *R. oracus* strain KT112-7



В результате ВЭЖХ-анализа установлено, что при разложении смеси НО-ПХБ 29 в среде культивирования детектируются моногидроксидихлорбензойные кислоты, при этом не выявлено

присутствие продуктов *meta*-расщепления НО-ПХБ 29 и свободных ионов хлора. Полученные данные позволяют предположить, что деструкция НО-ПХБ 29 штаммом *R. opacus* KT112-7 протекает также по классическому бифенильному пути с окислением незамещенного кольца. Существенное увеличение времени деструкции может быть обусловлено токсичностью моногидроксилированных бифенилов. В работе [Bhalla et al. 2016] показано, что особую токсичность проявляют дихлорированные моногидроксибифенилы, у которых НО-группа расположена у 2 или 4 атома углерода. В смеси НО-ПХБ 29 могут присутствовать соединения с подобным расположением НО-группы (табл. 1). В отсутствие стандартных образцов для анализа методом ГХ-МС установить индексы локантов для НО-ПХБ после их синтеза не представляется возможным.

При анализе метаболитов, образующихся при биодеструкции смеси НО-ПХБ 101, выявлено присутствие продукта *meta*-расщепления, характеризующегося максимальным поглощением при длине волны 417 нм, ионов хлора (43.7% от максимально возможного), моногидроксидихлорбензойных кислот, а также зарегистрированы незначительные количества 2,5-дигидроксибензойной кислоты. Кроме того, на ВЭЖХ-хроматограммах присутствуют дополнительные пики, которые могут свидетельствовать о наличии в среде дигидроксимонохлорированных бензойных кислот. Однако, так как в исследовании не были использованы в качестве контрольных соединений вещества с подобной структурой молекулы, мы можем лишь предположить их присутствие.

На примере смеси НО-ПХБ 29 показано, что появление НО-группы приводит к снижению скорости биодеструкции. Однако сравнение периода 100%-ной деструкции ПХБ 101 и НО-ПХБ 101 свидетельствует об обратной закономерности. Данное явление может быть обусловлено несколькими факторами. Вероятно, в составе смеси НО-ПХБ 101 присутствует соединение, в котором две НО-группы расположены в одном кольце в 3' и 4' положениях. Известно, что штамм *R. opacus* KT112-7 несет гены, кодирующие три фермента бифенил-диол-диоксигеназ [Egorova et al. 2025]. Данный фермент может вступать в реакцию с дигидроксилированным трихлорбифенилом в случае расположения НО-групп у соседних углеродных атомов, тем самым ускоряя процесс деструкции смеси в целом. Кроме того, так как мы не выявили среди метаболитов трихлорированных бензойных кислот, но обнаружили 2,5-дигидроксибензойную кислоту, можно предположить, что бифенил-диоксигеназа штамма *R. opacus* KT112-7 способна окислять трихлорированное кольцо молекулы НО-ПХБ 101 в случае, если НО-группа располагается в дизамещенном кольце. Присутствие среди метаболитов моногидроксидихлорбензойных кислот свидетельствует об окислении дихлорированного кольца молекулы НО-ПХБ 101, как и в случае исходного ПХБ 101. Ранее в результате моделирования бифенил-диоксигеназы штамма *R. opacus* KT112-7 было показано, что при взаимодействии с моногидроксибифенилами, наилучшее сродство фермента и субстрата характерно для 3- и 4-гидроксибифенилов [Egorova et al. 2025]. Так как в смеси НО-ПХБ 101 вероятно присутствие соединений с таким же расположением НО-группы, можно предположить, что бифенил-диоксигеназа успешно осуществляет их диоксигенирование.

