

РАЗДЕЛ 2. ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Обзорная статья

УДК 579.2/579.6

DOI: <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-68-88>

**Полихлорированные бифенилы как причина экологических проблем
и разработки ремедиационных технологий на основе биологических агентов**

Дарья Олеговна Егорова

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН, Пермь, Россия

daryao@rambler.ru

Аннотация. В обзоре представлен анализ актуальных на данный момент проблем, связанных с загрязнением окружающей среды полихлорированными бифенилами – соединениями, включенными в рамках международной конвенции в список Стойких органических загрязнителей. Показаны особенности строения молекулы полихлорбифенилов и их взаимодействия с окружающей средой и живыми организмами. Основное внимание уделено аэробным бактериям, одному из основных компонентов микробиоценоза почв. Показано, что длительное воздействие полихлорбифенилов привело к преимущественному отбору в загрязненных микробиоценозах бактерий, способных использовать полихлорированные бифенилы как источник углерода и энергии. Наиболее активные штаммы послужили основой биотехнологических препаратов, направленных на удаление полихлорбифенилов из окружающей среды.

Ключевые слова: полихлорированные бифенилы, бактерии, штаммы, аэробная деструкция, очистка почв/

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания номер АААА-А19-119112290009-1 «Молекулярные механизмы адаптации микроорганизмов к факторам среды».

Для цитирования: Егорова Д.О. Полихлорированные бифенилы как причина экологических проблем и разработки ремедиационных технологий на основе биологических агентов // Антропогенная трансформация природной среды. 2023. Т. 9. № 2. С. 68–88. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-68-88>

SECTION 2. POLLUTION

Review Paper

DOI: <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-68-88>

**Polychlorinated biphenyls as a cause of ecological problems and development
of remediation technologies based on biological agents**

Darya O. Egorova

Perm State University, Perm, Russia

Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms UB RAS, Perm, Russia

daryao@rambler.ru

Abstract. The review presents an analysis of currently pressing problems associated with environmental pollution by polychlorinated biphenyls – compounds included in the list of Persistent Organic Pollutants under the international convention. The structural features of the polychlorinated biphenyl molecule and their interaction with the environment and living organisms are shown. The main attention is paid to aerobic bacteria, one of the main components of soil microbiocenosis. It was shown that long-term exposure to polychlorinated biphenyls led to the preferential selection in contaminated microbiocenosis of bacteria capable of using polychlorinated biphenyls as a source of carbon and energy. The most active strains served as the basis for biotechnological preparations aimed at removing PCBs from the environment.

Key words: polychlorinated biphenyls, bacteria, strains, aerobic destruction, soil purification

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of state assignment number АААА-А19-119112290009-1 «Molecular mechanisms of adaptation of microorganisms to environmental factors».

For citation: Egorova, D., 2023. Polychlorinated biphenyls as a cause of ecological problems and development of remediation technologies based on biological agents // *Anthropogenic transformation of the natural environment*. 9(2). pp. 68–88. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2023-2-68-88> (in Russian)

Введение

Одной из центральных проблем в сфере реализации мировой концепции устойчивого развития, в части, посвященной окружающей среде и экологии, является выведение из природных сред и техногенных образований стойких органических загрязнителей (СОЗ). Согласно Стокгольмской конвенции «О стойких органических загрязнителях» (2001 г), полихлорированные бифенилы (ПХБ) включены в список СОЗ и запрещены к производству и применению как особо опасные для животных и человека соединения, а их запасы должны быть уничтожены до 2028 г [46]. Россия приняла на себя обязательства по выполнению положений Стокгольмской конвенции в 2011 г ФЗ от 27.06.2011 № 164-ФЗ. По химической структуре ПХБ входят в класс ароматических соединений, содержащих в молекуле два ароматических кольца, на которых в качестве заместителей расположены атомы хлора в количестве от 1 до 10 [39]. Всего в группу хлорированных бифенилов входят 209 конгенов (соединений, имеющих в своей основе одинаковую химическую структуру, но отличающихся количеством и положением заместителей в молекуле). За период их производства в 1930 по 1980-е гг., по разным подсчетам, было выпущено более 1.5 млн тонн, из которых не менее 10% находятся в окружающей среде. В коммерческих целях ПХБ производились в виде смесей, содержащих от 40 до 70 конгенов, под различными торговыми марками. Так в США смеси ПХБ носили торговое название Aroclor, в Германии – Klorphen, в Чехии – Delor, в России – Совол и Трихлорбифенил, в Японии – Kaneclor [37, 77, 94].

ПХБ несут угрозу нормальному существованию экосистем, вызывают тяжелые заболевания живых организмов и аккумулируются в верхнем звене пищевой цепи в значительном количестве. При этом часть конгенов ПХБ по своей токсичности превосходят такие опасные СОЗ как полихлорированные дибензофураны и дибензо-диоксины [37, 94]. ПХБ устойчивы к воздействию физико-химических факторов, что обуславливает их длительное присутствие в природных объектах. Несмотря на то, что проблеме уничтожения ПХБ посвящено значительное количество исследований в области физики, химии и биологии, до сих пор остаются открытыми фундаментальные вопросы, связанные с поиском оптимальных экологически безопасных и экономически целесообразных механизмов удаления ПХБ из природных и техногенных объектов. Одним из перспективных направлений в решении данных вопросов является изучение деградационного потенциала природных аэробных бактерий.

ПХБ, являясь новым субстратом для бактериальных штаммов, спровоцировали эволюцию метаболических процессов в клетке в направлении адаптации к использованию новой химической структуры в качестве источника питания. Известно, что разложение ПХБ у аэробных бактерий идет с использованием метаболического пути трансформации незамещенного бифенила [16, 32, 62, 80, 90]. Выделяют две части бифенильного метаболического пути: верхнюю и нижнюю. В «верхнем» пути происходит окисление молекулы

бифенила под действием комплекса ферментов до образования бензойной и пентадиеновой кислот [16, 32, 62, 100]. «Нижний» путь – окисление бензойной и пентадиеновой кислот с участием различных групп ферментов [16, 32, 77, 78]. В большинстве случаев в штаммах-деструкторах представлен либо «верхний», либо «нижний» путь трансформации бифенила [17, 45, 90]. Полная утилизация бифенила/ПХБ возможна при наличии в микробиоценозе нескольких бактериальных штаммов, находящихся в синтрофных взаимодействиях [127]. Описано незначительное количество штаммов, осуществляющих разложение полихлорированных бифенилов до соединений основного обмена клетки [19, 52, 60, 63, 87].

Проведение всестороннего анализа метаболических особенностей аэробных бактериальных штаммов-деструкторов бифенила/ПХБ, выделенных из районов с высокой техногенной нагрузкой, внесет существенный вклад в развитие фундаментальных знаний в области микробной экологии, а также послужит основой для разработки эффективных экобиотехнологий, направленных на восстановление ПХБ-загрязненных территорий, и на уничтожение неустойчивых смесей ПХБ.

Цель исследования – комплексная оценка разнообразия аэробных бактерий-деструкторов полихлорированных бифенилов, а также их применения для очистки окружающей среды от ПХБ.

Полихлорированные бифенилы: физико-химические свойства

В основе химической структуры полихлорированных бифенилов лежит бифенил – по своему строению он представляет два ароматических цикла, соединенных С-С связью. ПХБ были синтезированы в результате хлорирования молекулы бифенила в присутствии железной стружки. Количество заместителей в молекуле бифенила зависело от времени протекания реакции и составляло от 1 до 10 атомов хлора на молекулу бифенила (рис.1 / fig. 1).

Всего к группе ПХБ относится 209 конгенов, отличающихся количеством и положением заместителей в молекуле. Бензольные кольца могут располагаться в одной плоскости или под углом друг к другу (угол может составлять до 90°). Положение бензольных колец зависит от количества заместителей в орто-положении. Молекулярная масса ПХБ составляет 188.7–498.7 у различных конгенов групп, растворимость в воде колеблется в пределах 0.000001–5.5 мг/дм³, logK_{ов} – 0.015–8.26, однако, ПХБ хорошо растворимы в жирах, маслах и органических растворителях. ПХБ обладают высокими диэлектрическими характеристиками (диэлектрическая константа 2.5–2.7), высокой теплопроводностью и высокой температурой вспышки (170–380°С). ПХБ характеризуются высокой химической стабильностью, не поддаются гидролизу и окислению в широком диапазоне температур, устойчивы к действию кислот и щелочей. По агрегатному состоянию смеси ПХБ представляют собой масла и смолы, от бесцветных до желтых [2].

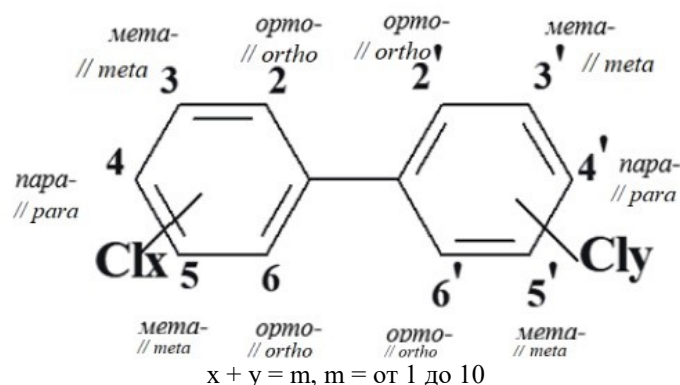


Рис. 1. Химическая формула молекулы полихлорбифенилов:
x, y – количество заместителей в каждом кольце
Fig. 1. Chemical formula of a polychlorinated biphenyl molecule:
x, y – number of substituents in each ring

Производство и применение ПХБ

Промышленное производство ПХБ было открыто в США в 1929 г, в СССР – в 1939 г. В этот же отрезок времени предприятия по производству ПХБ были открыты в ряде стран Европы и в Японии. ПХБ производили в виде смесей, содержащих от 30 до 70 конгенов, под различными торговыми марками: Aroclor – в США, Delor (Чехословакия), Klofen (Германия), Kaneclor (Япония), Совол, Совтол, Трихлорбифенил (ТХБ) (СССР), Fenclor (Франция) [8, 9, 11, 39]. Каждая из указанных марок имеет еще дополнительное цифровое обозначение, характеризующее соотношение входящих в нее конгенов. Следует отметить, что ряд коммерческих смесей, выпускавшихся в разных странах, имеют очень близкий состав. Одним из таких примеров являются смеси ТХБ (СССР) и Delor 103 (Чехословакия).

На территории России коммерческие смеси ПХБ выпускали на ПО «Оргстекло» г. Дзержинск, ОАО «Оргсинтез» г. Новомосковск. География предприятий, использовавших ПХБ как основное сырье в технологическом цикле, существенно шире: ОАО «Средневожский завод химикатов» г. Чапаевск, конденсаторный завод г. Серпухов (в настоящее время АО «КВАР»), нефте- и маслозаводы гг. Нижний Новгород, Санкт-Петербург, Оренбург, Уфа, Пермь. Потребителями продукции данных производств являются предприятия топливно-энергетического, металлургического и химического комплекса страны.

ПХБ применяли в качестве диэлектриков в трансформаторах и конденсаторах, в составе пластификаторов, смазочных смесей, лаков, красок, клеев, теплоносителей, хладагентов, эластомеров, поливинилхлоридов, неопрена, пластмасс, пенорезины, кровельных и изоляционных материалов (торговые марки Galbestos, Armaflex, Arobor), гидравлических и смазочных жидкостей (торговые марки Turbinol, Santovac) [123, 126, 128]. За время производства было синтезировано более 1 млн. тонн различных смесей ПХБ [94]. По различным оценкам в объектах окружающей среды находится порядка 40% всех произведенных ПХБ. Уровень загрязненности почв и водных объектов варьирует от 1–2 ПДК до нескольких десятков тысяч

ПДК. Согласно инвентаризации 2000 г в России в составе оборудования находится около 28–35 тыс. т. смесей ПХБ, из них около 21 тыс. т. – Совол и Совтол, и около 14 тыс. т. – Трихлорбифенил [11, 39]. Данные об анализе количества ПХБ в окружающей среде на территории РФ отсутствуют, но известно, что наиболее загрязненными являются районы их производства и активного использования, в том числе г. Дзержинск, г. Новомосковск, г. Чапаевск, г. Серпухов. Следует отметить, что ПХБ обнаруживаются как на территориях производства и применения, так и в удаленных районах, в том числе в Антарктике, Арктике и песках Сахары [11, 82, 126, 129]. Такое широкое распространение связано с высокой сорбционной способностью конгенов ПХБ, что способствует их переносу с пылевыми частицами на большие расстояния. Благодаря физико-химическим свойствам ПХБ долго остаются в окружающей среде в неизмененном виде. Производство ПХБ было прекращено в конце 20-го века [2].

