

Оригинальная статья

УДК 615.9+579.222+571.27

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.75-90>**Оценка рисков здоровью и влияния на иммунитет
2,4'-дихлорбифенила (ПХБ 8) и продуктов его бактериальной
деструкции при пероральном поступлении в организм****Д.О. Егорова[✉], С.В. Гейн, Н.А. Королев, Т.Д. Кирьянова***Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН,
Пермь, Россия*[✉]daryao@rambler.ru**Аннотация**

Проблема негативного воздействия полихлорированных бифенилов (ПХБ) на организм человека и животных является актуальной в настоящее время. Однако основное внимание уделяется рискам, обусловленным загрязнением окружающей среды высокохлорированными бифенилами. В настоящем исследовании изучено воздействие дихлорированного бифенила (ПХБ 8) и продуктов его бактериальной трансформации на иммунитет. Установлено, что ПХБ 8 снижает показатели антителообразования, но не влияет на клеточноопосредованный иммунитет. Деградация ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 приводит к нивелированию негативного влияния соединения на гуморальный иммунитет. В результате бактериальной трансформации под действием ферментов штамма *Rhodococcus opacus* FG1 (ВКМ Ас-3030) концентрация ПХБ 8 за 14 сут снизилась в 16.9 раза. При этом в среде зафиксировано накопление 2-хлорбензойной (2-ХБК) и 4-хлорбензойной (4-ХБК) кислот. Анализ влияния 2-ХБК и 4-ХБК на показатели иммунитета не выявил негативных эффектов. Расчет рисков показал, что, несмотря на снижение концентрации ПХБ 8 в процессе биотрансформации, уровень неканцерогенного риска остается высоким как для детей, так и для взрослых, а показатель канцерогенного риска снижается к 14 сут до допустимого и безопасного значений для детей и взрослых соответственно. Расчетные значения неканцерогенного риска от образующихся ХБК не представляют опасность для здоровья.

Ключевые слова: полихлорированные бифенилы, антителообразование, токсичность, *Rhodococcus*, биодеструкция, неканцерогенный риск, канцерогенный риск.

Заключение Комитета по этике. Протокол исследования одобрен Комитетом по этике «ИЭГМ УрО РАН» IRB00010009 (Пермь, Россия) (протокол № 29 от 08.10.2024 г.).

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 24-24-00498, <https://rscf.ru/project/24-24-00498/>).

Для цитирования: Егорова Д.О., Гейн С.В., Королев Н.А., Кирьянова Т.Д. Оценка рисков здоровью и влияния на иммунитет 2,4'-дихлорбифенила (ПХБ 8) и продуктов его бактериальной деструкции при пероральном поступлении в организм // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2026. Т. 168, кн. 1. С. 75–90. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.75-90>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.75-90>

Assessment of health risks and immunological effects from oral exposure to 2,4'-dichlorobiphenyl (PCB 8) and its bacterial degradation products

D.O. Egorova[✉], S.V. Gein, N.A. Korolev, T.D. Kir'yanova

*Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, Perm, Russia*

[✉]daryao@rambler.ru

Abstract

The adverse effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) on human and animal health pose a significant concern. However, to date, most studies have considered the risks of environmental contamination by highly chlorinated biphenyls. This study, on the contrary, focuses on the impact of dichlorinated biphenyl (PCB 8) and its bacterial transformation products on the immune system. PCB 8 was found to suppress antibody formation without affecting cell-mediated immunity responses. The degradation of PCB 8 by *Rhodococcus opacus* FG1 reduced its impairment of humoral immunity. The bacterial transformation by *Rhodococcus opacus* FG1 (VKMAc-3030) enzymes induced a 16.9-fold decrease in the PCB 8 concentration over 14 days. Concurrently, 2-chlorobenzoic acid (2-CBA) and 4-chlorobenzoic acid (4-CBA) accumulated in the medium. The assessment of the immune parameters following the exposure to 2-CBA and 4-CBA revealed no negative changes. The data from the health risk assessment demonstrated that, despite the observed decrease in the PCB 8 concentration during biotransformation, the non-carcinogenic risk remained high for both children and adults, whereas the carcinogenic risk declined to acceptable and safe levels for children and adults, respectively, by day 14. The calculated non-carcinogenic risk values from the resulting CBAs were not associated with health hazards.

Keywords: polychlorinated biphenyls, antibody production, toxicity, *Rhodococcus*, biodegradation, non-carcinogenic risk, carcinogenic risk

Institutional Review Board Statement. The study protocol was approved by the Ethics Committee of the Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, IRB00010009 (Perm, Russia) (protocol no. 29 dated October 8, 2024).

Acknowledgments. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 24-24-00498, <https://rscf.ru/project/24-24-00498/>).

For citation: Egorova D.O., Gein S.V., Korolev N.A., Kir'yanova T.D. Assessment of health risks and immunological effects from oral exposure to 2,4'-dichlorobiphenyl (PCB 8) and its bacterial degradation products. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2026, vol. 168, no. 1, pp. 75–90. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2026.1.75-90>. (In Russian)

Введение

Глобальное загрязнение окружающей среды соединениями группы полихлорированных бифенилов (ПХБ) остается актуальным, несмотря на общемировой запрет их про-

изводства и применения в промышленных масштабах [1, 2]. Установлено присутствие ПХБ на всех континентах, как в наземных, так и в водных экосистемах [3, 4]. Группа ПХБ содержит 209 соединений, отличающихся числом и расположением атомов хлора в ароматических циклах [5]. Одним из свойств соединений этого класса является низкая растворимость в воде и высокая растворимость в органических соединениях, в том числе в жирах, что обуславливает их биомагнификацию [6]. Многочисленные исследования показали, что ПХБ присутствуют на всех трофических уровнях и поступают в организм человека с продуктами питания [7].

Согласно Стокгольмской конвенции, ПХБ относятся ко 2 классу опасности (высокоопасные вещества) и представляют угрозу для животных и человека [2]. Показано, что ПХБ вызывают нарушения в функционировании нервной, эндокринной и сердечно-сосудистой систем, проявляют канцерогенный и тератогенный эффекты [8, 9]. Большинство исследований сосредоточено на изучении процессов и механизмов негативного воздействия на организм диоксиноподобных ПХБ (ПХБ 77, ПХБ 81, ПХБ 105, ПХБ 114, ПХБ 118, ПХБ 123, ПХБ 126, ПХБ 156, ПХБ 157, ПХБ 167, ПХБ 169 и ПХБ189), содержащих более трех заместителей в молекуле [10, 11]. Для данных конгенов, которые по структуре молекулы напоминают молекулу диоксина, разработаны международные коэффициенты токсичности, рассчитанные относительно 2,3,7,8-тетрахлордибензо-1,4-диоксина, значения которых находятся в пределах 0.00001–0.1 [13].

Однако применение коммерческих смесей ПХБ привело к тому, что в окружающей среде присутствуют и низкохлорированные конгенеры. Так, в образцах воды и донных отложений выявлены ПХБ 8, ПХБ 18 и ПХБ 28 (ди- и трихлорированные конгенеры) в концентрациях 29–187 нг/л(кг) [13]. В результате биомагнификации в организмах животных накапливаются не только средне- и высокохлорированные диоксиноподобные конгенеры ПХБ, но и конгенеры, содержащие от 1 до 3 заместителей в молекуле. При этом остается малоизученным вопрос о рисках, которые данные конгенеры ПХБ представляют для человека и животных.