В ряде работ показано, что в аэробном бактериальном окислении ПХБ и их НО-ПХБ могут принимать участие ферменты класса монооксигеназ рамках [Kanteev et al. 2015; Luo et al. 2016; Perruchon et al. 2017; Goto et al. 2018; Sun et al. 2018; Paul et al. 2021]. При взаимодействии ПХБ с монооксигеназами образуются моногидроксилированные ПХБ, тогда как в случае, если монооксигеназы окисляют моногидроксибифенилы, результатом взаимодействия являются дигидроксилированные хлорбифенилы, которые далее могут разрушиться ферментами основного бифенильного пути. Анализ генома штамма *R. opacus* KT112-7 (GenBank Accession: PRJNA603644 ID: 603644) показал наличие в хромосоме штамма 57 генов флавиновых монооксигеназ, а на плазмиде pRHWK1 – 4 гена флавиновых монооксигеназ. В настоящего исследования не представляется возможным установить, какие из выявленных генов кодируют ферменты, участвующие в окислении НО-ПХБ, однако наличие данных генов позволяет предполагать, что у штамма *R. opacus* KT112-7 в разложении НО-ПХБ принимают участие не только ферменты класса диоксигеназ, но и представители класса монооксигеназ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании представленных результатов можно заключить, что бактериальный аэробный штамм *R. oracus* KT112-7 способен к биодеструкции ПХБ и их первичных метаболитов НО-ПХБ и обладает мощным биодеградативным потенциалом. На скорость биораспада хлорорганических СОЗ и вторичных поллютантов огромное влияние оказывает их структурное строение. На примере конгенеров ПХБ 29 и ПХБ 101 установлено, что с увеличением количества атомов хлора в бифенильном каркасе время биодеградации увеличивается: для ПХБ 29 оно составило 3 сут, а для ПХБ 101 – 14 сут. Для вторичных поллютантов НО-ПХБ 29 и НО-ПХБ 101 зарегистрирован одинаковый период исчерпывающего биоокисления – 10 сут. Несмотря на большее содержание атомов хлора в смеси НО-ПХБ 101 скорость ее распада за 1, 3 и 7 сут была выше, чем в случае смеси НО-ПХБ 29, что может объясняться рядом факторов: большей токсичностью производных в смеси НО-ПХБ 29 по сравнению с компонентами смеси НО-ПХБ 101 и конкурирующим действием ферментов классов моно- и диоксигеназ штамма *R. oracus* KT112-7, связанным с доступностью активных сайтов в биоразлагаемых соединениях.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки РФ № 124020500028-4 «Биоразнообразие микроорганизмов антропогенно загрязненных экосистем и функционально-генетические механизмы их адаптации к стрессовым условиям окружающей среды» (биологическая часть) и № 124020500047-5 «Разработка подходов к полифтор(хлор)содержащим (гет)аренам в вещества прикладного назначения» (синтетическая часть).

Конфликт интересов | Conflicts of Interest

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Горбунова Т.И., Первова М.Г., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. (2018) Химическая функционализация полихлорированных бифенилов: новые достижения. Издательство Уральского федерального университета. Екатеринбург: 727. EDN: [PXVULW](#)
- Горбунова Т.И., Первова М.Г., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. (2019) Реагентная подготовка полихлорбифенилов к уничтожению. *Журнал прикладной химии*. **92**(7): 947–952. <https://doi.org/10.1134/S004446181907017X> EDN: [NXTSVK](#)
- Назаров А.М., Туктарова И.О., Давлетшин Т.К., Четвериков С.П. (2023) Получение и исследование эффективности комплексного биопрепарата на основе штамма бактерий *Rhodococcus* sp. Н33, гуматов и лигносульфонатов для очистки нефтезагрязненных земель. *Нефтегазовое дело*. **21**(6): 310–321. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-310-321> EDN: [OHBUOH](#)
- Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. (1970) Методы анализа природных вод. Недра. Москва: 488.
- Bhalla R., Tehrani R., Van Aken B. (2016) Toxicity of hydroxylated polychlorinated biphenyls (HO-PCBs) using the bioluminescent assay Microtox®. *Ecotoxicology*. **25**(7): 1438–1444. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1693-z> EDN: [KJONON](#)
- Chenchen H., Keqi H., Yanhong Z., Yiye J., Yankuan T., Xiaojun L., Bixian M. (2023) *In vitro* hepatic metabolism of polychlorinated biphenyls with different chlorine-substituted structures in rats and humans: Kinetics, metabolism, and potential nuclear receptor affinities. *Science of The Total Environment*. **864**: 161043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161043> EDN: [CYFFAP](#)
- Chun C.L., Payne R.B., Sowers K.R., May H.D. (2013) Electrical stimulation of microbial PCB degradation in sediment. *Water Research*. **47**(1): 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.038>
- de Boer J., van Dijk R., Abalos M., Abad E. (2023) Persistent organic pollutants in air from Asia, Africa, Latin America, and the Pacific. *Chemosphere*. **324**: 138271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138271> EDN: [XEYSUO](#)