ПХБ – угроза для живых организмов

Первые сообщения о негативном влиянии ПХБ на здоровье человека появились в 80-х годах 20 века. Массовые отравления ПХБ выражались в появлении угреподобной сыпи на коже людей, занятых на производстве данных соединений. Заболевание получило название хлоракне. Появились сведения и об отравлении людей, не связанных с производством, но употреблявшими в пищу продукты, содержащие ПХБ. Было установлено, что ПХБ вызывают не только кожные поражения, но и нарушения в деятельности нервной системы (невралгии, депрессии, нарушение иннервации внутренних органов), сердечно-сосудистой системы, иммунной системы, липидного обмена, эндокринной системы. ПХБ оказывают канцерогенный и тератогенный эффект [57, 79, 80, 97, 103]. При этом дозы, вызывающие негативные последствия, крайне низкие и сопоставимы с таковыми полихлорированных дибензодиоксинов и дибензофуранов. Были разработаны международные коэффициенты токсичности конгенов ПХБ, которые рассчитываются относительно 2,3,7,8-тетрахлордibenзо-1,4-диоксида. Значения данных коэффициентов варьируют в диапазоне 0.1–0.00001 [7].

К проникновению ПХБ в организм приводит их способность растворяться в органических растворителях, что ведет к их накоплению в жирах и, как следствие, продвижению по пищевым цепям с концентрированием в верхних сегментах [14, 76, 117]. В окружающую среду ПХБ поступали в результате аварийных выбросов на предприятиях, неправильной эксплуатации ПХБ-содержащего оборудования [82]. В настоящее время, несмотря на прекращение производства, ПХБ продолжают проникать в природные объекты из мест складирования, в результате нарушений технологий утилизации, возгорания промышленного оборудования. География загрязненных территорий увеличивается за счет трансграничного переноса с пылевыми частицами и перемещения живых объектов [4, 126, 128].

В ряде стран, в том числе в РФ, разработаны нормативы, регламентирующие безопасный уровень ПХБ в различных объектах. Согласно классификации опасных соединений, ПХБ отнесены ко II классу (высокоопасные вещества). В России ПДК для воздуха рабочей зоны составляет 1 мг ПХБ/м³, в воде – 1 мкг/л, в почве – 0.1 мг/кг. ОДК для отдельных групп конгенов в почве составляют: триХБ – 0.03 мг/кг, тетраХБ – 0.06 мг/кг, пентаХБ – 0.1 мг/кг; для пищевых продуктов: в рыбе – 2.0 мг/кг, в печени рыбы – 5.0 мг/кг, в рыбьем жире – 3.0 мг/кг, в молоке – 1.5 мг/кг (ГОСТ 12.1.005-88, СанПиН 4630-88). Установленные нормативы ПХБ для почв жилых зон в Германии составляют 0.8–1.0 мг/кг, в Китае – 2 мг/кг, в Нидерландах – 0.02 мг/кг, во Франции – 0.024 мг/кг, в Белоруссии – 0.02 мг/кг, для питьевой воды в США Агентством по окружающей среде установлена ПДК 0.5 мкг ПХБ/л воды, по нормативам Австралии присутствие ПХБ в питьевой воде недопустимо в любых концентрациях [8, 82].

Проблема реализации Стокгольмской конвенции в части, касающейся ПХБ

Реализация Стокгольмской конвенции в отношении ПХБ требует разработки методов по уничтожению ПХБ как в местах складирования, так и в объектах окружающей среды. Как было сказано выше, ПХБ обладают уникальными физико-химическими характеристиками, что существенно затрудняет их уничтожение. Разработки ведутся в направлении физических, химических и биологических методов.

В настоящее время наиболее распространенными являются термические методы, основанные на сжигании ПХБ при высоких температурах ($t = 2000^{\circ}\text{C}$, 4–6 т $\text{O}_2/1$ т ПХБ). Данная технология позволяет уничтожать ПХБ с эффективностью 99.99% при скорости 1 т/ч. Стоимость зависит от концентрации ПХБ в сжигаемой смеси и начинается от 1500 долларов США. При этом даже незначительные нарушения в технологии приводят к образованию из ПХБ еще более токсичных продуктов – ПХДФ и ПХДД [1]. Пиротехнические методы основаны на сжигании ПХБ с использованием пиротехнических смесей. Однако данные методы приводят к неконтролируемому образованию ПХДФ и ПХДД [1]. Электрохимические методы ограничены поиском эффективных и устойчивых электродов, которые не будут подвергаться коррозии в процессе реакции. Химические методы активно развиваются и являются

перспективными в направлении подготовки ПХБ для последующего уничтожения. Оценка всех имеющихся технологий позволяет сделать вывод, что уничтожение ПХБ является с экономических позиций высокозатратным, а с экологических – опасным для окружающей среды [2, 3, 7].

Наиболее «дружественными» для природы и единственными, позволяющими удалить ПХБ из природных объектов без разрушения самих объектов, являются методы, основанные на использовании биоремедиационного потенциала бактериальных штаммов.

Бактерии – основной агент экологически безопасной деструкции полихлорированных бифенилов

Основная роль в разложении ПХБ в природных условиях принадлежит микроорганизмам, и, в частности, бактериям [82]. В трансформации ПХБ принимают участие как анаэробные, так и аэробные бактерии. В анаэробных условиях (донные отложения морей, озер, рек, грунтовые воды) штаммы осуществляют восстановительное дегалогенирование высокохлорированных бифенилов, что не позволяет уничтожить ПХБ, но снижает их опасность и повышает биодоступность вследствие снижения степени хлорирования молекулы [13, 38]. Дегалогенирование обусловлено использованием ПХБ в качестве акцептора электронов, в результате чего происходит восстановление молекулы ПХБ до незамещенного бифенила, или до хлорбифенилов, содержащих 2–4 атомов хлора в молекуле [38, 70, 74, 109]. Обнаружены наиболее активные анаэробные штаммы-деструкторы ПХБ, принадлежащие родам *Acidovorax*, *Achromobacter*, *Anaeromyxobacter*, *Clostridium*, *Dehalobacter*, *Dehalococcoides*, *Desulfotobacterium*, *Desulfomonile*, *Desulfuromonas*, *Geobacter*, *Sedimentibacter* и *Sulfuricurvum* [67, 73, 125]. Анаэробное восстановление коммерческих смесей ПХБ в природных условиях приводит к существенному изменению в соотношениях конгенов (доля низкохлорированных бифенилов повышается в несколько раз), а также ведет к преобладанию *орто*-замещенных хлорбифенилов [28, 45, 121].

В результате деятельности аэробных бактерий в большинстве случаев происходит окисление молекулы ПХБ до образования хлорбензойной кислоты (ХБК) и (хлор)пентадиеновой кислоты [90, 100]. Однако известны штаммы, осуществляющие минерализацию ПХБ [19, 52, 63, 87]. В данном случае происходит деструкция молекулы полихлорбифенила до соединений основного обмена клетки. Основными ограничениями доступности ПХБ для аэробных бактерий является степень хлорирования и расположение заместителей в молекуле. Использование аэробных штаммов-деструкторов либо их комбинация с анаэробными штаммами позволяет существенно снизить уровень загрязнения природных объектов смесями полихлорбифенилов.

География распространения аэробных штаммов-деструкторов ПХБ

Исследования нескольких десятилетий выявили широкую географическую распространенность аэробных бактериальных штаммов, осуществляющих разложение хлорированных бифенилов (рис. 2 / fig. 2).

Показано, что штаммы, способные окислять (моно-гекса)-хлорированные бифенилы, выделяются из экониш различных континентов, и приурочены к местам загрязнения соединениями группы СОЗ. Описанные штаммы-деструкторы ПХБ принадлежат родам *Achromobacter*, *Agromyces*, *Alcaligenes*, *Aquamicrobium*, *Arthrobacter*, *Aspergillus*, *Bacillus*, *Brevibacillus*, *Brevibacterium*, *Castellaniella*, *Ceriporia*, *Chi-*

tinophaga, *Comamonas*, *Cupriavidus*, *Enterobacter*, *Hydrogenophaga*, *Janibacter*, *Janthinobacterium*, *Luteibacter*, *Mesorhizobium*, *Ochrotrachium*, *Paenibacillus*, *Pandora*, *Phanerochaete*, *Pleurotus*, *Pseudomonas*, *Rhodococcus*, *Shigella*, *Sphingobium*, *Sphingomonas*, *Stenotrophomonas*, *Subtercola*, *Talaromyces*, *Thermoascus*, *Trametes* и *Williamsia* [22, 36, 56, 57, 60, 66, 70, 80, 91, 92, 103, 105].

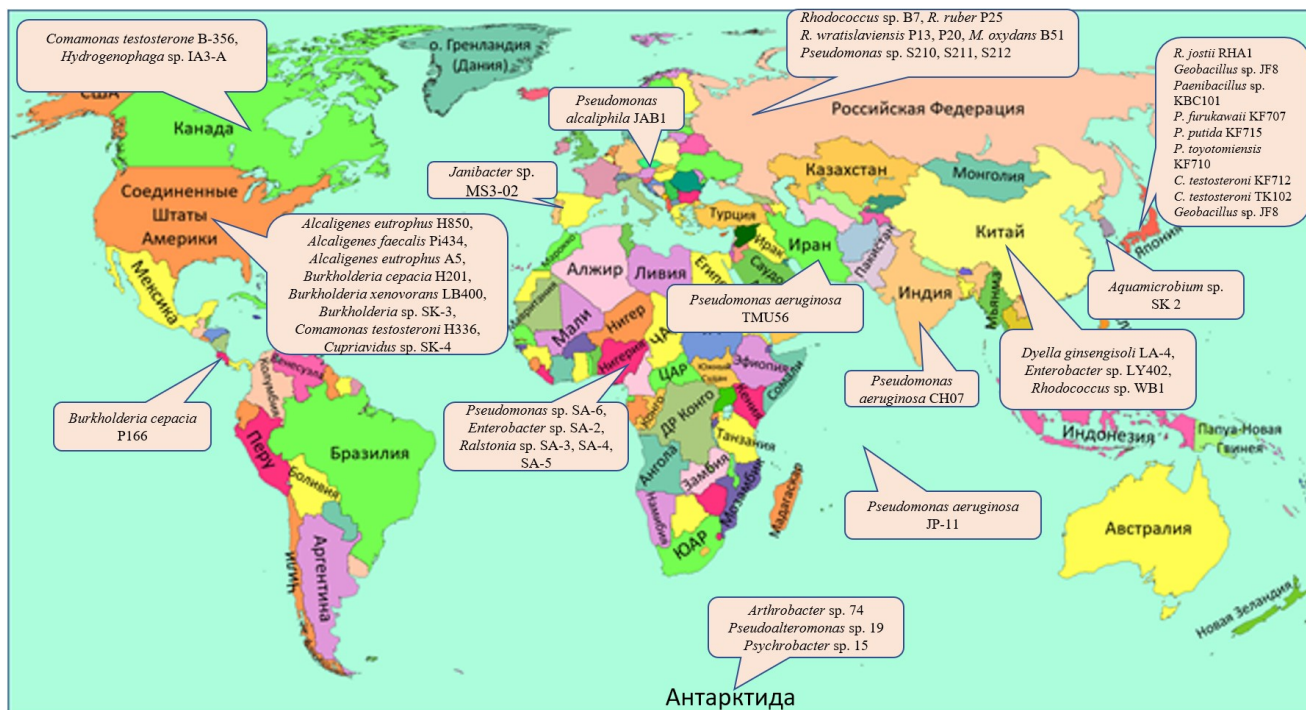


Рис. 2. Карта-схема мест выделения наиболее активных аэробных штаммов-деструкторов бифенила/ПХБ [5, 10, 12, 15, 18, 20, 21, 24, 25, 31, 33, 35, 40, 45, 47, 49, 54, 61, 69, 71, 72, 75, 95, 96, 98, 102, 104, 106, 112, 113, 116, 119, 120, 123, 124]

Fig. 2. Schematic map of the isolation sites of the most active aerobic biphenyl/PCB degrader strains [5, 10, 12, 15, 18, 20, 21, 24, 25, 31, 33, 35, 40, 45, 47, 49, 54, 61, 69, 71, 72, 75, 95, 96, 98, 102, 104, 106, 112, 113, 116, 119, 120, 123, 124]

Наиболее ранние работы по выделению и описанию штаммов-деструкторов бифенила/ПХБ проводились на территориях США и Японии. В результате проведенных исследований из ПХБ-загрязненных районов данных стран выделено значительное количество штаммов, обладающих различным деструктивным потенциалом. Наиболее изученными являются штаммы *Alcaligenes eutrophus* H850, *Burkholderia xenovorans* LB400, *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707, *Rhodococcus jostii* RHA1 [22, 50, 68, 75].