Длительное присутствие ПХБ в природных средах привело к частичной адаптации микрофлоры [14]. В результате в составе микробиоценозов ПХБ-загрязненных почв существенную долю занимают бактерии, у которых активированы ферментативные системы окисления бифенила и его производных [4]. Исследование этих микробиоценозов позволило выделить аэробные бактериальные штаммы, осуществляющие трансформацию ПХБ [15–17]. Наиболее распространенным является путь окислительной трансформации с последовательным образованием гидроксипроизводных ПХБ до расщепления молекулы на хлорбензойные (ХБК) и пентадиеновую кислоты [18]. Накопление в окружающей среде ХБК также имеет негативный эффект, так как они относятся к соединениям 4 класса опасности [19].

Цель работы – оценить влияние 2,4'-дихлорбифенила (ПХБ 8) и продуктов его биотрансформации под действием ферментов штамма *Rhodococcus opacus* FG1 (ВКМ Ас-3030) на показатели гуморального и клеточно-опосредованного иммунитета, а также риски здоровью.

1. Материалы и методы

1.1. Среда и химические реактивы. В работе использовали ПХБ 8 (> 99 %), 2-ХБК (> 98 %), 4-ХБК(> 98 %) от фирмы Sigma-Aldrich (Германия), ацетонитрил и гексан марки о.с.ч. (ЗАО «НПК Криохром», Россия), минеральную среду К1 (3.2 г/л $K_2HPO_4 \times 3H_2O$, 0.4 г/л

$\text{NaH}_2\text{PO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$, 0.5 г/л $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0.15 г/л $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ и 0.01 г/л $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), а также раствор Хенкса и среду 199 от ООО «БиолоТ» (Россия).

1.2. Штамм-деструктор ПХБ. Штамм-деструктор ароматических соединений *Rhodococcus opacus* FG1 отобран из рабочей коллекции лаборатории микробиологии техногенных экосистем «ИЭГМ УрО РАН», номер во Всероссийской коллекции микроорганизмов – ВКМ Ас-3030.

1.3. Деструкция ПХБ 8. Биодеструкцию ПХБ 8 проводили с использованием культуры штамма *R. opacus* FG1 в минеральной среде K1 согласно [20]. Для определения концентрации ПХБ 8 отбирали пробы на 0, 7 и 14 сут эксперимента, очищали от клеток центрифугированием (центрифуга miniSpin, Eppendorf, Германия) при 10000 об/мин в течение 3 мин. Для анализа метаболитов отбирали пробы на 0, 3, 5, 7 и 14 сут эксперимента, очищали от клеток как описано выше. Для оценки воздействия метаболитов на иммунитет отбирали пробы на 4 сут эксперимента и освобождали от бактериальных клеток центрифугированием.

1.4. Определение ПХБ 8 и метаболитов. Присутствие ПХБ 8 контролировали методом газовой хроматографии с масс-селективным детектором согласно [20, 21]. Культуральную жидкость предварительно экстрагировали смесью концентрированной H_2SO_4 , 12.5%-ного додецилсульфата натрия и гексана (1 : 10 : 25) в течение 60 мин при 30 °C со скоростью перемешивания 200 об/мин и обезвоживали Na_2SO_4 . Хроматографическое определение проводили на газовом хроматографе с масс-спектрометрическим детектором Agilent GC 7890A MSD 5975C inert XL EI/CI (Agilent Technology, США) и кварцевой капиллярной колонкой HP-5MS (30 м × 0.25 мм) (Agilent Technology, США). В качестве газа-носителя использовали гелий, температура испарителя составляла 230 °C, а объем пробы – 1.0 мкл. Нижняя граница определяемых содержаний хлорбифенилов равен 1.0 нг/кг. Используемая методика определения ПХБ сопоставима с ГОСТ 31983-2012 [22] и ГОСТ Р 54503-2011 [23].

Метаболиты деструкции ПХБ 8 определяли в культуральной жидкости методами спектрофотометрии и высокоэффективной жидкостной хроматографии согласно [20, 21]. Культуральную жидкость предварительно очищали от клеток центрифугированием (9660 g, 3 мин, центрифуга miniSpin, Eppendorf, Германия). Продукты *мета*-расщепления ПХБ 8 определяли качественно на спектрофотометре UV-Visible BioSpec-mini (Shimadzu, Япония) в диапазоне длин волн 390–440 нм. Качественное и количественное определение хлор- и гидроксibenзойных кислот осуществляли на хроматографе LC-20A (Shimadzu, Япония) с колонкой Discovery C18 (150 × 4.6 мм или 250 × 4.6 мм) (Supelco, Sigma-Aldrich, США) и УФ-детектированием при 205 нм. Подвижная фаза состояла из смеси ацетонитрил–0.1%-ная H_3PO_4 (70 : 30). Качественное определение проводили по времени удерживания образовавшихся метаболитов, которые сопоставляли с таковым для стандартных соединений. Количественное определение – по площадям хроматографических пиков методом сравнения. Предел обнаружения метаболитов в данных условиях – 0.1 мкг/л.

1.5. Моделирование метаболического пути. Моделирование путей трансформации ПХБ 8 осуществляли на основе полученных экспериментальных результатов и международных баз данных Brenda (<http://www.brenda-enzymes.info>), KEGG (<http://www.genome.jp>), ExplorEnz (<http://www.enzyme-database.org>) и GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>). Для визуализации метаболических путей использован пакет программ ACDLabs Freeware (ACD/Labs, Канада).

1.6. Экспериментальные животные. Объектами исследования выступали белые мыши ICR (CD-1) обоих полов в возрасте 7–8 недель и массой 18–22 г. Животных содержали

в условиях лабораторного вивария с 12-часовым циклом освещения при температуре воздуха в помещении $+22 \pm 3$ °C, с двухразовым питанием натуральным кормом в количестве, соответствующем суточным нормам, и неограниченным доступом к воде. Акклиматизация мышей проводили в течение 1 недели. Животных содержали в соответствии с рекомендациями и этическими нормами, указанными в «Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» [24].

1.7. Дизайн эксперимента. В ходе работы оценивали воздействие ПХБ 8, а также продуктов его бактериальной деструкции, накапливающихся в культуральной среде в течение 4 сут биodeградации, на показатели гуморального и клеточно-опосредованного иммунитета.

Мыши были разделены на 4 группы. Две контрольные группы. Одна состояла из 9 мышей, получавших перорально чистое кукурузное масло, а вторая – из 7 мышей, которые получали перорально культуральную среду, освобожденную от бактериальных клеток и не содержащую исследуемых субстратов. Две экспериментальные группы. Группа из 9 мышей получала перорально ПХБ 8 и группа из 7 мышей получала перорально продукты биodeструкции (4 сут) ПХБ 8.