- Dunnivant F.M., Elzerman A.W. (1988) Aqueous solubility and Henry's law constant data for PCB congeners for evaluation of quantitative structure-property relationships (QSPRs). *Chemosphere*. **17**(3): 525–541. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(88\)90028-8](https://doi.org/10.1016/0045-6535(88)90028-8)
- Egorova D., Olsson B., Kir'yanova T., Plotnikova E. (2025) An Assessment of the Degradation Potential and Genomic Insights Towards Hydroxylated Biphenyls by *Rhodococcus opacus* Strain KT112-7. *Current Genomics*. **26**(5): 341–358. <https://doi.org/10.2174/0113892029319746240812051356> EDN: YDSHKS
- Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2020) Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains. *Journal of Hazardous Materials*. **400**: 123328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328> EDN: YAMJTU
- Gomes H.I., Dias-Ferreira C., Ribeiro A.B. (2013) Overview of *in situ* and *ex situ* remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. *Science of The Total Environment*. **445–446**: 237–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.098> EDN: RHYNZN
- Gorbunova T.I., Egorova D.O., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2024) Aerobic bacterial degradation of polychlorinated biphenyls and their hydroxy and methoxy derivatives. *Russian Chemical Reviews*. **93**(11): RCR5138. <https://doi.org/10.59761/RCR5138> EDN: OPSNNG
- Gorbunova T.I., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2010) Chemical methods of transformation of polychlorobiphenyls. *Russian Chemical Reviews*. **79**(6): 511–530. <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n06ABEH004047> EDN: OBUEAF
- Gorbunova T.I., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2023) Photolytic transformations of polychlorobiphenyls. *Russian Chemical Bulletin*. **72**(12): 2769–2790. <https://doi.org/10.1007/s11172-023-4086-5> EDN: HLCHZP
- Goto E., Haga Y., Kubo M., Itoh T., Kasai C., Shoji O., Yamamoto K., Matsumura C., Nakano T., Inui H. (2018) Metabolic enhancement of 2,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl (CB118) using cytochrome P450 monooxygenase isolated from soil bacterium under the presence of perfluorocarboxylic acids (PFCAs) and the structural basis of its metabolism. *Chemosphere*. **210**: 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.026>
- Hassan A., Hamid F.S., Pariatamby A., Suhaimi N.S.M., Razali N.M. binti M., Ling K.N.H., Mohan P. (2023) Bioaugmentation-assisted bioremediation and biodegradation mechanisms for PCB in contaminated environments: A review on sustainable clean-up technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **11**(3): 110055. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110055> EDN: NTHFRO
- Hernandez B.S., Koh S.-C., Chial M., Focht D.D. (1997) Terpene-utilizing isolates and their relevance to enhanced biotransformation of polychlorinated biphenyls in soil. *Biodegradation*. **8**(3): 153–158. <https://doi.org/10.1023/A:1008255218432> EDN: AJTPCI
- Huang L., Dong W., Hou H. (2013) Photochemical reaction of 2-chlorobiphenyl with N(III) ($\text{H}_2\text{ONO}^+/\text{HONO}/\text{NO}_2^-$) in acidic environment studied by using co-linear laser flash photolysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **268**: 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.06.016> EDN: SSIWAH
- Huang Q., Hong C.-S. (2002) Aqueous solubilities of non-ortho and mono-ortho PCBs at four temperatures. *Water Research*. **36**(14): 3543–3552. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00071-4) EDN: BAZPCL
- Kamata R., Shiraishi F., Nakajima D., Takigami H., Shiraishi H. (2009) Mono-hydroxylated polychlorinated biphenyls are potent aryl hydrocarbon receptor ligands in recombinant yeast cells. *Toxicology in Vitro*. **23**(4): 736–743. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.03.004> EDN: VOOCXF
- Kanteev M., Bregman-Cohen A., Deri B., Shahar A., Adir N., Fishman A. (2015) A crystal structure of 2-hydroxybiphenyl 3-monooxygenase with bound substrate provides insights into the enzymatic mechanism. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*. **1854**(12): 1906–1913. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2015.08.002>
- Khalid F., Hashmi M.Z., Jamil N., Qadir A., Ali M.I. (2021) Microbial and enzymatic degradation of PCBs from e-waste-contaminated sites: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. **28**(9): 10474–10487. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11996-2> EDN: VDFJGS
- Kumari S., Das S. (2023) Bacterial enzymatic degradation of recalcitrant organic pollutants: catabolic pathways and genetic regulations. *Environmental Science and Pollution Research*. **30**(33): 79676–79705. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28130-7> EDN: CJCJYY