Штамм *Alcaligenes eutrophus* H850 использовал в качестве источника углерода не только незамещенный бифенил, но и 2-хлорбифенил, а также осуществлял разложение до хлорбензойных кислот тетра-, пента- и гекса-хлорированных конгенов. Bedard с соавторами показал, что *A. eutrophus* H850 осуществляет деструкцию коммерческих смесей ПХБ торговых марок Aroclor 1242 и 1254 [24].

Штамм *Burkholderia xenovorans* LB400 первоначально был идентифицирован как представитель рода *Pseudomonas*, далее реклассифицирован в род *Burkholderia*, а на основании анализа полногеномной последовательности был отнесен к роду *Paraburkhold-*

eria [30]. Показано, что LB400 осуществляет трансформацию как индивидуальных конгенов ПХБ с различной степенью хлорирования, так и коммерческих смесей. Пути деструкции бифенила/ПХБ подробно изучены на генетическом и молекулярном уровнях и являются модельными системами при аналогичных исследованиях других штаммов [23, 51].

Штамм *Pseudomonas pseudoalcaligenes* KF707 был выделен в Японии и первоначально идентифицирован как *Pseudomonas furukawaii* [48]. Отличительной особенностью штамма является его способность эффективно разлагать 4,4'-дихлорбифенил, слабо подверженный разложению другими известными штаммами-деструкторами. Однако штамм KF707 разлагал достаточно узкий диапазон изомеров ПХБ, что ограничивало перспективность его применения для биоремедиации [48].

Штамм *R. jostii* RHA1 был изолирован из почвы, загрязненной γ -гексахлорциклогексаном, отобранной на территории Японии, и характеризовался высокой деструктивной активностью по отношению к моно-, ди-, три-, тетра-, гекса- гептаХБ, как *орто*-, так и *пара*-замещенным изомерам ПХБ [72, 98, 118]. Показано, что

штамм *R. jostii* RHA1 осуществлял разложение технических смесей Kaneclor 200, 300, 400 (включающих три-, тетра- и пентахлорбифенилы, соответственно) в течение трех суток [48]. Следует отметить, что штамм *R. jostii* RHA1 проявлял активность и в отношении ди- и трихлорбензойных кислот, основных метаболитов ПХБ, о чем свидетельствовало снижение данных соединений в процессе деструкции хлорбифенилов. Исследования генома штамма показали, что в нем содержится два набора генов, кодирующих ферменты деструкции ПХБ [48].

Помимо данных штаммов с территорий США и Японии были выделены и другие активные деструкторы ПХБ. Так, штамм *Paenibacillus* sp. KBC101 активно утилизировал (три-гекса)-хлорированные бифенилы: 100 % – 2,5,2'-ХБ, 72 % – 2,5,2',5'-ХБ, 58 % – 2,4,5,2',5'-ХБ, так и *napa*-ХБ: 58 % – 2,4,3',4'-ХБ, 33 % – 2,4,2',4'-ХБ, 11 % – 2,4,5,2',4',5'-ХБ, в концентрации 10 мг/л [96]. Штаммы *Burkholderia* sp. SK-3 и *Cupriavidus* sp. SK-4, использовали монохлорбифенилы (2-ХБ, 3-ХБ, 4-ХБ), а также дихлорбифенилы – 2,2'-диХБ и 2,4'-диХБ (имеющие атомы хлора в *орто*-положении), в качестве единственного источника углерода и энергии [63, 64, 116].

С территории Китая выделены штаммы, проявляющие активность как к незамещенному бифенилу, так и к его хлорпроизводным. Штамм *Dyella ginsengisoli* LA-4 утилизировал около 95% бифенила (100 мг/л) в течение 72 часов [18], штамм *Rhodococcus* sp. WB1 проявлял активность к (моно-тетра)-хлорированным бифенилам, в том числе к 4,4'-диХБ [122, 123], штамм *Enterobacter* sp. LY402 обладал способностью трансформировать 92% – пентаХБ, 76% – гексаХБ и 37% – гептаХБ, содержащихся в коммерческих смесях ПХБ, а также обладал активностью по отношению к некоторым октаХБ [61, 122].

Особый интерес представляют штаммы, изолированные с территории Нигерии. Штаммы *Ralstonia* sp. SA-3, *Ralstonia* sp. SA-4, *Ralstonia* sp. SA-5, *Pseudomonas* sp. SA-6 и *Enterobacter* sp. SA-2 характеризовались способностью к деструкции *мета*- и *орто*-дихлорированных бифенилов, а также *орто*-триХБ, содержащих заместители в обоих кольцах молекулы [15, 49]. В работе [59] описан штамм *Achromobacter xylosoxidans* IR08, который, в отличие от ранее выделенных *Ralstonia* sp. SA-4, *Ralstonia* sp. SA-5, *Pseudomonas* sp. SA-6, был способен утилизировать 4,4'-диХБ без накопления токсичных промежуточных продуктов. Интересным представляется и тот факт, что штамм *A. xylosoxidans* IR08 эффективнее рос на хлорированных бифенилах, чем на бифениле и бензоате. Вероятно, присутствие заместителей не оказывало ингибирующего действия на ферменты. На основании этого авторы сделали предположение об уникальности ферментных систем деструкции ПХБ штамма IR08 [59].

Одним из первых описанных штаммов, осуществляющих разложение ПХБ, является штамм *Burkholderia cepacia* P166, выделенный из загрязненных почв Панамы, и первоначально идентифицированный как *Pseudomonas cepacia* [20]. Штамм P166 характеризовался способностью использовать в качестве источника углерода все моно-хлорированные бифенилы.

Однако активный рост был отмечен только на 4-хлорбифениле, так как штамм P166 обладал системами утилизации и 4-хлорбензойной кислоты, основного метаболита 4-ХБ. Рост на 3-ХБ и 2-ХБ сопровождался накоплением токсичных продуктов. Так же, как и у вышеописанного штамма *A. xylosoxidans* IR08, скорость роста штамма *B. cepacia* P166 на 4-ХБ превышала рост на бифениле [45].

Способностью к деструкции бифенила/ПХБ обладает штамм *Aquamicrobium* sp. SK-2, выделенный из активного ила сточных вод (г. Сеул, Южная Корея). Следует отметить, что штамм SK-2 активно рос на бифениле в широком диапазоне концентраций (от 0.65 до 9.75 мМ), а эффективность деструкции при этом составляла от 46.7% до 100%, и находилась в обратной корреляционной зависимости от концентрации субстрата [32]. Штамм *Pseudomonas aeruginosa* JP-11, выделенный из донных отложений Бенгальского залива (Индийский океан), осуществлял разложение 200 мг/л бифенила за 72 часа на 98.85% [31].

Штаммы, выделенные из активного ила и ПХБ-загрязненных почв на территории Канады, осуществляли разложение (моно-три)-хлорированных бифенилов, а также коммерческой смеси ПХБ марки Agoclor 1242 [69, 106]. Для штамма *Comamonas testosteroni* B-356 отмечено предпочтительное окисление конгенов ПХБ, содержащих заместители в *мета*-положении [106]. Высокой активностью в отношении смеси ПХБ Agoclor 1242 обладал штамм *Janibacter* sp. MS3-02, выделенный из почвы, загрязненной выбросами мусоросжигательного завода на территории Испании [104]. Штамм *Pseudomonas aeruginosa* TMU56, выделенный из почв, загрязненных отходами электрохимической промышленности (Иран), эффективно разлагал смеси Agoclor 1242 и 1260. Помимо коммерческих смесей, данный штамм осуществлял деструкцию высоких концентраций таких конгенов ПХБ, как моноХБ (2-ХБ, 4-ХБ), диХБ (2,4-, 2,5-, 2,2'-, 4,4'-ХБ), триХБ (2,4,4'-ХБ), тетраХБ (2,2',5,5'-ХБ), гексаХБ (2,2',4,4',5,5'-ХБ) [52].

Штаммы-деструкторы ПХБ, изолированные из почв территории Российской Федерации, представлены в настоящем исследовании и будут описаны в экспериментальной части работы.

Большинство описанных штаммов-деструкторов ПХБ являются мезофильными организмами. Однако известно, что биодеструкция ПХБ возможна и при условиях, отклоняющихся от средних по ряду факторов, таких как температура или содержание солей. Способность разлагать ПХБ при условиях повышенного засоления описана для ограниченного числа бактерий [32, 33]. В частности, штамм *Pseudomonas aeruginosa* CH07, изолированный из прибрежной зоны в Индии, осуществлял деструкцию таких конгенов ПХБ как 3,3',4,4',5-пентахлорбифенил и 2,2',3,4,4',5,5'-гептахлорбифенил (в концентрации 100 мг/л), при концентрации NaCl ~ 3,4 %. Известно несколько психротолерантных штаммов (*Arthrobacter* sp. 74, *Pseudoalteromonas* sp. 19, *Psychrobacter* sp. 15, *Hydrogenophaga faeniospiralis* IA3-A), способных утилизировать ПХБ при +4°C и +15°C. Данные штаммы выделены из почв Антарктиды и Канады [69, 85]. Среди термофильных бактерий описан только один штамм

Geobacillus sp. JF8 (Япония), осуществляющий разложение бифенила при +60°C [31, 101].

Ассоциации бактерий, осуществляющие разложение полихлорбифенилов

Важную роль в разложении ПХБ играют бактериальные сообщества. Многочисленные исследования показали, что ассоциации бактерий, осуществляющие разложение ПХБ, формируются в различных средах: в почве, в донных отложениях, а также в экстремальных по физико-химическим условиям районах [29, 65, 89]. Видовой состав данных сообществ не стабилен, зависит от ряда факторов, в том числе от спектра присутствующих в среде загрязнителей [53]. Так как в процессе биоремедиации количество и разнообразие загрязняющих веществ изменяется, то в бактериальных сообществах отмечается явление сукцессии [29, 99, 108, 114].