ПХБ 8, растворенный в кукурузном масле, вводили мышам перорально, последовательно через день в дозировке 100 мг/кг в течение 24 дней. Выбор дозировки основан на литературных данных [25–27]. Продукты бактериальной деструкции вводили перорально в виде культуральной жидкости (35 мкл), освобожденной от бактериальных клеток центрифугированием (центрифуга miniSpin, Eppendorf, Германия) при 10000 об/мин в течение 3 мин, через день в течение 24 дней. Объем одной дозы введения рассчитывали таким образом, чтобы концентрация ПХБ 8 в ней до биodeструкции была эквивалентна 100 мг/кг, которые вводили мышам с кукурузным маслом. На 25-й день животных выводили из эксперимента методом декапитации под эфирным наркозом.

1.8. Оценка показателей иммунитета. Гуморальный иммунный ответ оценивали по количеству антителообразующих клеток (АОК) методом локального гемолиза в геле агарозы по методу Эрне [28]. На 19-ый день эксперимента животных иммунизировали эритроцитами барана в брюшную полость (концентрация 10^8 клеток в 200 мкл физиологического раствора) для индукции гуморального иммунитета в селезенке. После завершения эксперимента селезенку очищали от жировой клетчатки и помещали в питательную среду 199 с добавлением 10 мМ HEPES (Sigma-Aldrich, Германия) и 2 мМ L-глутамин (Sigma-Aldrich, Германия), гомогенизировали в стеклянном гомогенизаторе. По 3 мл 0.75 % агарозы на растворе Хэнкса помещали в пробирки и охлаждали до 45 °C. В каждую пробирку вносили по 250 мкл эритроцитов барана и рабочий объем клеток ($10^6/0.1$ мл). Смесь перемешивали и помещали в чашки Петри и инкубировали 1 ч при 37 °C. Затем вносили 2.5 мл комплемента (НПО «Биомед», Россия, ампулу лиофилизированного комплемента разводили в 5 мл среды 199 согласно рекомендации производителя) и, спустя 1 ч инкубации при 37 °C, его сливали. Число зон гемолиза, каждая из которых соответствует одной антителообразующей клетке, подсчитывали при боковом освещении. Результаты, учитывая log-нормальное распределение данных, выражали в виде $\log_{10}$ АОК/млн спленоцитов и $\log_{10}$ АОК/г органа.

Для определения количества ядросодержащих клеток (ЯСК) 10 мкл суспензии селезенки разводили в 190 мкл 3%-ной уксусной кислоты и помещали в камеру Горяева. Подсчет производили в 25 больших квадратах, каждый из которых был подразделен на 16 маленьких квадратов. Полученное число пересчитывали на 1 мл суспензии.

Для оценки клеточно-опосредованного иммунного ответа на тимусзависимый антиген на 24-й день мышам вводили разрешающую дозу эритроцитов барана под кожу левой стопы и аналогичный объем физиологического раствора (0.9%-ный раствор NaCl) под кожу правой стопы для индукции реакции гиперчувствительности замедленного типа (ГЗТ). Выраженность реакции ГЗТ оценивали путем измерения отека лапы по индексу массы и по индексу размера. Стопу отделяли от окружающих тканей строго по голеностопному суставу.

1.9. Расчет рисков. Риск здоровью рассчитывали для двух возрастных групп: дети и взрослые, согласно модели, предложенной Всемирной организацией здравоохранения [29]. Неканцерогенный риск (НІ) вычисляли как отношение суточного потребления вещества (ADI, мг/(кг×день)) к референсной дозе вещества (RfD, мг/(кг×день)). Для расчета ADI использованы показатели, рекомендованные Агентством по охране окружающей среды США (U.S. EPA), и экспериментальная концентрация ПХБ 8. Значения RfD для ПХБ 8 согласно значению показателя для всей группы ПХБ принято равным 20 нг/(кг×день) [30], для 4-ХБК – 0.08 мг/(кг×день) [19]. Безопасными считаются показатели $HI \leq 1$.

Общий канцерогенный риск (TCR) рассчитывали как отношение суточного потребления вещества (ADI, мг/(кг×день)) к «слоп»-фактору ПХБ (SF) при пероральном поступлении (2 мг/(кг×день)) [29]. Допустимыми приняты значения TCR в диапазоне 1×10^{-6} – 1×10^{-4} . При более низких значениях риск отсутствует, а при более высоких – вещества представляют значительный канцерогенный риск для здоровья населения.

1.10. Статистическая обработка данных. Статистический анализ полученных результатов проводили с использованием непарного t-критерия Стьюдента. Данные представляли в виде среднего значения и стандартной ошибки ($M \pm SE$). Достоверность полученного результата оценивали при значении $p < 0.05$.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Разложение ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1. Деградационная активность штамма *Rhodococcus opacus* FG1 в отношении ПХБ 8 изучена в минеральной среде K1 в экспериментах с «отмытыми» клетками (рис. 1). Установлено, что процесс разложения субстрата происходил равномерно на протяжении всего периода эксперимента. Эффективность биодеструкции ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 ниже, чем у штамма *Rhodococcus wratislaviensis* KT112-7, но не уступает аналогичному показателю известных штаммов-деструкторов ПХБ родов *Rhodococcus*, *Aquamicrobium*, *Pseudomonas* и *Bacillus* [31–33].

В результате ВЭЖХ-анализа установлено, что при биодеструкции ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 основными метаболитами являются 2-ХБК и 4-ХБК (рис. 1). Так как концентрация этих соединений в культуральной среде низкая, а для 4-ХБК отмечено снижение концентрации, можно сделать вывод, что они не являются конечными продуктами трансформации ПХБ 8, а вовлечены в процессы метаболизма штамма *Rhodococcus opacus* FG1. Способность к утилизации хлорбензойных кислот, образующихся при деструкции ПХБ, описана для ряда штаммов рода *Rhodococcus* [34–37]. Также среди метаболитов выявлены соединения, максимальное поглощение которых наблюдается в диапазоне длин волн от 391 до 433 нм. Эти соединения могут образовываться при окислении молекулы ПХБ 8 под действием диоксигеназ и внедрением в молекулу гидроксильных групп с последующим разрывом одного ароматического цикла.

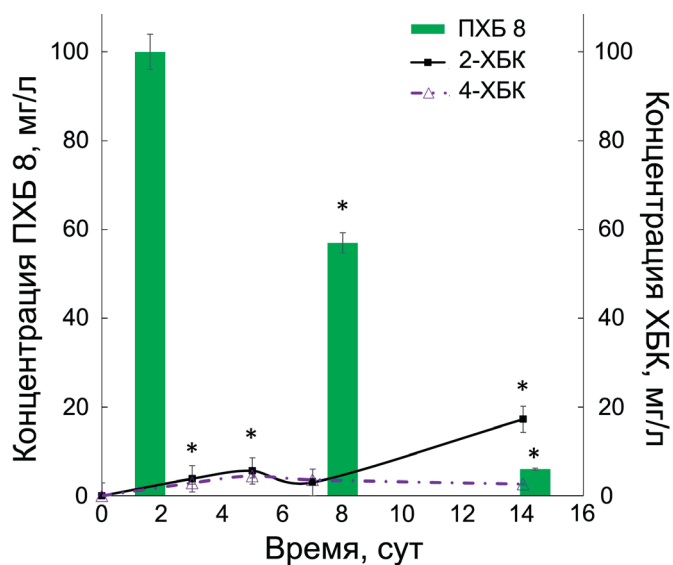


Рис. 1. Динамика содержания ПХБ 8 и образования основных метаболитов 2-ХБК и 4-ХБК в процессе деструкции штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 (* – достоверное отличие, $p < 0.05$)