- Langford C.H., Achari G., Izadifard M. (2011) Wavelength dependence of luminescence and quantum yield in dechlorination of PCBs. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **222**(1): 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.04.028>
- Lin Y., Gupta G., Baker J. (1995) Photodegradation of polychlorinated biphenyl congeners using simulated sunlight and diethylamine. *Chemosphere*. **31**(5): 3323–3344. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00177-A](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00177-A) EDN: AOYVHX
- Ludewig G., Lehmann L., Esch H., Robertson L.W. (2008) Metabolic activation of PCBs to carcinogens in vivo—A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. **25**(2): 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2007.10.029>
- Luo A., Wu Y.-R., Xu Y., Kan J., Qiao J., Liang L., Huang T., Hu Z. (2016) Characterization of a cytochrome P450 monooxygenase capable of high molecular weight PAHs oxidation from *Rhodococcus* sp. P14. *Process Biochemistry*. **51**(12): 2127–2133. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.024>
- Mastin J., Harner T., Schuster J.K., South L. (2022) A review of PCB-11 and other unintentionally produced PCB congeners in outdoor air. *Atmospheric Pollution Research*. **13**(4): 101364. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101364> EDN: YMWNEM
- Mills III S.A., Thal D.I., Barney J. (2007) A summary of the 209 PCB congener nomenclature. *Chemosphere*. **68**(9): 1603–1612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.052> EDN: KIASFN
- Mullins M.D., Pochini C.M., McCrindle Shelia., Romkes Marjorie., Safe S.H., Safe L.M. (1984) High-resolution PCB analysis: synthesis and chromatographic properties of all 209 PCB congeners. *Environmental Science & Technology*. **18**(6): 468–476. <https://doi.org/10.1021/es00124a014>
- Paul C.E., Eggerichs D., Westphal A.H., Tischler D., van Berkel W.J.H. (2021) Flavoprotein monooxygenases: Versatile biocatalysts. *Biotechnology Advances*. **51**: 107712. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107712> EDN: RWJPOT
- Perruchon C., Vasileiadis S., Rousidou C., Papadopoulou E.S., Tanou G., Samiotaki M., Garagounis C., Molassiotis A., Papadopoulou K.K., Karpouzas D.G. (2017) Metabolic pathway and cell adaptation mechanisms revealed through genomic, proteomic and transcription analysis of a *Sphingomonas haloaromaticamans* strain degrading ortho-phenylphenol. *Scientific Reports*. **7**(1): 6449. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06727-6> EDN: YFOSPC
- Ptak A., Ludewig G., Lehmler H.-J., Wójtowicz A.K., Robertson L.W., Gregoraszczyk E.L. (2005) Comparison of the actions of 4-chlorobiphenyl and its hydroxylated metabolites on estradiol secretion by ovarian follicles in primary cells in culture. *Reproductive Toxicology*. **20**(1): 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2004.12.003>
- Rabodonirina S., Net S., Ouddane B., Merhaby D., Dumoulin D., Popescu T., Ravelonandro P. (2015) Distribution of persistent organic pollutants (PAHs, Me-PAHs, PCBs) in dissolved, particulate and sedimentary phases in freshwater systems. *Environmental Pollution*. **206**: 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.023> EDN: XLEOOL
- Reddy A.V.B., Moniruzzaman M., Aminabhavi T.M. (2019) Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. *Chemical Engineering Journal*. **358**: 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205> EDN: WWVSZO
- Sadeghi-Aliabadi H., Chan K., Lehmler H.-J., Robertson L.W., O'Brien P.J. (2007) Molecular cytotoxic mechanisms of catecholic polychlorinated biphenyl metabolites in isolated rat hepatocytes. *Chemico-Biological Interactions*. **167**(3): 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2007.02.011>
- Samadi A., Pour A.K., Jamieson R. (2021) Development of remediation technologies for organic contaminants informed by QSAR/QSPR models. *Environmental Advances*. **5**: 100112. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100112> EDN: VAQVHD
- Sinkkonen S., Paasivirta J. (2000) Degradation half-life times of PCDDs, PCDFs and PCBs for environmental fate modeling. *Chemosphere*. **40**(9–11): 943–949. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00337-9) EDN: AEMDWN
- Sun J., Pan L., Zhu L. (2018) Formation of hydroxylated and methoxylated polychlorinated biphenyls by *Bacillus subtilis*: New insights into microbial metabolism. *Science of The Total Environment*. **613–614**: 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.063>
- Sun J., Zhu L., Pan L., Wei Z., Song Y., Zhang Y., Qu L., Zhan Y. (2016) Detection of methoxylated and hydroxylated polychlorinated biphenyls in sewage sludge in China with evidence for their microbial transformation. *Scientific Reports*. **6**(1): 29782. <https://doi.org/10.1038/srep29782> EDN: UKNJNI
- Takeuchi S., Shiraishi F., Kitamura S., Kuroki H., Jin K., Kojima H. (2011) Characterization of steroid hormone receptor activities in 100 hydroxylated polychlorinated biphenyls, including congeners identified in humans. *Toxicology*. **289**(2–3): 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.08.001>