Бактериальное сообщество, выделенное из ПХБ-загрязненных почв, было представлено в основном родами *Burkholderia*, *Variovorax*, *Xylophilus*, *Nevskia* и *Sphingomonas* (*Betaproteobacteria*), основными деструкторами выступали штаммы рода *Burkholderia*. Представители класса *Actinobacteria* занимали минорное положение [83]. Однако в ряде работ описано иное соотношение классов *Proteobacteria* и *Actinobacteria* в ПХБ-разлагающих бактериальных сообществах. В бактериальных ассоциациях RMC1, RMC2, ZMC56, ZMC57, DMC3, DMC14, выделенных из почв Хорватии, деструкцию ПХБ осуществляли штаммы рода *Rhodococcus* (класс *Actinobacteria*) [65]. Штамм *Rhodococcus* sp. Z6 являлся основным активным деструктором ПХБ в ассоциации TSZ7 [89].

Бактериальные сообщества проявляют активность как к индивидуальным конгенерам ПХБ, так и к коммерческим смесям. Из почв Чехии выделены три ассоциации аэробных бактерий, проявляющих активность к коммерческой смеси ПХБ марки Delor 103. Показано, что ассоциация III осуществляла 50% разложение Delor 103 и являлась более перспективной, чем ассоциации I и II, осуществляющие разложение низко хлорированных конгенов, входящих в состав смеси Delor 103 [27].

Существенную роль в разложении ПХБ играют анаэробные бактериальные сообщества. Ассоциация анаэробных бактерий, изолированная из иловых отложений Балтиморского порта, проявляла активность в отношении заместителей, находящихся в *орто*-положении в молекулах ПХБ [53]. Natarajan с коллегами [81] выделил анаэробное метаногенное бактериальное сообщество, проявляющее активность к заместителям в молекуле ПХБ во всех возможных положениях (*орто*-, *мета*- и *пара*-) и осуществляющее восстановление 2,3,4,5,6-пентаХБ до стадии образования бифенила. Несмотря на то, что основным конечным продуктом восстановительного дегалогенирования ПХБ у анаэробных сообществ является незамещенный бифенил, описана метаногенная ассоциация, осуществляющая разложение бифенила до углекислого газа и метана через стадию образования *пара*-крезола [81].

В ряде работ описаны бактериальные ассоциации, сконструированные на основе штаммов с известной деградативной активностью. Так, ассоциация ЕСОЗ

включала штамм *Pseudomonas* sp. СРЕ1, осуществляющий разложение 4-хлорбифенила и 3,4'-дихлорбифенила, а также два штамма, субстратом деструкции для которых являлись образующиеся при разложении ПХБ хлорбензойные кислоты. Показано, что в условиях биореактора смешанные культуры бактерий, в состав которых включены штаммы-деструкторы ПХБ и ХБК, эффективно разлагали (моно-ди)-хлорбифенилы и коммерческие смеси ПХБ марок Fenclor 42 и Agoclor 1221 [42-44]. Бактериальная ассоциация, состоящая из штамма *B. xenovorans* LB400 и генетически-модифицированного штамма *P. putida* mt-2a, осуществляла утилизацию высоких концентраций 2,4'-дихлорбифенила [93].

Таким образом, бактерии-деструкторы ПХБ представлены в микробиоценозах на всех континентах. В большинстве случаев они приурочены к территориям со специфическим загрязнением (ПХБ и другие соединения группы СОЗ). Выделенные и описанные штаммы представляют различные филогенетические группы, основную долю среди которых занимают представители классов *Actinobacteria*, *Proteobacteria* и *Firmicutes*. Высокую деградативную активность к ПХБ проявляют как индивидуальные штаммы бактерий, так и ассоциации.

Применение бактерий для очистки ПХБ-загрязненных почв

Производство ПХБ в промышленных масштабах и широкое использование в различных отраслях народного хозяйства послужило причиной загрязнения данными соединениями обширных территорий. Принимая во внимание особую опасность ПХБ для живых организмов, проблема очистки почв, производственных поверхностей и донных отложений является одной из активно исследуемых в последние десятилетия. Выявлены основные группы процессов, которые могут быть задействованы для уничтожения ПХБ в природных объектах (рис. 3 / fig. 3).

Анализ экспериментальных и литературных данных показал, что в естественных условиях разложение ПХБ протекает под действием физико-химических и биологических факторов, однако этот процесс очень длительный во времени и, по настоящее время, не обеспечивает полное разложение загрязнителя. Разработанные физико-химические технологии позволяют достичь 99.9% деструкции ПХБ, но при этом они энерго- и экономически затратны, а также приводят к разрушению очищаемого субстрата (почвы, донных отложений), при этом могут выделяться токсические соединения.

Биоремедиация является экологически безопасным методом очистки почв от ПХБ. С позиций экономических затрат данные технологии наиболее выгодны. Однако есть недостатки – процесс ремедиации относительно медленный (может занимать от нескольких месяцев до нескольких лет) и разрушению подвергаются не все конгенеры ПХБ. В последнее время появляются сообщения о применении комбинированных методов (сорбция ПХБ + бактериальная деструкция, электрохимическая обработка почв перед биоаугментацией и др.). Однако эти методы еще недостаточно используются и находятся в стадии изучения [88, 115, 110].

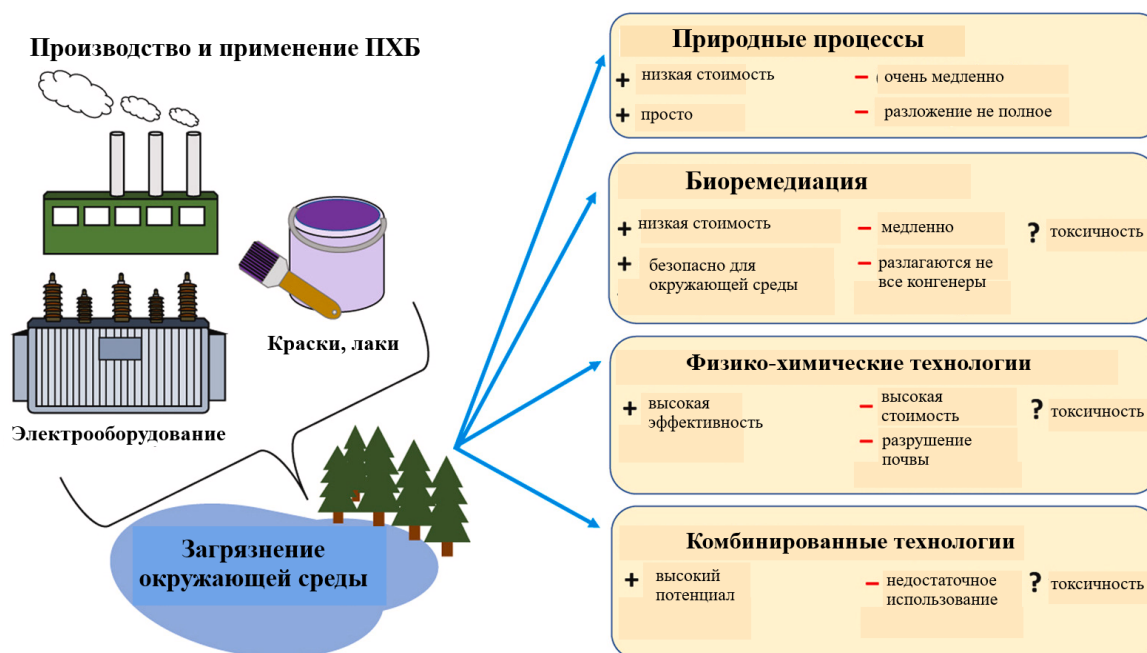


Рис. 3. Основные группы процессов, используемые для восстановления ПХБ-загрязненных территорий (авторский перевод) [110]

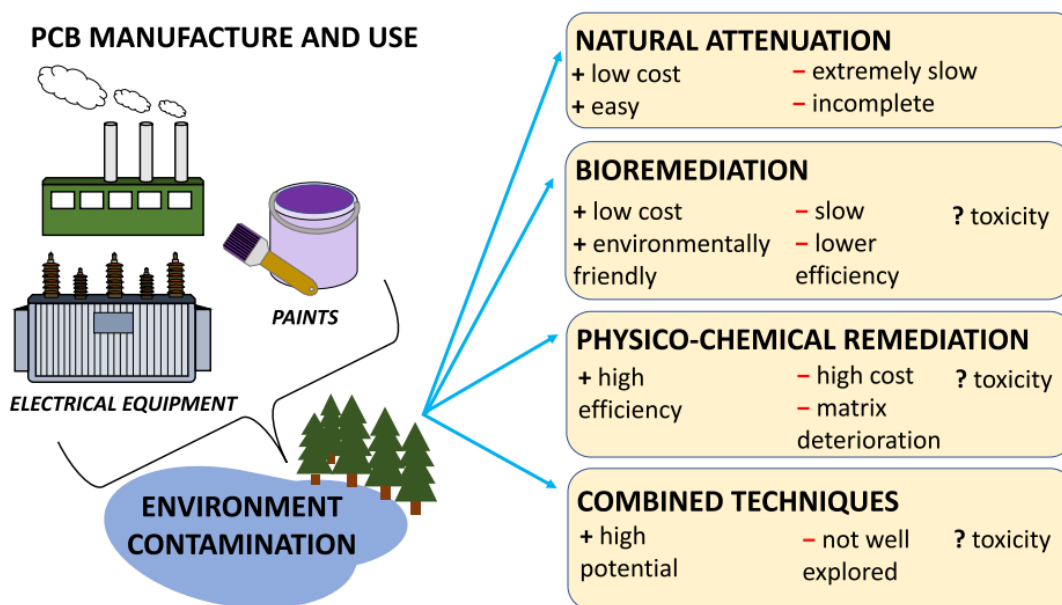


Fig. 3. Main groups of processes used for remediation of PCB-contaminated areas [110]

Основываясь на результатах проведенного анализа, можно заключить, что наиболее перспективным и эффективным подходом в восстановлении ПХБ-загрязненных почв является биоремедиация с применением бактериальных штаммов. Процесс биоремедиации почв в естественных условиях обусловлен активностью анаэробных и аэробных бактерий. Анаэробное восстановление ПХБ приводит к снижению количества заместителей в молекуле хлорбифенила, что способствует снижению диоксин-подобной токсичности конгенеров ПХБ и повышает их биодоступность для аэробных бактерий. Очистка почв от ПХБ может быть обеспечена только применением аэробных бактерий, так как в аэробном метаболизме происходит расщепление молекул до не токсичных или менее токсичных

соединений, тогда как в анаэробных условиях происходит снижение степени хлорирования без расщепления молекулы [88, 115].

Основными направлениями биоремедиации ПХБ-загрязненных почв с использованием метаболического потенциала бактериальных штаммов являются биостимуляция и биоаугментация.

Применение методов биостимуляции (внесение азота, лактата, инкубация в анаэробных условиях) позволило снизить концентрацию высоко хлорированных конгенеров ПХБ и достичь 32–62% деструкции ПХБ, присутствовавших в почве и донных отложениях [34, 41, 73, 107, 108].

В рамках методов биоаугментации применяют внесение в почву как индивидуальных штаммов, так и их

сообществ. При этом следует учитывать риски внесения новых видов в сложившийся микробиоценоз [88]. Одним из подходов к снижению данных рисков является использование штаммов, ранее выделенных из загрязненных почв.

Одними из первых сообщений об эффективном применении для очистки почв от ПХБ являются патенты, связанные с применением штаммов *B. xenovorans* LB400 и *Alcaligenes eutrophus* H850 (патент США № 4843007, № 4843009, № 4876201, № 5009999). Внесение данных штаммов в почву, содержащую 50 ppm Aroclor 1242, 500 ppm Aroclor 1242 или 50 ppm Aroclor 1254, приводило к снижению концентрации смесей ПХБ на 43–85%. Наилучшие показатели отмечены при исходном уровне загрязнения в 50 ppm Aroclor 1242.