Fig. 1. Dynamics of the PCB 8 content and the formation of main metabolites 2-CBA and 4-CBA during the destruction process by the strain *Rhodococcus opacus* FG1 (* – statistically significant difference, $p < 0.05$)

Известно, что биоконверсия бифенила и его производных у аэробных бактерий протекает в результате последовательного окисления молекулы с последующим ее расщеплением на бензойную/хлорбензойную и пентадиеновую кислоты («верхний» путь) [38]. Метаболический профиль деструкции ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 сопоставлен с возможными промежуточными продуктами биодеструкции этих субстратов, представленными в международных базах данных. В результате проведенного анализа можно предположить, что ферментативный комплекс штамма *Rhodococcus opacus* FG1 на первом этапе окисляет как *орто*-, так и *пара*-замещенные ароматические кольца в молекуле ПХБ 8 с последующей трансформацией по «верхнему» бифенильному пути (рис. 2).

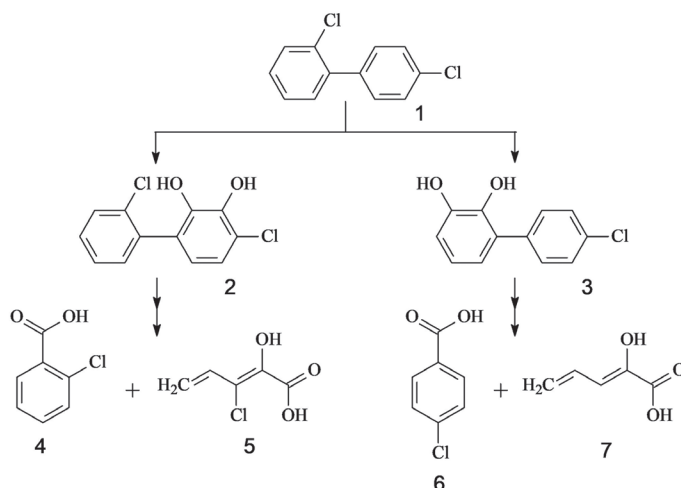


Рис. 2. Схема метаболизма ПХБ 8 у штамма *Rhodococcus opacus* FG1 (1 – ПХБ 8, 2 – 2,4'-дихлор-2',3'-дигидроксибифенил, 3 – 4-хлор-2',3'-дигидроксибифенил, 4 – 2-ХБК, 5 – 2-гидрокси-3-хлорпентадиеновая кислота, 6 – 4-ХБК, 7 – 2-гидрокси-пентадиеновая кислота)

Fig. 2. Scheme of the PCB 8 metabolism in the strain *Rhodococcus opacus* FG1 (1 – PCB 8, 2 – 2,4'-dichloro-2',3'-dihydroxybiphenyl, 3 – 4-chloro-2',3'-dihydroxybiphenyl, 4 – 2-CBA, 5 – 2-hydroxy-3-chloropentadienoic acid, 6 – 4-CBA, 7 – 2-hydroxypentadienoic acid)

Таким образом, штамм *Rhodococcus opacus* FG1 эффективно разлагает ПХБ 8 с образованием в качестве основных промежуточных соединений 2-ХБК и 4-ХБК.

2.2. Анализ рисков здоровью. Уровень риска для здоровья от воздействия химических соединений определяют путем расчета индекса опасности (НИ). Значения НИ сравниваются с 1, то есть приемлемым уровнем опасности считается воздействие такой концентрации токсического соединения, при котором значения $НИ \leq 1$ [39, 40]. При расчете НИ учитываются референсная доза (RfD) для каждого вещества и концентрация, при которой отсутствует проявление эффекта (NOAEL), как один из компонентов RfD. В значениях этих показателей учитываются специфические токсические свойства каждого соединения [40–42].

Результаты расчета риска от перорального поступления ПХБ 8 в организм до и после биодеструкции представлены в табл. 1. Показано, что биодеструкция не позволяет уменьшить концентрацию ПХБ 8 до безопасного уровня, однако значения НИ снижаются к концу эксперимента в 16.7 раза.

Табл. 1. Динамика изменения показателей рисков здоровью в процессе биодеструкции ПХБ 8

Table 1. Dynamics of changes in the health risk indicators during the PCB 8 biodegradation

Время, сут	Неканцерогенный риск (НИ)				Канцерогенный риск (TCR)	
	ПХБ 8		Метаболиты (4-ХБК)		ПХБ 8	
	дети	взрослые	дети	взрослые	дети	взрослые
0	20000	142.8	0	0	2.0E-03	1.4E-05
7	11394	81.4	1.8E-05	1.3E-07	1.1E-03	8.1E-06
14	1197	8.6	1.3E-05	9.5E-08	1.2E-04	8.5E-07

В расчете рисков от образующихся метаболитов использовано значение RfD только для 4-ХБК, так как для 2-ХБК этот показатель не установлен. Анализ полученных данных показывает, что зафиксированные количества 4-ХБК, образующиеся при бактериальной деструкции ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1, не представляют угрозу для здоровья как детей, так и взрослых (значения $НИ_{4-ХБК}$ существенно ниже 1). Результаты оценки канцерогенного риска свидетельствуют о том, что биодеструкция ПХБ 8 ферментативными системами штамма *Rhodococcus opacus* FG1 обуславливает обезвреживание субстрата. Через 14 сут бактериальной деградации уровень канцерогенного риска для детей снижается до допустимого, а для взрослых – до безопасного.

2.3. Иммунотоксичность ПХБ 8 и продуктов его бактериальной деструкции.

Согласно литературным данным [43] для оценки иммунотоксичности ПХБ может быть использован такой показатель, как количество АОК в селезенке. В ходе исследования установлено, что пероральное поступление ПХБ 8 в организм мышей приводит к изменению показателей иммунной системы (табл. 2), в частности, угнетению антителогенеза как по относительным, так и по абсолютным показателям. У мышей, получавших ПХБ 8, наблюдается статистически значимое снижение количества АОК, а также уменьшение числа ЯСК в селезенке (ЯСК/орган). Оценка клеточно-опосредованного иммунитета при воздействии ПХБ 8 показала отсутствие влияния на выраженность реакции ГЗТ как по индексу размера, так и по индексу массы. Супрессивное воздействие на количество АОК для высокохлорированных бифенилов показано как на примере индивидуальных конгенов, так и на примере экспериментальных и коммерческих смесей ПХБ [43–47]. Аналогичное воздействие на гуморальный иммунитет для дизамещенного бифенила, содержащего по одному атому хлора в каждом кольце молекулы, установлено впервые.