- Tehrani R., Lyv M.M., Kaveh R., Schnoor J.L., Aken B. (2012) Biodegradation of mono-hydroxylated PCBs by Burkholderia xenovorans. *Biotechnology Letters*. **34**(12): 2247–2252. <https://doi.org/10.1007/s10529-012-1037-x> EDN: SWFYIT
- van Noort P.C.M. (2004) Comment on “Aqueous solubilities of non- and mono-ortho PCBs at four temperatures”. *Water Research*. **38**(16): 3643–3644. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00400-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00400-7) EDN: KHWNXT
- Xing Z., Hu T., Xiang Y., Qi P., Huang X. (2020) Degradation Mechanism of 4-Chlorobiphenyl by Consortium of Pseudomonas sp. Strain CB-3 and Comamonas sp. Strain CD-2. *Current Microbiology*. **77**(1): 15–23. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01791-9> EDN: TJHZZ
- Zanaveskin L.N., Aver'yanov V.A. (1998) Polychlorobiphenyls: problems of the pollution of the environment and technological neutralisation methods. *Russian Chemical Reviews*. **67**(8): 713–724. <https://doi.org/10.1070/RC1998v067n08ABEH000412> EDN: LFAZXP
- Zanaveskin L.N., Aver'yanov V.A., Treger Y.A. (1996) Prospects for the development of methods for the processing of organohalogen waste. Characteristic features of the catalytic hydrogenolysis of halogen-containing compounds. *Russian Chemical Reviews*. **65**(7): 617–624. <https://doi.org/10.1070/RC1996v065n07ABEH000271> EDN: LDUYHT
- Zhou X., Zhang S., Wang R., An Z., Sun F., Shen C., Lin H., Su X. (2023) A novel strategy for enhancing bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil with resuscitation promoting factor and resuscitated strain. *Journal of Hazardous Materials*. **447**: 130781. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130781> EDN: ACNHOM

REFERENCES

- Gorbunova T.I., Pervova M.G., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2018) Chemical functionalization of polychlorinated biphenyls: new achievements [Khimicheskaya funktsionalizatsiya polikhlorirovannykh bifenilov: novye dostizheniya]. Ural Federal University Publishing. Ekaterinburg: 727. EDN: PXVULW (in Russian)
- Gorbunova T.I., Pervova M.G., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2019) Reagent pretreatment of polychlorobiphenyls prior to breakdown [Reagentnaya predpodgotovka polikhlorobifenilov k unichtozheniyu]. *Zhurnal prikladnoj himii*. **92**(7): 947–952. <https://doi.org/10.1134/S004446181907017X> EDN: NXTSVK (in Russian)
- Nazarov A.M., Tuktarova I.O., Davletshin T.K., Chetverikov S.P. (2023) Processing and research of effectiveness of new biopreparates based on *Rhodococcus* sp. H33, gumates and lignosulfonates for the cleaning of neftezainously contaminated soils. *Petroleum Engineering*. **21**(6): 310–321. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2023-6-310-321> EDN: OHBUQH (in Russian)
- Reznikov A.A., Mulikovskaya E.P., Sokolov I.Yu. (1970) Methods of natural water analysis [Metody analiza prirodnykh vod]. Nedra Publishing. Moscow: 488. (in Russian)
- Bhalla R., Tehrani R., Van Aken B. (2016) Toxicity of hydroxylated polychlorinated biphenyls (HO-PCBs) using the bioluminescent assay Microtox®. *Ecotoxicology*. **25**(7): 1438–1444. <https://doi.org/10.1007/s10646-016-1693-z> EDN: KJONON
- Chenchen H., Keqi H., Yanhong Z., Yiye J., Yankuan T., Xiaojun L., Bixian M. (2023) *In vitro* hepatic metabolism of polychlorinated biphenyls with different chlorine-substituted structures in rats and humans: Kinetics, metabolism, and potential nuclear receptor affinities. *Science of The Total Environment*. **864**: 161043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161043> EDN: CYFFAP
- Chun C.L., Payne R.B., Sowers K.R., May H.D. (2013) Electrical stimulation of microbial PCB degradation in sediment. *Water Research*. **47**(1): 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.038>
- de Boer J., van Dijk R., Abalos M., Abad E. (2023) Persistent organic pollutants in air from Asia, Africa, Latin America, and the Pacific. *Chemosphere*. **324**: 138271. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138271> EDN: XEYSUO
- Dunnivant F.M., Elzerman A.W. (1988) Aqueous solubility and Henry's law constant data for PCB congeners for evaluation of quantitative structure-property relationships (QSPRs). *Chemosphere*. **17**(3): 525–541. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(88\)90028-8](https://doi.org/10.1016/0045-6535(88)90028-8)
- Egorova D., Olsson B., Kir'yanova T., Plotnikova E. (2025) An Assessment of the Degradation Potential and Genomic Insights Towards Hydroxylated Biphenyls by *Rhodococcus opacus* Strain KT112-7. *Current Genomics*. **26**(5): 341–358. <https://doi.org/10.2174/0113892029319746240812051356> EDN: YDSHKS
- Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2020) Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains. *Journal of Hazardous Materials*. **400**: 123328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328> EDN: YAMJTU