В результате внесения в почву, содержащую 100 мг Aroclor 1242/г почвы, штамма *Arthrobacter* sp. В1В через 9 сут происходило снижение концентрации дихлорбифенилов на 88%, трихлорбифенилов на 40%, тетрахлорбифенилов на 11% и пентахлорбифенилов на 3%. В случае, если почва была загрязнена ПХБ 2, ПХБ 3 и ПХБ 8 в концентрациях, сопоставимых с указанной выше (100 мг/г почвы), внесение штамма *Cupriavidus necator* JMS34 обуславливало снижение уровня загрязнения на 99%, а штамма *B. xenovorans* LB400 – на 85% (патент США № 7989194).

Российским агентством по патентам и товарным знакам выдан патент на штамм *Alcaligenes latus* ТХД-13, внесение которого в почву обеспечивает снижение содержания ПХБ на 35–50% при начальной концентрации загрязнителя 52.3–70.2 мг/кг почвы (патент РФ 2155804 С1). Жариков с коллегами [6] сообщает об эффективной биоаугментации двух штаммов микроорганизмов в почву г. Серпухов. На территории завода «Конденсатор» степень разложения ПХБ составила 90% (концентрация снизилась с 1600 до 160 мг/кг), на территории сквера концентрация ПХБ снизилась с 12–14 мг/кг до 0.1 мг/кг, а в сельскохозяйственных почвах, загрязненных высокохлорированными бифенилами, на участке в 1 га удалось достичь снижение ПХБ на 80–90% [6].

Применение бактериальных консорциумов позволяет эффективно восстанавливать ПХБ-загрязненные почвы. Совместное внесение трех аэробных бактерий (*Mycolicibacterium frederiksbergense* IN53, *Rhodococcus erythropolis* IN129, *Rhodococcus* sp. IN306) приводит к снижению концентрации ПХБ в почве через 6 месяцев на 84.5%, в том числе – на 58.6% ПХБ 180 [111]. Близкие результаты получены в случае применения штаммов родов *Rhodococcus* и *Achromobacter* [55].

Для повышения эффективности биоаугментации, а также улучшения технологических свойств вносимых биопрепаратов, предлагается использовать в качестве носителей различные органические материалы, а также дополнительно вносить в почву сурфактанты и другие соединения, повышающие биодоступность ПХБ [88, 110, 115]. Внесение сурфактантов «Saronin» и «Rhamnolipids R-90» при биоаугментации штамма *Achromobacter xylosoxidans* приводило к повышению эффективности удаления ПХБ с 30% до 55% и 60% соответственно. В качестве носителей предлагается ис-

пользовать альгинатный гель, гранулированный активированный уголь, биоуголь (biochar) [84, 109, 115]. Показано, что иммобилизация бактериального консорциума GYB1 в альгинатных гранулах снижает время полураспада ПХБ 118 с 8.14 до 3.79 дней [84]. Внесение биоугля, полученного из бамбука, совместно с бактериальным сообществом приводило к снижению концентрации ПХБ в почве на 65.68–78.93% при начальном содержании 60 мг Aroclor 1242/кг почвы [58].

Сочетание биостимуляции и биоаугментации также используется в технологиях биоремедиации ПХБ-загрязненных почв. Одним из примеров реализации данного подхода является очистка почвы с разным уровнем загрязнения ПХБ (127 мкг/г и 484 мкг/г). Внесение питательных веществ совместно с четырьмя бактериальными штаммами, обуславливало деградацию 58% и 60.8% ПХБ соответственно [29].

Таким образом, разработка технологий восстановления ПХБ-загрязненных почв на основе бактериальных штаммов является в настоящее время актуальным и перспективным направлением для решения вопросов сохранения безопасных условий окружающей среды.

Заключение

Анализ данных многочисленных исследований выявил высокий интерес к проблеме обезвреживания полихлорированных бифенилов, входящих в перечень стойких органических загрязнителей (СОЗ) [1, 46, 82]. Острую актуальность данной проблемы подтверждает тот факт, что Стокгольмская конвенция, регламентирующая список СОЗ и процедуры обращения с веществами данной группы, ратифицирована 185 странами (<http://chm.pops.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesandSignatories/tabid/4500/Default.aspx>).

Наиболее перспективным подходом для решения данной проблемы является деструкция ПХБ при участии аэробных бактерий [1, 38, 82]. Глобальная распространенность ПХБ обуславливает негативное давление на биоценозы как в регионах с развитой промышленностью, так и на территориях, удаленных от техногенных воздействий, что приводит к изменениям в составе микробиоценозов, направленных на увеличение доли бактерий, осуществляющих трансформацию/деструкцию ПХБ. Анализ мест выделения бактерий-деструкторов ПХБ показал, что в большинстве случаев экотопы были загрязнены полихлорбифенилами, а география охватывает все континенты [4, 11, 26, 82, 126–129].

Следует отметить, что описанные в литературе штаммы-деструкторы ПХБ существенно отличаются спектром разлагаемых конгенов хлорбифенилов (всего существует 209 конгенов ПХБ, отличающихся количеством и положением заместителей в молекуле) [22, 36, 56, 57, 60, 66, 70, 80, 91, 92, 103, 105]. Выявлена основная закономерность – наиболее доступными для аэробных бактерий являются хлорбифенилы, содержащие от 1 до 4 атомов хлора в молекуле, преимущественно в *орто*- или *мета*-положении. Описано незначительное количество штаммов, способных разлагать конгены ПХБ с количеством заместителей более 5, а также несущих атомы хлора в *пара*-положении [23, 24, 25, 48, 51, 59, 60]. Однако, ПХБ производились и применялись в виде смесей, основную долю в которых составляли высокохлорированные конге-

неры [9, 11, 39]. В связи с этим отмечается необходимость поиска бактериальных штаммов, осуществляющих разложение широкого спектра ПХБ, в том числе представленных в составе коммерческих смесей.

Адаптация аэробных бактерий к ПХБ-загрязнению привела к эволюции метаболических процессов. Разложение ПХБ осуществляется под действием ферментного комплекса, обуславливающего поэтапное окисление ароматического кольца. В основе лежит биохимический путь трансформации незамещенного бифенила [16, 47, 86].

Одной из основных мировых тенденций является развитие природоподобных технологий, направленных на удаление ПХБ из объектов окружающей среды, а также из мест складирования [110]. Данные технологии должны сочетать экологическую безопасность и экономическую эффективность. На современном этапе исследований показано, что основными агентами экобиотехнологий являются штаммы аэробных бактерий. Описанные выше особенности бактериальной деструкции ПХБ обуславливают необходимость дальнейшего поиска перспективных штаммов, а также новых направлений в развитии ПХБ-утилизирующих технологий.

Список источников

1. Горбунова Т.И., Первова М.Г., Забелина О.Н., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. Полихлорбифенилы: Проблемы экологии, анализа и химической утилизации М.: КРАСАНД; Екатеринбург: УрО РАН. 2011. 400 с.
2. Горбунова Т.И., Первова М.Г., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. Химическая функционализация полихлорированных бифенилов: новые достижения Екатеринбург: Издательство Уральского Университета. 2018. 728 с.
3. Горбунова Т.И., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. Химические методы превращений полихлорбифенилов // Успехи химии. 2010. Т. 79, № 6. С. 565–586.
4. Демин Д.В. Ремедиация почв, загрязнённых полихлорбифенилами: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.13. Пушино, 2013. 38 с.
5. Егорова Д.О., Шумкова Е.С., Демаков В.А., Плотникова Е.Г. Разложение хлорированных бифенилов и продуктов их биоокисления штаммом *Rhodococcus* sp. В7а // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46, № 6. С. 644–650.
6. Жариков Г.А., Марченко А.И., Крайнов О.А., Капранов В.В., Жариков М.Г. Разработка и полевые испытания технологий биоремедиации территорий, загрязнённых токсичными химическими веществами // Медицина экстремальных ситуаций. 2013. №2(44). С. 41–51.
7. Занавескин Л.Н., Аверьянов А.В. Полихлорбифенилы: проблемы загрязнения окружающей среды и технологические методы обезвреживания // Успехи химии. 1998. Т. 67, № 8. С. 788–800.
8. Крятов И.А., Тонкопий Н.И., Ушаков О.В., Водянова М.А., Донерьян Л.Г., Евсеева И.С., Ушаков Д.И., Туркова И.С., Воробьева О.В., Цанкова Н.Н. Регулирование безопасных уровней содержания полихлорированных бифенилов в почве: российский и международный опыт // Гигиена и санитария. 2013. № 6. С. 52–57.
9. Первова М.Г., Плотникова К.А., Горбунова Т.И., Салоутин В.И., Чупахин О.Н. Исследование конгенов полихлорированных бифенилов в технической смеси «Трихлорбифенил» // Журнал общей химии. 2015. Т. 85, № 8. С. 1374–1379. <https://doi.org/10.1134/S1070363215080216>
10. Плотникова Е.Г., Соляникова И.П., Егорова Д.О., Шумкова Е.С., Головлева Л.А. Особенности разложения 4-хлорбифенила и 4-хлорбензойной кислоты штаммом *Rhodococcus ruber* P25 // Микробиология. 2012. Т. 81. № 2. С. 159–159
11. Трегер Ю. СОЗ – стойкие и очень опасные // The Chemical Journal. 2013. №1. Р. 30–34.
12. Шумкова Е.С., Егорова Д.О., Боронникова С.В., Плотникова Е.Г. Полиморфизм генов *bphA* бактерий-деструкторов бифенила/хлорированных бифенилов // Молекулярная биология. 2015. Т. 49. № 4. С. 638–638.
13. Abramowicz D.A. Aerobic and anaerobic PCB biodegradation in the environment // Environmental health perspectives. 1995. Vol. 103. № 5. P. 97–99.
14. Adams C.I.M., Baker J.E., Kjellerup B.V. Toxicological effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) on freshwater turtles in the United States // Chemosphere. 2016. Vol. 154. P. 148–154.
15. Adebuseye S.A., Picardal F.W., Ilori M.O., Amund O.O., Fuqua C. Characterization of multiple novel aerobic polychlorinated biphenyl (PCB)-utilizing bacterial strains indigenous to contaminated tropical African soils // Biodegradation. 2008. Vol. 19, № 1. P. 145–159.
16. Agulló L., Pieper D.H., Seeger M. Genetics and Biochemistry of Biphenyl and PCB Biodegradation. In: Rojo F. (eds) Aerobic Utilization of Hydrocarbons, Oils, and Lipids. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology // Springer, Cham. 2019. P. 595–622.
17. Aken B.V., Correa P.A., Schnoor J.L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises // Environ. Sci. Technol. 2010. Vol. 44. № 8. P. 2767–2776.
18. Ang L.I., Yuanyuan Q.U., Jiti Z., Min G. Isolation and characteristics of a novel biphenyl-degrading bacterial strain, *Dyella ginsengisoli* LA-4 // Journal of Environmental Sciences. 2009. Vol. 21. № 2. P. 211–217.
19. Arensdorf J. J., Focht D. D. Meta cleavage pathway for 4-chlorobenzoate, an intermediate in the metabolism of 4-chlorobiphenyl by *Pseudomonas cepacia* P166 // Appl. Environ. Microbiol. 1995. Vol. 61. P. 443–447.
20. Arensdorf J. J., Focht D. D. Formation of chlorocatechol meta cleavage products by a pseudomonad during metabolism of monochlorobiphenyls // Appl. Environ. Microbiol. 1994. Vol. 60. P. 2884–2889.
21. Asturias J.A., Timmis K.N. Three different 2,3-dihydroxybiphenyl-1,2-dioxygenase genes in the gram-positive polychlorobiphenyl-degrading bacterium *Rhodococcus globerulus* P6 // Journal of bacteriology. 1993. Vol. 175. №. 15. P. 4631–4640.
22. Atago Y, Shimodaira J, Araki N, Bin Othman N, Zakaria Z, Fukuda M, Futami J, Hara H. Identification of novel extracellular protein for PCB/biphenyl metabolism in *Rhodococcus jostii* RHA1 // Biosci Biotechnol Biochem. 2016. Vol. 80. № 5. P. 1012–1019. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1127134>