Табл. 2. Влияние ПХБ 8 на количество АОК и выраженность реакции ГЗТ при пероральном введении (* – полученные различия достоверны, $p < 0.05$)

Table 2. Effect of the orally administered PCB 8 on the PFC number and the severity of the DTH reaction (* – results are significant, $p < 0.05$)

Показатель	Контроль	ПХБ 8
Log_{10} АОК/млн спленоцитов	2.3 ± 0.1	$1.6 \pm 0.3^*$
Log_{10} АОК/орган	4.66 ± 0.09	$3.9 \pm 0.3^*$
ЯСК/орган	263 ± 25	$204 \pm 13^*$
Индекс ГЗТ (%), по массе	26 ± 3	28 ± 2
Индекс ГЗТ (%) по размеру	20 ± 2	23 ± 2

Как видно из табл. 3, деградация ПХБ 8 штаммом *Rhodococcus opacus* FG1 приводит к нивелированию негативного влияния соединения на гуморальный иммунитет. Угнетение иммунитета может привести к повышению восприимчивости к болезнетворным агентам и, как следствие, к ухудшению здоровья. В связи с этим, данные по инаktivации супрессорного эффекта ПХБ 8 в отношении иммунной системы в результате биотрансформации под воздействием штамма *Rhodococcus opacus* FG1 имеют значение.

Табл. 3. Влияние продуктов биodeградации ПХБ 8 на количество АОК и выраженность реакции ГЗТ при пероральном введении

Table 3. Effect of the orally administered PCB 8 biodegradation products on the PFC number and the severity of the DTH reaction

Показатель	Контроль	Метаболиты ПХБ 8
Log_{10} АОК/млн спленоцитов	2.0 ± 0.2	1.53 ± 0.3
Log_{10} АОК/орган	4.3 ± 0.2	3.9 ± 0.3
ЯСК/орган	239 ± 16	229 ± 24
Индекс ГЗТ (%), по массе	31 ± 5	27 ± 7
Индекс ГЗТ (%), по размеру	22 ± 3	27 ± 4

Заклучение

Таким образом, впервые показан иммунотоксический эффект ПХБ 8. Пероральное введение вызывает угнетение гуморального иммунитета у экспериментальных мышей. Использование штамма-деструктора *Rhodococcus opacus* FG1 в качестве биологического агента для трансформации ПХБ 8 приводит к нивелированию негативного эффекта этого дихлорбифенила на иммунную систему и, соответственно, снижает риски развития вторичного иммунодефицита при попадании поллютанта и продуктов его деградации в организм. Проведенное исследование показывает, что опасность для млекопитающих представляют не только высокохлорированные диоксиноподобные полихлорбифенилы, но и дихлорированный конгенер, содержащий по одному атому хлора в каждом кольце молекулы, а применение бактерий-деструкторов является перспективным для снижения рисков здоровью. Штамм *Rhodococcus opacus* FG1 может быть использован как основа для разработки био-

препаратов, направленных на снижение рисков, связанных с контаминацией окружающей среды полихлорированными бифенилами.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Reddy A.V.B., Moniruzzaman M., Aminabhavi T.M. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis // Chem. Eng. J. 2019. V. 358. P. 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>.
2. United Nations Environment Programme. Final Act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. UNEP/POPS/CONF/4. Geneva: U. N., 2001. 44 p.
3. Zhao Q., Bai J., Lu Q., Gao Z., Jia J., Cui B., Liu X. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments/soils of different wetlands along 100-year coastal reclamation chronosequence in the Pearl River Estuary, China // Environ. Pollut. 2016. V. 213. P. 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.039>.
4. Negrete-Bolagay D., Zamora-Ledezma C., Chuya-Sumba C., De Sousa F.B., Whitehead D., Alexis F., Guerrero V.H. Persistent organic pollutants: The trade-off between potential risks and sustainable remediation methods // J. Environ. Manage. 2021. V. 300. Art. 113737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113737>.
5. Erickson M.D., Kaley II R.G. Applications of polychlorinated biphenyls // Environ. Sci. Pollut. Res. 2011. V. 18, No 2. P. 135–151. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0392-1>.
6. Warenik-Bany M., Maszewski S., Mikolajczyk S., Piskorska-Pliszczynska J. Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals // Environ. Pollut. 2019. V. 255, Pt. 1. Art. 113159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113159>.
7. Müller M.H.B., Polder A., Brynildsrud O.B., Karimi M., Lie E., Manyilizu W.B., Mdegela R.H., Mokiti F., Murtadha M., Nonga H.E., Skaare J.U., Lyche J.L. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in human breast milk and associated health risks to nursing infants in Northern Tanzania // Environ. Res. 2017. V. 154. P. 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.031>.
8. Devi N.L. Persistent organic pollutants (POPs): Environmental risks, toxicological effects, and bioremediation for environmental safety and challenges for future research // Saxena G., Bharagava R. (Eds.) Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety. V. 1: Industrial waste and its management. Singapore: Springer, 2020. P. 53–67. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4.
9. Shuai J., Yu X., Zhang J., Xiong A.-s., Xiong F. Regional analysis of potential polychlorinated biphenyl degrading bacterial strains from China // Braz. J. Microbiol. 2016. V. 47, No 3. P. 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2014.12.001>.
10. Zhang H., Zhang H., Zhao L., Zhou B., Li P., Liu B., Wang Y., Yang C., Huang K., Zhang C. Ecosystem impact and dietary exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) and their farming areas in Jiangsu, China // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2021. V. 227. Art. 112936. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112936>.
11. Helou K., Harmouche-Karaki M., Karake S., Narbonne J.-F. A review of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Lebanon: Environmental and human contaminants // Chemosphere. 2019. V. 231. P. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.109>.
12. Yakub A.S., Basse B.O., Balogun K.J., Igbo J.K., Ajani G., Bello B., Abiodun O., Olapoju O., Nosazeogie E.O., Izge M.A. Human health risk of polychlorinated biphenyls in some brackish and marine fish species from Ondo South-West Nigeria // Biomed. J. Sci. Tech. Res. 2020. V. 30, No 2. P. 23258–23263. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.30.004928>.