- Gomes H.I., Dias-Ferreira C., Ribeiro A.B. (2013) Overview of *in situ* and *ex situ* remediation technologies for PCB-contaminated soils and sediments and obstacles for full-scale application. *Science of The Total Environment*. **445–446**: 237–260. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.098> EDN: RHYNZN
- Gorbunova T.I., Egorova D.O., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2024) Aerobic bacterial degradation of polychlorinated biphenyls and their hydroxy and methoxy derivatives. *Russian Chemical Reviews*. **93**(11): RCR5138. <https://doi.org/10.59761/RCR5138> EDN: OPSNNG
- Gorbunova T.I., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2010) Chemical methods of transformation of polychlorobiphenyls. *Russian Chemical Reviews*. **79**(6): 511–530. <https://doi.org/10.1070/RC2010v079n06ABEH004047> EDN: OBUEAF
- Gorbunova T.I., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. (2023) Photolytic transformations of polychlorobiphenyls. *Russian Chemical Bulletin*. **72**(12): 2769–2790. <https://doi.org/10.1007/s11172-023-4086-5> EDN: HLCHZP
- Goto E., Haga Y., Kubo M., Itoh T., Kasai C., Shoji O., Yamamoto K., Matsumura C., Nakano T., Inui H. (2018) Metabolic enhancement of 2,3',4,4',5-pentachlorobiphenyl (CB118) using cytochrome P450 monooxygenase isolated from soil bacterium under the presence of perfluorocarboxylic acids (PFCAs) and the structural basis of its metabolism. *Chemosphere*. **210**: 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.026>
- Hassan A., Hamid F.S., Pariatamby A., Suhaimi N.S.M., Razali N.M. binti M., Ling K.N.H., Mohan P. (2023) Bioaugmentation-assisted bioremediation and biodegradation mechanisms for PCB in contaminated environments: A review on sustainable clean-up technologies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. **11**(3): 110055. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110055> EDN: NTHFRO
- Hernandez B.S., Koh S.-C., Chial M., Focht D.D. (1997) Terpene-utilizing isolates and their relevance to enhanced biotransformation of polychlorinated biphenyls in soil. *Biodegradation*. **8**(3): 153–158. <https://doi.org/10.1023/A:1008255218432> EDN: AJTPCI
- Huang L., Dong W., Hou H. (2013) Photochemical reaction of 2-chlorobiphenyl with N(III) ($H_2ONO^+/HONO/NO_2^-$) in acidic environment studied by using co-linear laser flash photolysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **268**: 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2013.06.016> EDN: SSIWAH
- Huang Q., Hong C.-S. (2002) Aqueous solubilities of non-ortho and mono-ortho PCBs at four temperatures. *Water Research*. **36**(14): 3543–3552. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00071-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00071-4) EDN: BAZPCL
- Kamata R., Shiraishi F., Nakajima D., Takigami H., Shiraishi H. (2009) Mono-hydroxylated polychlorinated biphenyls are potent aryl hydrocarbon receptor ligands in recombinant yeast cells. *Toxicology in Vitro*. **23**(4): 736–743. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2009.03.004> EDN: VOOCXF
- Kanteev M., Bregman-Cohen A., Deri B., Shahar A., Adir N., Fishman A. (2015) A crystal structure of 2-hydroxybiphenyl 3-monooxygenase with bound substrate provides insights into the enzymatic mechanism. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*. **1854**(12): 1906–1913. <https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2015.08.002>
- Khalid F., Hashmi M.Z., Jamil N., Qadir A., Ali M.I. (2021) Microbial and enzymatic degradation of PCBs from e-waste-contaminated sites: a review. *Environmental Science and Pollution Research*. **28**(9): 10474–10487. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11996-2> EDN: VDFJGS
- Kumari S., Das S. (2023) Bacterial enzymatic degradation of recalcitrant organic pollutants: catabolic pathways and genetic regulations. *Environmental Science and Pollution Research*. **30**(33): 79676–79705. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28130-7> EDN: CJCJYY
- Langford C.H., Achari G., Izadifard M. (2011) Wavelength dependence of luminescence and quantum yield in dechlorination of PCBs. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. **222**(1): 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2011.04.028>
- Lin Y., Gupta G., Baker J. (1995) Photodegradation of polychlorinated biphenyl congeners using simulated sunlight and diethylamine. *Chemosphere*. **31**(5): 3323–3344. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(95\)00177-A](https://doi.org/10.1016/0045-6535(95)00177-A) EDN: AOYVHX
- Ludewig G., Lehmann L., Esch H., Robertson L.W. (2008) Metabolic activation of PCBs to carcinogens in vivo—A review. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. **25**(2): 241–246. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2007.10.029>
- Luo A., Wu Y.-R., Xu Y., Kan J., Qiao J., Liang L., Huang T., Hu Z. (2016) Characterization of a cytochrome P450 monooxygenase capable of high molecular weight PAHs oxidation from *Rhodococcus* sp. P14. *Process Biochemistry*. **51**(12): 2127–2133. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.07.024>