23. 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. Article 116364. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116364>
24. Bedard D.L., Wagner R.E., Brennan M.J., Haberl M.L., Brown J.F. Extensive degradation of Aroclors and environmentally transformed polychlorinated biphenyls by *Alcaligenes eutrophus* H850 // *Appl Environ Microbiol.* 1987 Vol. 53. № 5. P. 1094–102. <https://doi.org/10.1128/aem.53.5.1094-1102.1987>
25. Bedard D.L., Haberl M.L. Influence of chlorine substitution pattern on the degradation of polychlorinated biphenyls by eight bacterial strains // *Microbial ecology.* 1990. Vol. 20. № 1. P. 87–102.
26. Blasco R., Wittich R.M., Mallavarapu M., Timmis K.N., Pieper D.H. From xenobiotic to antibiotic, formation of protoanemonin from 4-chlorocatechol by enzymes of the 3-oxoadipate pathway. // *J Biol Chem.* 1995. Vol. 270. № 49. P. 29229–35. <https://doi.org/10.1074/jbc.270.49.29229>
27. Bokvajová A., Burkhard J. Screening and separation of microorganisms degrading PCBs // *Environmental Health Perspectives Supplements.* 1994. Vol.102. № 2. P. 552–559.
28. Brown J.F., Wagner R.E.; Bedard D.L., Brennan M.J.; Carnahan, J.C. PCB transformations in upper Hudson sediments // *Northeastern Environmental Science.* 1984. Vol. 3. P. 166–178.
29. Cervantes-González E., Guevara-García M.A., García-Mena J., Ovando-Medina V.M. Microbial diversity assessment of polychlorinated biphenyl-contaminated soils and the biostimulation and bioaugmentation processes // *Environmental monitoring and assessment.* 2019. Vol. 191. № 2. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7227-4>
30. Chain PS, Deneff VJ, Konstantinidis KT, Vergez LM, Agulló L, Reyes VL, Hauser L, Córdova M, Gómez L, González M, Land M, Lao V, Larimer F, LiPuma JJ, Mahenthiralingam E, Malfatti SA, Marx CJ, Parnell JJ, Ramette A, Richardson P, Seeger M, Smith D, Spilker T, Sul WJ, Tsoi TV, Ulrich LE, Zhulin IB, Tiedje JM. *Burkholderia xenovorans* LB400 harbors a multi-replicon, 9.73-Mbp genome shaped for versatility // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2006. Vol. 103. № 42. P. 15280–15287.
31. Chakraborty J., Das S. Characterization of the metabolic pathway and catabolic gene expression in biphenyl degrading marine bacterium *Pseudomonas aeruginosa* JP-11 // *Chemosphere.* 2016. Vol. 144. P. 1706–1714.
32. Chang YC, Takada K, Choi D, Toyama T, Sawada K, Kikuchi S. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway // *Applied biochemistry and biotechnology.* 2013. Vol. 170. № 2. P. 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>
33. Chang YC, Sawada K, Kim ES, Jung K, Kikuchi S. Whole-genome sequence of *Aquamicrobium* sp. strain SK-2, a polychlorinated biphenyl-utilizing bacterium isolated from sewage sludge // *Genome Announce.* 2015. Vol. 3. № 3. <https://doi.org/10.1128/genomeA.00439-15>
34. Chun C.L. Electrical stimulation of microbial PCB degradation in sediment // *Water Res.* 2013. Vol. 47. P. 141–152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.038>
35. Chung S.Y., Maeda M., Song E., Horikoshij K., Kudo T. A Gram-positive polychlorinated biphenyl-degrading bacterium, *Rhodococcus erythropolis* strain TA421, isolated from a termite ecosystem // *Bioscience, biotechnology, and biochemistry.* 1994. Vol. 58. № 11. P. 2111–2113.
36. Colbert C.L., Agar N.Y., Kumar P., Chakko M.N., Sinha S.C., Powlowski J.B., Eltis L.D., Bolin J.T. Structural characterization of *Pandoraea pnomena* B-356 biphenyl dioxygenase reveals features of potent polychlorinated biphenyl-degrading enzymes // *PLoS One.* 2013. Vol. 8, № 1. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052550>
37. 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.* 2020. Springer, Singapore. P. 53–76. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4
38. Elangovan S., Pandian S.B.S., S. J. G., Joshi S.J. Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Environmental Fate, Challenges and Bioremediation // *Microbial Metabolism of Xenobiotic Compounds.* 2019. P. 165–188.
39. Erickson B.D., Kaley II R.G. Application of polychlorinated biphenyls // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2011. Vol. 18. P. 135–151.
40. Erickson B.D., Mondello F.J. Enhanced biodegradation of polychlorinated biphenyls after site-directed mutagenesis of a biphenyl dioxygenase gene // *Appl. Environ. Microbiol.* 1993. Vol. 59. № 11. P. 3858–3862.
41. Ewald J.M., Humes S.V., Martinez A., Schnoor J.L., Mattes T.E. Growth of *Dehalococcoides* spp. and increased abundance of reductive dehalogenase genes in anaerobic PCB-contaminated sediment microcosms // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2020. Vol. 27. P. 8846–8858. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05571-7>
42. Fava F., Di Gioia D., Marchetti L., Quattroni G. Aerobic dechlorination of low-chlorinated biphenyls by bacterial biofilms in packed-bed batch bioreactors // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1996. Vol. 45. P. 562–568.
43. Fava F., Di Gioia D., Cinti S., Marchetti L., Quattroni G. Degradation and dechlorination of low-chlorinated biphenyls by a three-membered bacterial co-culture // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 1994. Vol. 41. P. 117–123.
44. Fava F., Di Gioia D., Marchetti L. Role of the reactor configuration in the biological detoxification of a damp site-polychlorobiphenyl-contaminated soil in lab-scale slurry phase conditions // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2000. Vol. 53. P. 243–248.
45. Field J.A., Sierra-Alvarez R. Microbial transformation of chlorinated benzoates // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2008. Vol. 7. P. 191–210.
46. Final act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm, 22-23 May // UNEP / POPS/CONF/4. United Nations Environment Programme. Geneva. 2001. 44 p.
47. Fukuda K., Hosoyama A., Tsuchikane K., Ohji S, Yamazoe A., Fujita N., Shintani M., Kimbara K. Complete genome sequence of polychlorinated biphenyl degrader *Comamonas testosteroni* TK102 (NBRC 109938) // *Genome Announce.* 2014. Vol. 2, № 5. <https://doi.org/10.1128/genomea.00865-14>
48. Furukawa K. Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls

- (PCBs) // The Journal of general and applied microbiology. 2000. Vol. 46. № 6. P. 283–296.
49. Gioia R., Akindele A.J., Adebusoye S.A., Asante K.A., Tanabe S., Buekens A., Sasco A.J. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in Africa: a review of environmental levels // Environmental Science and Pollution Research. 2014. Vol. 21. № 10. P. 6278–6289. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05571-710.1007/s11356-013-1739-1>
50. Gómez-Gil L., Kumar P., Barriault D., Bolin J.T., Sylvestre M., Eltis L.D. Characterization of biphenyl dioxygenase of *Pandoraea pnomenus* B-356 as a potent polychlorinated biphenyl-degrading enzyme // Journal of bacteriology. 2007. Vol. 189. № 15. P. 5705–5715.
51. Goris J., De Vos P., Caballero-Mellado J., Park J., Falsen E., Quensen J.F., Tiedje J.M., Vandamme P. Classification of the biphenyl- and polychlorinated biphenyl-degrading strain LB400^T and relatives as *Burkholderia xenovorans* sp. nov // International journal of systematic and evolutionary microbiology. 2004. Vol. 54. № 5. P. 1677–1681.
52. Hatamian-Zarmi A., Shojaosadati S.A., Vashghani-Farahani E., Hosseinkhani S., Emamzadeh A. Extensive biodegradation of highly chlorinated biphenyl and Aroclor 1242 by *Pseudomonas aeruginosa* TMU56 isolated from contaminated soils // International Biodeterioration & Biodegradation. 2009. Vol. 63. № 6. P. 788–794.
53. Holoman T.R., Elbersson M.A., Cutter L.A., May H.D., Sowers K.R. Characterization of defined 2,3,5,6-tetrachlorobiphenyl-ortho-dechlorinating microbial community by comparative sequence analysis of genes coding for 16S rRNA // Appl. Environ. Microbiol. 1998. Vol. 64. P. 3359–3367.
54. Hong Q., Dong X., He L., Jiang X., Li S. Isolation of a biphenyl-degrading bacterium, *Achromobacter* sp. BP3, and cloning of the *bph* gene cluster // International Biodeterioration & Biodegradation. 2009. Vol. 63. № 4. P. 365–370.
55. Horvathova, H., Laszlova K., Dercova K. Bioremediation of PCB-contaminated shallow river sediments: the efficacy of biodegradation using individual bacterial strains and their consortia // Chemosphere. 2018. Vol. 193. P. 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.012>
56. Hou L.H., Dutta S.K. Phylogenetic characterization of several para- and meta-PCB dechlorinating *Clostridium* species: 16s rDNA sequence analyses // Letters in applied microbiology. 2000. Vol. 30. № 3. P. 238–243.
57. Hu J., Qian M., Zhang Q., Cui J., Yu C., Su X., Shen C., Hashmi M.Z., Shi J. *Sphingobium fuliginis* HC3: a novel and robust isolated biphenyl- and polychlorinated biphenyls-degrading bacterium without dead-end intermediates accumulation // PloS one. 2015. Vol. 10. № 4. Article e0122740 <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05571-710.1371/journal.pone.0122740>
58. Huang S., Shan M., Chen J., Penttinen P., Qin H. Contrasting dynamics of polychlorinated biphenyl dissipation and fungal community composition in low and high organic carbon soils with biochar amendment // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25. P. 33432–33442
59. Ilori M.O., Robinson G.K., Adebusoye 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. P. 1259–1265. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>
60. Ilori M.O., Picardal F.W., Aramayo R., Adebusoye S.A., Obayori O.S., Benedik M.J. Catabolic plasmid specifying polychlorinated biphenyl degradation in *Cupriavidus* sp. strain SK-4: Mobilization and expression in a pseudomonad // Journal of basic microbiology. 2015. Vol. 55. № 3. P. 338–345.
61. Jia L.Y., Zheng A.P., Xu L., Huang X.D., Zhang Q., Yang F.L. Isolation and characterization of comprehensive polychlorinated biphenyl degrading bacterium, *Enterobacter* sp. LY402 // J Microbiol Biotechnol. 2008. Vol. 18. № 5. P. 952–957.
62. Jia Y., Wang J., Ren C., Nahurira R., Khokhar I., Wang J., Fan S., Yan Y. Identification and characterization of a meta-cleavage product hydrolase involved in biphenyl degradation from *Arthrobacter* sp. YC-RL1 // Appl. Microb. Biotech. 2019. Vol. 103. P. 6825–6836. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09956-z>
63. Kim S., Picardal F.W. A novel bacterium that utilizes monochlorobiphenyls and 4-chlorobenzoate as growth substrates // FEMS Microbiology Letters. 2000. Vol. 185. № 2. P. 225–229.
64. Kim S., Picardal F.W. Microbial growth on dichlorobiphenyls chlorinated on both rings as a sole carbon and energy source // Appl. Environ. Microbiol. 2001. Vol. 67. № 4. P. 1953–1955.
65. Kolar A.B., Hršak D., Fingler S., Četković H., Petrić I., Kolić N.U. PCB-degrading potential of aerobic bacteria enriched from marine sediments // Int. Biodeter. Biodegrad. 2007. Vol. 60. P. 16–24. <https://doi.org/10.16/j.ibiod.2006.11.004>
66. Kour D., Rana K.L., Kumar R., Yadav N., Rastegari A.A., Yadav A.N. Singh K. Gene manipulation and regulation of catabolic genes for biodegradation of biphenyl compounds // In New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering. 2019. P. 1–23.
67. Kranzioch I., Stoll C., Holbach A., Chen H., Wang L., Zheng B., Norra S., Bi Y., Schramm K.W., Tiehm A. Dechlorination and organohalide-respiring bacteria dynamics in sediment samples of the Yangtze Three Gorges Reservoir // Environmental Science and Pollution Research. 2013. Vol. 20. № 10. P. 7046–7056.
68. Kumar P., Mohammadi M., Viger J.F., Barriault D., Gomez-Gil L., Eltis L.D., Bolin J.T., Sylvestre M. Structural insight into the expanded PCB-degrading abilities of a biphenyl dioxygenase obtained by directed evolution // Journal of molecular biology. 2011. Vol. 405. № 2. P. 531–547.
69. Lambo A.J., Patel T.R. Cometabolic degradation of polychlorinated biphenyls at low temperature by psychrotolerant bacterium *Hydrogenophaga* sp. IA3-A // Current microbiology. 2006. Vol. 53. № 1. P. 48–52.
70. Liang Y., Martinez A., Hornbuckle K.C., Mattes T.E. Potential for polychlorinated biphenyl biodegradation in sediments from Indiana Harbor and Ship Canal // International biodeterioration & biodegradation. 2014. Vol. 89. P. 50–57.
71. Maltseva O.V., Tsoi T.V., Quensen J.F. 3rd, Fukuda M., Tiedje J.M. Degradation of anaerobic reductive