13. Eze V.C., Onwukeme V.I., Ogbuagu J.O., Aralu C.C. Toxicity and risk evaluation of polychlorinated biphenyls in River Otamiri, Imo State // Sci. Afr. 2023. V. 22. Art. e01983. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01983>.
14. Pieper D.H. Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2005. V. 67, No 2. P. 170–191. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1810-4>.
15. Bako C.M., Mattes T.E., Marek R.F., Hornbuckle K.C., Schnoor J.L. Biodegradation of PCB congeners by *Paraburkholderia xenovorans* LB400 in presence and absence of sediment during lab bioreactor experiments // Environ. Pollut. 2021. V. 271. Art. 116364. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116364>.
16. Ilori M.O., Robinson G.K., Adebuseye S.A. Aerobic mineralization of 4,4'-dichlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by a novel natural bacterial strain that grows poorly on benzoate and biphenyl // World J. Microbiol. Biotechnol. 2008. V. 24, No 8. P. 1259–1265. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>.
17. Furukawa K., Fujihara H. Microbial degradation of polychlorinated biphenyls: Biochemical and molecular features // J. Biosci. Bioeng. 2008. V. 105, No 5. P. 433–449. <https://doi.org/10.1263/jbb.105.433>.
18. Furukawa K. Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) // J. Gen. Appl. Microbiol. 2000. V. 46, No 6. P. 283–296. <https://doi.org/10.2323/jgam.46.283>.
19. Provisional Peer Reviewed Toxicity Values for *p*-Chlorobenzoic Acid (CASRN 74-11-3). EPA/690/R-07/005F. Washington, DC: U. S. Environ. Prot. Agency, 2007. 12 p.
20. Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains // J. Hazard. Mater. 2020. V. 400. Art. 123328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328>.
21. Gorbunova T.I., Egorova D.O., Pervova M.G., Kyrianova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Biodegradation of trichlorobiphenyls and their hydroxylated derivatives by *Rhodococcus*-strains // J. Hazard. Mater. 2021. V. 409. Art. 124471. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124471>.
22. ГОСТ 31983-2012. Продукты пищевые, корма, продовольственное сырье. Методы определения содержания полихлорированных бифенилов. М.: Стандартинформ, 2014. 37 с.
23. ГОСТ Р 54503-2011. Вода. Методы определения содержания полихлорированных бифенилов. М.: Стандартинформ, 2019. 32 с.
24. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. European Treaty Series No. 123. // Off. J. Eur. Union. 1999. L 222. P. 0031–0037.
25. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. Ч. 1. М.: Гриф и К, 2012. 944 с.
26. Руководство по проведению доклинических исследований лекарственных средств. Ч. 2. М.: Гриф и К, 2012. 536 с.
27. IRIS Toxicological Review of Biphenyl (CAS No. 92-52-4). Final Report. EPA/635/R-11/005F. Washington, DC: U. S. Environ. Prot. Agency, 2011. 225 p.
28. Jerne N.K., Nordin A.A. Plaque formation in agar by single antibody-producing cells // Science. 1963. V. 140, No 3565. P. 405. <https://doi.org/10.1126/science.140.3565.405.a>.
29. Contaminated sites and health. Copenhagen: W. H. O. Reg. Off. Eur., 2013. 106 p.
30. Exposure levels for evaluating polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor school air. Washington, DC: U.S. Environ. Prot. Agency, 2024. URL: <https://www.epa.gov/pcbs/exposure-levels-evaluating-polychlorinated-biphenyls-pcbs-indoor-school-air>.
31. Chang Y.-C., Takada K., Choi D., Toyama T., Sawada K., Kikuchi S. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway // Appl. Biochem. Biotechnol. 2013. V. 170, No 2. P. 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>.

32. Rasulov B.A., Kim A.A., Lorenz A., Yadgarov K.T. Biodegradation of tritium labeled polychlorinated biphenyls (PCBS) by local salt tolerant mesophylic *Bacillus* strains // J. Environ. Prot. 2010. V. 1, No 4. P. 420–425. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.14048>.
33. De J., Ramaiah N., Sarkar A. Aerobic degradation of highly chlorinated polychlorobiphenyls by a marine bacterium, *Pseudomonas* CH07 // World J. Microbiol. Biotechnol. 2006. V. 22, No 12. P. 1321–1327. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9179-4>.
34. Field J.A., Sierra-Alvarez R. Microbial transformation of chlorinated benzoates // Rev. Environ. Sci. Biotechnol. 2008. V. 7, No 3. P. 191–210. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9133-z>.
35. Kitagawa W., Miyauchi K., Masai E., Fukuda M. Cloning and characterization of benzoate catabolic genes in the gram-positive polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // J. Bacteriol. 2001. V. 183, No 22. P. 6598–6606. <https://doi.org/10.1128/JB.183.22.6598-6606.2001>.
36. Xu C., Zang X., Hang X., Liu X., Yang H., Liu X., Jiang J. Degradation of three monochlorobenzoate isomers by different bacteria isolated from a contaminated soil // Int. Biodeterior. Biodegrad. 2017. V. 120. P. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.020>.
37. Plotnikova E.G., Solyanikova I.P., Egorova D.O., Shumkova E.S., Golovleva L.A. Degradation of 4-chlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by the strain *Rhodococcus ruber* P25 // Microbiology. 2012. V. 81, No 2. P. 143–153. <https://doi.org/10.1134/S0026261712020117>.
38. Gorbunova T.I., Egorova D.O., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Aerobic bacterial degradation of polychlorinated biphenyls and their hydroxy and methoxy derivatives // Russ. Chem. Rev. 2024. V. 93, No 11. Art. RCR5138. <https://doi.org/10.59761/RCR5138>.
39. Adedokun V.A., Hammed T.B., Lateef S.A. Health risk assessment of phthalate esters and polychlorinated biphenyls from marine plastic pollution in coastal areas of Lagos, Nigeria // Environ. Sci. Pollut. Res. 2024. V. 31, No 58. P. 66150–66163. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35657-w>.
40. Ermler S., Kortenkamp A. Systematic review of associations of polychlorinated biphenyl (PCB) exposure with declining semen quality in support of the derivation of reference doses for mixture risk assessments // Environ. Health. 2022. V. 21, No 1. Art. 94. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00904-5>.
41. Pawelczyk A. Assessment of health risk associated with persistent organic pollutants in water // Environ. Monit. Assess. 2013. V. 185, No 1. P. 497–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2570-8>.
42. Chen B., Jiang H., Wang H., Yang G., Hao X. Concentration of polychlorinated biphenyls and risk assessment in finless porpoises from the East China Sea // Toxicol. Res. 2024. V. 40, No 2. P. 259–271. <https://doi.org/10.1007/s43188-023-00221-0>.
43. Fair P.A., Peden-Adams M.M., Mollenhauer M.A.M., Bossart G.D., Keil D.E., White N.D. Effects of an environmentally relevant PCB-mixture on immune function, clinical chemistry, and thyroid hormone levels in adult female B₆C₃F₁ mice // J. Toxicol. Environ. Health, Part A. 2021. V. 84, No 7. P. 279–297. <https://doi.org/10.1080/15287394.2020.1863887>.
44. Duffy J.E., Carlson E., Li Y., Prophete C., Zelikoff J.T. Impact of polychlorinated biphenyls (PCBs) on the immune function of fish: Age as a variable in determining adverse outcome // Mar. Environ. Res. 2002. V. 54, Nos 3–5. P. 559–563. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(02)00176-9).
45. Arena S.M., Greeley E.H., Halbrook R.L., Hansen L.G., Segre M. Biological effects of gestational and lactational PCB exposure in neonatal and juvenile C57BL/6 mice // Arch. Environ. Contam. Toxicol. 2003. V. 44, No 2. P. 272–280. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2022-5>.
46. Harper N., Howie L., Connor K., Dickerson R., Safe S. Immunosuppressive effects of highly chlorinated biphenyls and diphenyl ethers on T-cell dependent and independent antigens in mice // Toxicology. 1993. V. 85, Nos 2–3. P. 123–135. [https://doi.org/10.1016/0300-483X\(93\)90037-S](https://doi.org/10.1016/0300-483X(93)90037-S).
47. Harper N., Steinberg M., Thomsen J., Safe S. Halogenated aromatic hydrocarbon-induced suppression of the plaque-forming cell response in B6C3F1 splenocytes cultured with allogenic mouse serum: Ah receptor structure activity relationships // Toxicology. 1995. V. 99, No 3. P. 199–206. [https://doi.org/10.1016/0300-483X\(95\)03064-M](https://doi.org/10.1016/0300-483X(95)03064-M).