- Mastin J., Harner T., Schuster J.K., South L. (2022) A review of PCB-11 and other unintentionally produced PCB congeners in outdoor air. *Atmospheric Pollution Research*. **13**(4): 101364. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101364> EDN: YMWNEM
- Mills III S.A., Thal D.I., Barney J. (2007) A summary of the 209 PCB congener nomenclature. *Chemosphere*. **68**(9): 1603–1612. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.03.052> EDN: KIASFN
- Mullins M.D., Pochini C.M., McCrindle Shelia., Romkes Marjorie., Safe S.H., Safe L.M. (1984) High-resolution PCB analysis: synthesis and chromatographic properties of all 209 PCB congeners. *Environmental Science & Technology*. **18**(6): 468–476. <https://doi.org/10.1021/es00124a014>
- Paul C.E., Eggerichs D., Westphal A.H., Tischler D., van Berkel W.J.H. (2021) Flavoprotein monooxygenases: Versatile biocatalysts. *Biotechnology Advances*. **51**: 107712. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2021.107712> EDN: RWJPOT
- Perruchon C., Vasileiadis S., Rousidou C., Papadopoulou E.S., Tanou G., Samiotaki M., Garagounis C., Molassiotis A., Papadopoulou K.K., Karpouzas D.G. (2017) Metabolic pathway and cell adaptation mechanisms revealed through genomic, proteomic and transcription analysis of a *Sphingomonas haloaromaticamans* strain degrading ortho-phenylphenol. *Scientific Reports*. **7**(1): 6449. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06727-6> EDN: YFOSPC
- Ptak A., Ludewig G., Lehmler H.-J., Wójtowicz A.K., Robertson L.W., Gregoraszczyk E.L. (2005) Comparison of the actions of 4-chlorobiphenyl and its hydroxylated metabolites on estradiol secretion by ovarian follicles in primary cells in culture. *Reproductive Toxicology*. **20**(1): 57–64. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2004.12.003>
- Rabodonirina S., Net S., Ouddane B., Merhaby D., Dumoulin D., Popescu T., Ravelonandro P. (2015) Distribution of persistent organic pollutants (PAHs, Me-PAHs, PCBs) in dissolved, particulate and sedimentary phases in freshwater systems. *Environmental Pollution*. **206**: 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.06.023> EDN: XLEOOL
- Reddy A.V.B., Moniruzzaman M., Aminabhavi T.M. (2019) Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. *Chemical Engineering Journal*. **358**: 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205> EDN: WWVSZO
- Sadeghi-Aliabadi H., Chan K., Lehmler H.-J., Robertson L.W., O'Brien P.J. (2007) Molecular cytotoxic mechanisms of catecholic polychlorinated biphenyl metabolites in isolated rat hepatocytes. *Chemico-Biological Interactions*. **167**(3): 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2007.02.011>
- Samadi A., Pour A.K., Jamieson R. (2021) Development of remediation technologies for organic contaminants informed by QSAR/QSPR models. *Environmental Advances*. **5**: 100112. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100112> EDN: VAOVHD
- Sinkkonen S., Paasivirta J. (2000) Degradation half-life times of PCDDs, PCDFs and PCBs for environmental fate modeling. *Chemosphere*. **40**(9–11): 943–949. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00337-9) EDN: AEMDWN
- Sun J., Pan L., Zhu L. (2018) Formation of hydroxylated and methoxylated polychlorinated biphenyls by *Bacillus subtilis*: New insights into microbial metabolism. *Science of The Total Environment*. **613–614**: 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.063>
- Sun J., Zhu L., Pan L., Wei Z., Song Y., Zhang Y., Qu L., Zhan Y. (2016) Detection of methoxylated and hydroxylated polychlorinated biphenyls in sewage sludge in China with evidence for their microbial transformation. *Scientific Reports*. **6**(1): 29782. <https://doi.org/10.1038/srep29782> EDN: UKNJNI
- Takeuchi S., Shiraishi F., Kitamura S., Kuroki H., Jin K., Kojima H. (2011) Characterization of steroid hormone receptor activities in 100 hydroxylated polychlorinated biphenyls, including congeners identified in humans. *Toxicology*. **289**(2–3): 112–121. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2011.08.001>
- Tehrani R., Lyv M.M., Kaveh R., Schnoor J.L., Aken B. (2012) Biodegradation of mono-hydroxylated PCBs by *Burkholderia xenovorans*. *Biotechnology Letters*. **34**(12): 2247–2252. <https://doi.org/10.1007/s10529-012-1037-x> EDN: SWFYIT
- van Noort P.C.M. (2004) Comment on “Aqueous solubilities of non- and mono-ortho PCBs at four temperatures”. *Water Research*. **38**(16): 3643–3644. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(03\)00400-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(03)00400-7) EDN: KHWNXT
- Xing Z., Hu T., Xiang Y., Qi P., Huang X. (2020) Degradation Mechanism of 4-Chlorobiphenyl by Consortium of *Pseudomonas* sp. Strain CB-3 and *Comamonas* sp. Strain CD-2. *Current Microbiology*. **77**(1): 15–23. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01791-9> EDN: TJIHZI
- Zanaveskin L.N., Aver'yanov V.A. (1998) Polychlorobiphenyls: problems of the pollution of the environment and technological neutralisation methods. *Russian Chemical Reviews*. **67**(8): 713–724. <https://doi.org/10.1070/RC1998v067n08ABEH000412> EDN: LFAZXP