- dechlorination products of Aroclor 1242 by four aerobic bacteria // *Biodegradation*. 1999. Vol. 10. № 5. P. 363–371.
72. Masai E., Yamada A., Healy J.M., Hatta T., Kimbara K., Fukuda M., Yano K. Characterization of biphenyl catabolic genes of gram-positive polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Appl. Environ. Microbiol.* 1995. Vol. 61. № 6. P. 2079 – 2085.
73. Matturo B., Ubaldi C., Grenni P., Caracciolo A.B., Rossetti S. Polychlorinated biphenyl (PCB) anaerobic degradation in marine sediments: microcosm study and role of autochthonous microbial communities // *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. Vol. 23. P. 12613–12623. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.004>
74. Mohn W.W., Tiedje J.M. Microbial reductive dehalogenation // *Microbiological Reviews*. 1992. Vol. 56. P. 482–507.
75. Mondello F.J. Cloning and expression in *Escherichia coli* of *Pseudomonas* strain LB400 genes encoding polychlorinated biphenyl degradation // *Journal of bacteriology*. 1989. Vol. 171. № 3. P. 1725–1732.
76. 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 // *Environmental research*. 2017. Vol. 154. P. 425–434.
77. Murinová S., Dercová K., Dudášová H. Degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) by four bacterial isolates obtained from the PCB-contaminated soil and PCB-contaminated sediment. // *Int. Biodeter. Biodegrad.* 2014. Vol. 91. P. 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.011>
78. Murinová S., Dercová K. Potential Use of newly isolated bacterial strain *Ochrobactrum anthropi* in bioremediation of polychlorinated biphenyls. // *Water, Air, & Soil Pollution*. 2014. Vol. 225. Article 1980. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1980-3>
79. Murugan K., Vasudevan N. Intracellular toxicity exerted by PCBs and role of VBNC bacterial strains in biodegradation // *Ecotoxicology and environmental safety*. 2018. Vol. 157. P. 40–60.
80. Nam I.H., Chon C.M., Jung K.Y., Kim J.G. Biodegradation of biphenyl and 2-chlorobiphenyl by a *Pseudomonas* sp. KM-04 isolated from PCBs-contaminated coal mine soil // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 2014. Vol. 93. № 1. P. 89–94. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1286-6>
81. Natarajan M.R., Wu W.-M., Sanford R., Jain M.K. Degradation of biphenyl by methanogenic microbial consortium // *Biotechnol. Lett.* 1999. Vol. 21. P. 741–745.
82. 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. // *Journal of environmental Management*. 2021. Vol. 300. Article 113737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113737>
83. Nogales B., Moore E.R., Llobet-Brossa E., Rosello-Mora R., Amann R., Timmis K.N. Combined use of 16S ribosomal DNA and 16S rRNA to study the bacterial community of polychlorinated biphenyl-polluted soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 2001. Vol. 67. P. 1874–1884.
84. Ouyang X., Yin H., Yu X., Guo Z., Zhu M., Lu G., Dang Z. Enhanced bioremediation of 2,3',4,4',5-prnta-chlorobiphenyl by consortium GYB1 immobilized on sodium alginate-biochar // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 788. Article 147774.
85. Papale M., Giannarelli S., Francesconi S., Di Marco G., Mikkonen A., Conte A., Rizzo C., De Domenico E., Michaud L., Giudice A.L. Enrichment, isolation and biodegradation potential of psychrotolerant polychlorinated-biphenyl degrading bacteria from the Kongsfjorden (Svalbard Islands, High Arctic Norway) // *Marine pollution bulletin*. 2017. Vol. 114. № 2. P. 849–859.
86. Parales R.E., Resnic S.M. Aromatic ring hydroxylating dioxygenases // In: Ramos J.L., Levesque R.C. (eds) *Pseudomonas*. 2006. Springer. Boston, MA. P. 287–340.
87. Park S.H., Oh K.H., Kim C.K. Adaptive and cross-protective responses of *Pseudomonas* sp. DJ-12 to several aromatics and other stress shocks // *Curr. Microbiol.* 2001. Vol. 43. № 3. P. 176–181.
88. Passatore L., Rossetti S., Juwarkar A.A., Mascacci A. Phytoremediation and bioremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs): state of knowledge and research perspectives // *Journal of Hazardous Materials*. 2014. Vol. 278. P. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.051>
89. Petrić I., Hršak D., Fingler S., Udiković-Kolić N., Bru D., Martin-Laurent F. Insight in the PCB-degrading functional community in long-term contaminated soil under bioremediation // *Journal of soils and sediments*. 2011. Vol. 11. № 2. P. 290–300.
90. Pieper D.H. Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls // *Applied microbiology and biotechnology*. 2005. Vol. 67. № 2. P. 170–191. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1810-4>
91. Pieper D.H., Seeger M. Bacterial metabolism of polychlorinated biphenyls // *Journal of molecular microbiology and biotechnology*. 2008. Vol. 15. № 2-3. P. 121–138.
92. Ponce B.L., Latorre V.K., González M., Seeger M. Antioxidant compounds improved PCB-degradation by *Burkholderia xenovorans* strain LB400 // *Enzyme and microbial technology*. 2011. Vol. 49. № 6-7. P. 509–516.
93. Potrawfke T., Armengaud J., Wittich R.-M. Chlorocatechols substituted at positions 4 and 5 are substrates of the broad-spectrum chlorocatechol 1,2-dioxygenase of *Pseudomonas chlororaphis* RW71 // *Appl. Environ. Microbiol.* 2001. Vol. 183. P. 997–1011.
94. 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. // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 358. P. 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>
95. Ridl J., Suman J., Fraraccio S., Hradilova M., Strejcek M., Cajthaml T., Zubrova A., Macek T., Strnad H., Uhlik O. Complete genome sequence of *Pseudomonas alcaliphila* JAB1 (= DSM 26533), a versatile degrader of organic pollutants // *Standards in genomic sciences*. 2018. Vol. 13. № 1. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1186/s40793-017-0306-7>

96. Sakai M., Miyauchi K., Kato N., Masai E., Fukuda M. 2-Hydroxypenta-2, 4-dienoate metabolic pathway genes in a strong polychlorinated biphenyl degrader, *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // Appl. Environ. Microbiol. 2003. Vol. 69. № 1. P. 427–433
97. Serdar B., LeBlanc W.G., Norris J.M., Dickinson L.M. Potential effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) and selected organochlorine pesticides (OCPs) on immune cells and blood biochemistry measures: a cross-sectional assessment of the NHANES 2003–2004 data // Environmental Health. 2014. Vol. 13. № 1. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1186/1476-069x-13-114>
98. Seto M., Kimbara K., Shimura M., Hatta T., Fukuda M., Yano K. A novel transformation of polychlorinated biphenyls by *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // Appl. Environ. Microbiol. 1995. Vol. 61. № 9. P. 3353–3358.
99. Shah V., Zakrzewski M., Wibberg D., Eikmeyer F., Schlüter A., Madamwar D. Taxonomic profiling and metagenome analysis of a microbial community from a habitat contaminated with industrial discharges // Microbiol Ecol. 2013. № 66. P. 533–550. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0253-9>
100. Sharma J.K., Gautam R.K., Nanekar S.V., Weber R., Singh B.K., Singh S.K., Juwarkar A.A. Advances and perspective in bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils // Environmental Science and Pollution Research. 2018. Vol. 25. P. 16355–16375.
101. Shimura M., Mukerjee-Dhar G., Kimbara K., Nagato H., Kiyohara H., Hatta T. Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. JF8 capable of degrading polychlorinated biphenyls and naphthalene // FEMS microbiology letters. 1999. Vol. 178. № 1. P. 87–93.
102. Shintani M., Ohtsubo Y., Fukuda K., Hosoyama A., Ohji S., Yamazoe A., Fujita N., Nagata Y., Tsuda M., Hatta T., Kimbara K. Complete genome sequence of the thermophilic polychlorinated biphenyl degrader *Geobacillus* sp. strain JF8 (NBRC 109937 // Genome Announce. 2014. Vol. 2. № 1. <http://dx.doi.org/10.1128/genomeA.01213-13>
103. Shuai J., Yua X., Zhang J., Xiong A., Xiong F. Regional analysis of potential polychlorinated biphenyl degrading bacterial strains from China // Brazilian journal of microbiology. 2016. Vol. 47. № 3. P. 536–541.
104. Sierra I., Valera J.L., Marina M.L., Laborda F. Study of the biodegradation process of polychlorinated biphenyls in liquid medium and soil by a new isolated aerobic bacterium (*Janibacter* sp.) // Chemosphere. 2003. Vol. 53. № 6. P. 609–618.
105. Somaraja P.K., Gayathri D., Ramaiah N. Molecular characterization of 2-chlorobiphenyl degrading *Stenotrophomonas maltophilia* GS-103 // Bulletin of environmental contamination and toxicology. 2013. Vol. 91. № 2. P. 148–153.
106. Sondossi M., Barriault D., Sylvestre M. Metabolism of 2,2'-and 3,3'-dihydroxybiphenyl by the biphenyl catabolic pathway of *Comamonas testosteroni* B-356 // Appl. Environ. Microbiol. 2004. Vol. 70. № 1. P. 174–181.
107. Song M., Luo C., Li F., Jiang L., Wang Y., Zhang D., Zhang G. Anaerobic degradation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Polychlorinated Biphenyls Ethers (PBDEs), and microbial community dynamics of electronic waste-contaminated soil. // Sci. Total Environ. 2015. Vol. 502. P. 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.Sci-totenv.2014.09.045>
108. Song M., Jiang L., Zhang D., Luo C., Yin H., Li Y., Zhang G. Identification of biphenyl-metabolizing microbes in activated biosludge using cultivation-independent and -dependent approaches // Journal of Hazardous Materials. 2018. Vol. 353. P. 534–541.
109. Sowers K.R., May H.D. In situ treatment of PCBs by anaerobic microbial dechlorination in aquatic sediment: are we there yet? // Current opinion in biotechnology. 2013. Vol. 24. № 3. P. 482–488
110. Šrédlová K., Cajthaml T. Recent advances in PCB removal from historically contaminated environmental matrices // Chemosphere. 2022. Vol. 287. Article 132096.
111. Steliga T., Wojtowicz K., Kapusta P., Brzeszcz J. Assessment of biodegradation efficiency of polychlorinated biphenyls (PCBs) and petroleum hydrocarbons (TPH) in soil using three individual bacterial strains and their mixed culture. // Molecules. 2020. Vol. 25. Article 709.
112. Suenaga H., Yamazoe A., Hosoyama A., Kimura N., Hirose J., Watanabe T., Fujihara H., Futagami T., Goto M., Furukawa K. Draft genome sequence of the polychlorinated biphenyl-degrading bacterium *Cupriavidus basilensis* KF708 (NBRC 110671) isolated from biphenyl-contaminated soil // Genome Announce. 2015. Vol. 3. № 2. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1128/genomeA.00143-15>
113. Suenaga H., Fujihara H., Kimura N., Hirose J., Watanabe T., Futagami T., Goto M., Shimodaira J., Furukawa K. Insights into the genomic plasticity of *Pseudomonas putida* KF715, a strain with unique biphenyl-utilizing activity and genome instability properties // Environmental microbiology reports. 2017. Vol. 9. № 5. P. 589–598.
114. Tu C., Ma L., Guo P., Song F., Teng Y., Zhang H., Luo Y. Rhizoremediation of a dioxin-like PCB polluted soil by alfalfa: dynamic characterization at temporal and spatial scale // Chemosphere. 2017. Vol. 189. P. 517–524.
115. Valizadeh S., Lee S.S., Baek K., Choi Y.J., Jeon B.H., Rhee G.H., Andrew Lin K.Y., Park Y.K. Bioremediation strategies with biochar for polychlorinated biphenyls (PCBs)-contaminated soils: A review // Environmental Research. 2021. Vol. 200. Article 111757.
116. Vilo C., Benedik M.J., Ilori M., Dong Q. Draft genome sequence of *Cupriavidus* sp. strain SK-4, a di-ortho-substituted biphenyl-utilizing bacterium isolated from polychlorinated biphenyl-contaminated sludge // Genome Announce. 2014. Vol. 2, № 3. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1128/genomeA.00474-14>
117. Warenik-Bany M., Maszewski S., Mikolajczyk S., Piskorska-Pliszczynska J. Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals // Environmental Pollution. 2019. Vol. 255. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.004> [10.1016/j.environpol.2019.113159](https://doi.org/10.1016/j.environpol.2019.113159)
118. Warren R., Hsiao W.W., Kudo H., Myhre M., Dosanjh M., Petrescu A., Kobayashi H., Shimizu S., Miyauchi K., Masai E., Yang G., Stott J.M., Schein J.E., Shin H.,