References

1. Reddy A.V.B., Moniruzzaman M., Aminabhavi T.M. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: Recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. *Chem. Eng. J.*, 2019, vol. 358, pp. 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>.
2. United Nations Environment Programme. Final Act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants. UNEP/POPS/CONF/4. Geneva, U. N., 2001. 44 p.
3. Zhao Q., Bai J., Lu Q., Gao Z., Jia J., Cui B., Liu X. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments/soils of different wetlands along 100-year coastal reclamation chronosequence in the Pearl River Estuary, China. *Environ. Pollut.*, 2016, vol. 213, pp. 860–869. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.039>.
4. Negrete-Bolagay D., Zamora-Ledezma C., Chuya-Sumba C., De Sousa F.B., Whitehead D., Alexis F., Guerrero V.H. Persistent organic pollutants: The trade-off between potential risks and sustainable remediation methods. *J. Environ. Manage.*, 2021, vol. 300, art. 113737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113737>.
5. Erickson M.D., Kaley II R.G. Applications of polychlorinated biphenyls. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 135–151. <https://doi.org/10.1007/s11356-010-0392-1>.
6. Warenik-Bany M., Maszewski S., Mikolajczyk S., Piskorska-Pliszczynska J. Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals. *Environ. Pollut.*, 2019, vol. 255, pt. 1, art. 113159. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113159>.
7. Müller M.H.B., Polder A., Brynildsrud O.B., Karimi M., Lie E., Manyilizu W.B., Mdegela R.H., Mokiti F., Murtadha M., Nonga H.E., Skaare J.U., Lyche J.L. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in human breast milk and associated health risks to nursing infants in Northern Tanzania. *Environ. Res.*, 2017, vol. 154, pp. 425–434. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.031>.
8. Devi N.L. Persistent organic pollutants (POPs): Environmental risks, toxicological effects, and bioremediation for environmental safety and challenges for future research. In: Saxena G., Bharagava R. (Eds.) *Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety*. Vol. 1: Industrial waste and its management. Singapore, Springer, 2020, pp. 53–67. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4.
9. Shuai J., Yu X., Zhang J., Xiong A.-s., Xiong F. Regional analysis of potential polychlorinated biphenyl degrading bacterial strains from China. *Braz. J. Microbiol.*, 2016, vol. 47, no. 3, pp. 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2014.12.001>.
10. Zhang H., Zhang H., Zhao L., Zhou B., Li P., Liu B., Wang Y., Yang C., Huang K., Zhang C. Ecosystem impact and dietary exposure of polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals in Chinese mitten crabs (*Eriocheir sinensis*) and their farming areas in Jiangsu, China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2021, vol. 227, art. 112936. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112936>.
11. Helou K., Harmouche-Karaki M., Karake S., Narbonne J.-F. A review of organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in Lebanon: Environmental and human contaminants. *Chemosphere*, 2019, vol. 231, pp. 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.109>.
12. Yakub A.S., Bassey B.O., Balogun K.J., Igbo J.K., Ajani G., Bello B., Abiodun O., Olapoju O., Nosazeogie E.O., Izge M.A. Human health risk of polychlorinated biphenyls in some brackish and marine fish species from Ondo South-West Nigeria. *Biomed. J. Sci. Tech. Res.*, 2020, vol. 30, no. 2, pp. 23258–23263. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2020.30.004928>.
13. Eze V.C., Onwukeme V.I., Ogbuagu J.O., Aralu C.C. Toxicity and risk evaluation of polychlorinated biphenyls in River Otamiri, Imo State. *Sci. Afr.*, 2023, vol. 22, art. e01983. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01983>.
14. Pieper D.H. Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 2005, vol. 67, no. 2, pp. 170–191. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1810-4>.

15. Bako C.M., Mattes T.E., Marek R.F., Hornbuckle K.C., Schnoor J.L. Biodegradation of PCB congeners by *Paraburkholderia xenovorans* LB400 in presence and absence of sediment during lab bioreactor experiments. *Environ. Pollut.*, 2021, vol. 271, art. 116364. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116364>.
16. Ilori M.O., Robinson G.K., Adebuseye S.A. Aerobic mineralization of 4,4'-dichlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by a novel natural bacterial strain that grows poorly on benzoate and biphenyl. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2008, vol. 24, no. 8, pp. 1259–1265. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>.
17. Furukawa K., Fujihara H. Microbial degradation of polychlorinated biphenyls: Biochemical and molecular features. *J. Biosci. Bioeng.*, 2008, vol. 105, no. 5, pp. 433–449. <https://doi.org/10.1263/jbb.105.433>.
18. Furukawa K. Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs). *J. Gen. Appl. Microbiol.*, 2000, vol. 46, no. 6, pp. 283–296. <https://doi.org/10.2323/jgam.46.283>.
19. Provisional Peer Reviewed Toxicity Values for *p*-Chlorobenzoic Acid (CASRN 74-11-3). EPA/690/R-07/005F. Washington, DC, U. S. Environ. Prot. Agency, 2007. 12 p.
20. Egorova D.O., Gorbunova T.I., Pervova M.G., Kir'yanova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Biodegradability of hydroxylated derivatives of commercial polychlorobiphenyls mixtures by *Rhodococcus*-strains. *J. Hazard. Mater.*, 2020, vol. 400, art. 123328. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123328>.
21. Gorbunova T.I., Egorova D.O., Pervova M.G., Kyrianova T.D., Demakov V.A., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Biodegradation of trichlorobiphenyls and their hydroxylated derivatives by *Rhodococcus*-strains. *J. Hazard. Mater.*, 2021, vol. 409, art. 124471. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124471>.
22. State Standard 31983-2012. Food products, feeds, food raw materials. Methods for determination of polychlorinated biphenyls. Moscow, Standartinform, 2014. 37 p. (In Russian)
23. State Standard R 54503-2011. Water. Methods for determination of polychlorinated biphenyls. Moscow, Standartinform, 2019. 32 p. (In Russian)
24. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Scientific Purposes. European Treaty Series No. 123. *Off. J. Eur. Union*, 1999, L 222, pp. 0031–0037.
25. *Rukovodstvo po provedeniyu doklinicheskikh issledovaniy lekarstvennykh sredstv* [Guidelines for Preclinical Studies of Medicinal Products]. Pt. 1. Moscow, Grif & Co., 2012. 944 p. (In Russian)
26. *Rukovodstvo po provedeniyu doklinicheskikh issledovaniy lekarstvennykh sredstv* [Guidelines for Preclinical Studies of Medicinal Products]. Pt. 2. Moscow, Grif & Co., 2012. 536 p. (In Russian)
27. IRIS Toxicological Review of Biphenyl (CAS No. 92-52-4). Final Report. EPA/635/R-11/005F. Washington, DC, U. S. Environ. Prot. Agency, 2011. 225 p.
28. Jerne N.K., Nordin A.A. Plaque formation in agar by single antibody-producing cells. *Science*, 1963, vol. 140, no. 3565, p. 405. <https://doi.org/10.1126/science.140.3565.405.a>.
29. Contaminated sites and health. Copenhagen, W. H. O. Reg. Off. Eur., 2013. 106 p.
30. Exposure levels for evaluating polychlorinated biphenyls (PCBs) in indoor school air. Washington, DC, U. S. Environ. Prot. Agency, 2024. URL: <https://www.epa.gov/pcbs/exposure-levels-evaluating-polychlorinated-biphenyls-pcbs-indoor-school-air>.
31. Chang Y.-C., Takada K., Choi D., Toyama T., Sawada K., Kikuchi S. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway. *Appl. Biochem. Biotechnol.*, 2013, vol. 170, no. 2, pp. 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>.
32. Rasulov B.A., Kim A.A., Lorenz A., Yadgarov K.T. Biodegradation of tritium labeled polychlorinated biphenyls (PCBS) by local salt tolerant mesophylic *Bacillus* strains. *J. Environ. Prot.*, 2010, vol. 1, no. 4, pp. 420–425. <https://doi.org/10.4236/jep.2010.14048>.