- Zanaveskin L.N., Aver'yanov V.A., Treger Y.A. (1996) Prospects for the development of methods for the processing of organohalogen waste. Characteristic features of the catalytic hydrogenolysis of halogen-containing compounds. *Russian Chemical Reviews*. **65**(7): 617–624. <https://doi.org/10.1070/RC1996v065n07ABEH000271> EDN: LDUYHT
- Zhou X., Zhang S., Wang R., An Z., Sun F., Shen C., Lin H., Su X. (2023) A novel strategy for enhancing bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soil with resuscitation promoting factor and resuscitated strain. *Journal of Hazardous Materials*. **447**: 130781. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130781> EDN: ACNHQM

Цитировать как

Егорова Д.О., Горбунова Т.И. (2026). Особенности деструкции три- и пентахлорбифенилов и их гидроксипроизводных штаммом *Rhodococcus opacus* KT112-7. *Экобиотех.* **9** (2): 188-200. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-15> EDN: <https://www.elibrary.ru/ktzvtc>

Сведения об авторах

Дарья Олеговна Егорова, д.б.н., доцент, Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь, Россия. E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN-код: 9450-7883, WoS Researcher ID: AAF-5550-2019, ORCID: 0000-0001-8018-4687.

Татьяна Ивановна Горбунова, д.х.н., Институт органического синтеза им. И.Я. Постовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия. E-mail: gorbunova@ios.uran.ru, ORCID: 0000-0003-4288-1988, SPIN-код: 1348-7483, WoS Researcher ID: AAW-8482-2021.

Cited as

Egorova D.O., Gorbunova T.I. (2026). Features of destruction of tri- and pentachlorobiphenyls and their hydroxy derivatives by the *Rhodococcus opacus* strain KT112-7. *Ecobiotech.* **9** (2): 188-200. DOI: <http://doi.org/10.31163/2618-964X/2026-15> EDN: <https://www.elibrary.ru/ktzvtc>

Information About the Authors

Darya O. Egorova, Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Institute of ecology and genetics of microorganisms UB RAS, Perm, Russia. E-mail: daryao@rambler.ru, SPIN: 9450-7883, WoS Researcher ID: AAF-5550-2019, ORCID: 0000-0001-8018-4687.

Tatiana I. Gorbunova, Doctor of Chemical Sciences, I.Ya. Postovskii Institute of Organic Synthesis UB RAS, Yekaterinburg, Russia, E-mail: gorbunova@ios.uran.ru, ORCID: 0000-0003-4288-1988, SPIN: 1348-7483, WoS Researcher ID: AAW-8482-2021.