33. De J., Ramaiah N., Sarkar A. Aerobic degradation of highly chlorinated polychlorobiphenyls by a marine bacterium, *Pseudomonas* CH07. *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2006, vol. 22, no. 12, pp. 1321–1327. <https://doi.org/10.1007/s11274-006-9179-4>.
34. Field J.A., Sierra-Alvarez R. Microbial transformation of chlorinated benzoates. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 2008, vol. 7, no. 3, pp. 191–210. <https://doi.org/10.1007/s11157-008-9133-z>.
35. Kitagawa W., Miyauchi K., Masai E., Fukuda M. Cloning and characterization of benzoate catabolic genes in the gram-positive polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. strain RHA1. *J. Bacteriol.*, 2001, vol. 183, no. 22, pp. 6598–6606. <https://doi.org/10.1128/JB.183.22.6598-6606.2001>.
36. Xu C., Zang X., Hang X., Liu X., Yang H., Liu X., Jiang J. Degradation of three monochlorobenzoate isomers by different bacteria isolated from a contaminated soil. *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2017, vol. 120, pp. 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.02.020>.
37. Plotnikova E.G., Solyanikova I.P., Egorova D.O., Shumkova E.S., Golovleva L.A. Degradation of 4-chlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by the strain *Rhodococcus ruber* P25. *Microbiology*, 2012, vol. 81, no. 2, pp. 143–153. <https://doi.org/10.1134/S0026261712020117>.
38. Gorbunova T.I., Egorova D.O., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. Aerobic bacterial degradation of polychlorinated biphenyls and their hydroxy and methoxy derivatives. *Russ. Chem. Rev.*, 2024, vol. 93, no. 11, art. RCR5138. <https://doi.org/10.59761/RCR5138>.
39. Adedokun V.A., Hammed T.B., Lateef S.A. Health risk assessment of phthalate esters and polychlorinated biphenyls from marine plastic pollution in coastal areas of Lagos, Nigeria. *Env. Sci. Pollut. Res.*, 2024, vol. 31, no. 58, pp. 66150–66163. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35657-w>.
40. Ermler S., Kortenkamp A. Systematic review of associations of polychlorinated biphenyl (PCB) exposure with declining semen quality in support of the derivation of reference doses for mixture risk assessments. *Environ. Health*, 2022, vol. 21, no. 1, art. 94. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00904-5>.
41. Pawełczyk A. Assessment of health risk associated with persistent organic pollutants in water. *Environ. Monit. Assess.*, 2013, vol. 185, no. 1, pp. 497–508. <https://doi.org/10.1007/s10661-012-2570-8>.
42. Chen B., Jiang H., Wang H., Yang G., Hao X. Concentration of polychlorinated biphenyls and risk assessment in finless porpoises from the East China Sea. *Toxicol. Res.*, 2024, vol. 40, no. 2, pp. 259–271. <https://doi.org/10.1007/s43188-023-00221-0>.
43. Fair P.A., Peden-Adams M.M., Mollenhauer M.A.M., Bossart G.D., Keil D.E., White N.D. Effects of an environmentally relevant PCB-mixture on immune function, clinical chemistry, and thyroid hormone levels in adult female B₆C₃F₁ mice. *J. Toxicol. Environ. Health, Part A*, 2021, vol. 84, no. 7, pp. 279–297. <https://doi.org/10.1080/15287394.2020.1863887>.
44. Duffy J.E., Carlson E., Li Y., Prophete C., Zelikoff J.T. Impact of polychlorinated biphenyls (PCBs) on the immune function of fish: Age as a variable in determining adverse outcome. *Mar. Environ. Res.*, 2002, vol. 54, nos. 3–5, pp. 559–563. [https://doi.org/10.1016/S0141-1136\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0141-1136(02)00176-9).
45. Arena S.M., Greeley E.H., Halbrook R.L., Hansen L.G., Segre M. Biological effects of gestational and lactational PCB exposure in neonatal and juvenile C57BL/6 mice. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, 2003, vol. 44, no. 2, pp. 272–280. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2022-5>.
46. Harper N., Howie L., Connor K., Dickerson R., Safe S. Immunosuppressive effects of highly chlorinated biphenyls and diphenyl ethers on T-cell dependent and independent antigens in mice. *Toxicology*, 1993, vol. 85, nos. 2–3, pp. 123–135. [https://doi.org/10.1016/0300-483X\(93\)90037-S](https://doi.org/10.1016/0300-483X(93)90037-S).
47. Harper N., Steinberg M., Thomsen J., Safe S. Halogenated aromatic hydrocarbon-induced suppression of the plaque-forming cell response in B6C3F1 splenocytes cultured with allogenic mouse serum: Ah receptor structure activity relationships. *Toxicology*, 1995, vol. 99, no. 3, pp. 199–206. [https://doi.org/10.1016/0300-483X\(95\)03064-M](https://doi.org/10.1016/0300-483X(95)03064-M).

Информация об авторах

Дарья Олеговна Егорова, доктор биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории микробиологии техногенных экосистем Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиала ПФИЦ УрО РАН

E-mail: daryao@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8018-4687>

Сергей Владимирович Гейн, доктор медицинских наук, профессор, директор Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиала ПФИЦ УрО РАН

E-mail: gein@iegm.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0799-3397>

Николай Александрович Королёв, аспирант лаборатории микробиологии техногенных экосистем Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиала ПФИЦ УрО РАН

E-mail: nicolay.korolyov@autluk.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3068-249X>

Татьяна Денисовна Кирьянова, инженер лаборатории микробиологии техногенных экосистем Института экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН – филиала ПФИЦ УрО РАН

E-mail: kitadi2101@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3161-6444>

Author Information

Darya O. Egorova, Dr. Sci. (Biology), Associate Professor, Senior Researcher, Laboratory of Technogenic Ecosystems Microbiology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: daryao@rambler.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8018-4687>

Sergey V. Gein, Dr. Sci. (Medicine), Professor, Head of Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: gein@iegm.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0799-3397>

Nikolay A. Korolev, Postgraduate Student, Laboratory of Technogenic Ecosystems Microbiology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: nicolay.korolyov@autluk.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3068-249X>

Tatyana D. Kir'yanova, Engineer, Laboratory of Technogenic Ecosystems Microbiology, Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms, Ural Branch, Russian Academy of Sciences

E-mail: kitadi2101@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3161-6444>

Поступила в редакцию 27.05.2025

Принята к публикации 11.07.2025

Received May 27, 2025

Accepted July 11, 2025