- Khattra J., Smailus D., Butterfield Y.S., Siddiqui A., Holt R., Marra M.A., Jones S.J., Mohn W.W., Brinkman F.S., Fukuda M., Davies J., Eltis L.D. Functional characterization of a catabolic plasmid from polychlorinated-biphenyl-degrading *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Journal of bacteriology*. 2004. Vol. 186. № 22. P. 7783–7795.
119. Watanabe T., Yamazoe A., Hosoyama A., Fujihara H., Suenaga H., Hirose J., Futagami T., Goto M., Kimura N., Furukawa K. Draft genome sequence of *Cupriavidus pauculus* strain KF709, a biphenyl-utilizing bacterium isolated from biphenyl-contaminated soil // *Genome Announce*. 2015. Vol. 3. № 2. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1128/genomeA.00222-15>
120. Watanabe T., Yamazoe A., Hosoyama A., Fujihara H., Suenaga H., Hirose J., Futagami T., Goto M., Kimura N., Furukawa K. Draft genome sequence of *Pseudomonas toyotomiensis* KF710, a polychlorinated biphenyl-degrading bacterium isolated from biphenyl-contaminated soil // *Genome Announce*. 2015. Vol. 3. № 2. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.00410.1128/genomeA.00223-15>
121. Wiegel J., Wu Q.Z. Microbial reductive dehalogenation of polychlorinated biphenyls // *FEMS Microbiol. Lett.* 2000. Vol. 32. № 1. P. 1–15.
122. Xu L., Xu J.J., Jia L.Y., Liu W.B., Jian X. Congener selectivity during polychlorinated biphenyls degradation by *Enterobacter* sp. LY402 // *Current microbiology*. 2011. Vol. 62. № 3. P. 784–789.
123. Xu Y., Yu M., Shen A. Complete genome sequence of the polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. WB1 // *Genome Announce*. 2016. Vol. 4. № 5. https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.004_e00996-16
124. Yang X., Liu X., Song L., Xie F., Zhang G., Qian S. Characterization and functional analysis of a novel gene cluster involved in biphenyl degradation in *Rhodococcus* sp. strain R04 // *J. Appl. Microbiol.* 2007. Vol. 103. № 6. P. 2214–2224.
125. Yu H., Wan H., Feng Ch., Yi X., Liu X., Ren Y., Wei C. Microbial polychlorinated biphenyl dechlorination in sediments by electrical stimulation: The effect of adding acetate and nonionic surfactant // *Science of the Total Environment*. 2017. Vol. 580. P. 1371–1380.
126. Zhang P., Ge L., Gao H., Yao T., Fang X., Zhou C., Na G. Distribution and transfer pattern of polychlorinated biphenyls (PCBs) among the selected environmental media of Ny-Alesund, the Arctic: as a case study // *Marine pollution bulletin*. 2014. Vol. 89. № 1-2. P. 267–275.
127. Zhang Y., Deng C.P., Shen B., Yang J.S., Wang E.T., Yuan H.L. Syntrophic interactions within a butane-oxidizing bacterial consortium isolated from Puguang Gas Field in China. // *Microb. Ecol.* 2016. Vol. 72. P. 538–548. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0799-4>
128. 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 // *Environmental pollution*. 2016. Vol. 213. P. 860–869.
129. Zhu L., Zhou J., Zhang R., Tang X., Wang J., Li Y., Zhang Q., Wang W. Degradation mechanism of biphenyl and 4,4'-dichlorobiphenyl cis-dihydroxylation by non-heme 2,3 dioxygenases BphA: A QM/MM approach / L. Zhu [et al.] // *Chemosphere*. 2020. Vol. 247. Article 125844.

References

- Gorbunova, T., Pervova, M., Zabelina, O., Saloutin, V. and Chupakhin, O., 2011. *Polikhlorbifenily: Problemy ekologii, analiza i khimicheskoy utilizatsii* [Polychlorinated biphenyls: Problems of ecology, analysis and chemical disposal] M.: KRASAND; Yekaterinburg: UrO RAN. 400 p. (in Russian)
- Gorbunova, T., Pervova, M., Saloutin, V. and Chupakhin, O., 2018. *Khimicheskaya funktsionalizatsiya polikhlrorirovannykh bifenilov: novyye dostizheniya* [Chemical functionalization of polychlorinated biphenyls: new achievements] Yekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo Universiteta. 728 p. (in Russian)
- Gorbunova T.I., Saloutin V.I., Chupakhin O.N. 2010. *Khimicheskiye metody prevrashcheniy polikhlrorirovannykh bifenilov* [Chemical methods for the transformation of polychlorinated biphenyls] // *Uspekhi khimii*, 79(6), pp. 565–586. (in Russian)
- Demin, D., 2013. *Remediatsiya pochv, zagryaznennykh polikhlorbifenilami* [Remediation of soils contaminated with polychlorinated biphenyls]. Ph.D. dissertation. Pushchino, 38 p. (in Russian)
- Egorova, D., Shumkova, Ye., Demakov, V. and Plotnikova Ye., 2010. *Razlozheniye khlorirovannykh bifenilov i produktov ikh biokonversii shtammom Rhodococcus sp. V7a* [Decomposition of chlorinated biphenyls and their bioconversion products by *Rhodococcus* sp. B7a] // *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya*, 46(6), pp. 644–650. (in Russian)
- Zharikov, G., Marchenko, A., Kraynov, O., Kapranov, V. and Zharikov, M., 2013. *Razrabotka i polevyye ispytaniya tekhnologiy bioremediatsii territoriy, zagryaznennykh toksichnymi khimicheskimi veshchestvami* [Development and field testing of technologies for bioremediation of territories contaminated with toxic chemicals] // *Meditsina ekstremal'nykh situatsiy*, 2(44), pp. 41–51. (in Russian)
- Zanaveskin, L. and Aver'yanov, A., 1998. *Polikhlorbifenily: problemy zagryazneniya okruzhayushchey sredy i tekhnologicheskiye metody obezvezhivaniya* [Polychlorinated biphenyls: problems of environmental pollution and technological methods of neutralization] // *Uspekhi khimii*, 67(8), pp. 788–800. (in Russian)
- Kryatov, I., Tonkopi, N., Ushakov, O., Vodyanova, M., Doner'yan, L., Yevseyeva, I., Ushakov, D., Turkova, I., Vorob'yeva, O. and Tsapkova, N., 2013. *Regulirovaniye bezopasnykh urovney sodержaniya polikhlrorirovannykh bifenilov v pochve: rossiyskiy i mezhdunarodnyy opyt.* [Regulation of safe levels of polychlorinated biphenyls in soil: Russian and international experience] // *Gigiyena i sanitariya*, (6), pp. 52–57. (in Russian)
- Pervova, M., Plotnikova, K., Gorbunova, T., Saloutin, V. and Chupakhin, O., 2015. *Issledovaniye kongenerov polikhlrorirovannykh bifenilov v tekhnicheskoy smesi «Triklorbifenil»* [Study of congeners of polychlorinated biphenyls in the technical mixture “Trichlorobiphenyl”] // *Zhurnal obshchey khimii*. 85(8), pp. 1374–

1379. <https://doi.org/10.1134/S1070363215080216> (in Russian)
10. Plotnikova, Ye., Solyanikova, I., Yegorova, D., Shumkova, Ye. and Golovleva, L., 2012. Osobennosti razlozheniya 4-khlorbifenila i 4 khlorbenzoynoy kisloty shtammom *Rhodococcus ruber* P25 [Features of the decomposition of 4-chlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by the *Rhodococcus ruber* strain P25] // *Mikrobiologiya*, 81(2), pp. 159–159 (in Russian)
11. Treger, Y., 2013. SOZ – stoykiye i ochen' opasnyye [POPs – persistent and very dangerous] // *The Chemical Journal*, (1), pp. 30–34. (in Russian)
12. Shumkova, Ye., Yegorova, D., Boronnikova, S. and Plotnikova, Ye., 2015. Polimorfizm genov bphA bakteriy-destruktorov bifenila/khlorirovannykh bifenilov [Polymorphism of the bphA genes of biphenyl/chlorinated biphenyl degrading bacteria] // *Molekulyarnaya biologiya*, 49(4), pp. 638–638. (in Russian)
13. Abramowicz, D., 1995. Aerobic and anaerobic PCB biodegradation in the environment // *Environmental health perspectives*, 103(5), pp. 97–99.
14. Adams, C., Baker, J. and Kjellerup, B., 2016. Toxicological effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) on freshwater turtles in the United States // *Chemosphere*, 154, pp. 148–154.
15. Adebuseye, S., Picardal, F., Ilori, M., Amund, O. and Fuqua C., 2008. Characterization of multiple novel aerobic polychlorinated biphenyl (PCB)-utilizing bacterial strains indigenous to contaminated tropical African soils // *Biodegradation*, 19(1), pp. 145–159.
16. Agulló, L., Pieper, D. and Seeger, M., 2019. Genetics and Biochemistry of Biphenyl and PCB Biodegradation. In: Rojo F. (ed.) *Aerobic Utilization of Hydrocarbons, Oils, and Lipids. Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. Springer, Cham. pp. 595–622.
17. Aken, B., Correa, P. and Schnoor, J., 2010. Phytoremediation of polychlorinated biphenyls: new trends and promises // *Environ. Sci. Technol.*, 44(8), pp. 2767–2776.
18. Ang, L., Yuanyuan, Q., Jiti, Z. and Min, G., 2009. Isolation and characteristics of a novel biphenyl-degrading bacterial strain, *Dyella ginsengisoli* LA-4 // *Journal of Environmental Sciences*, 21(2), pp. 211–217.
19. Arensdorf, J. and Focht, D., 1995. Meta cleavage pathway for 4-chlorobenzoate, an intermediate in the metabolism of 4-chlorobiphenyl by *Pseudomonas cepacia* // *Appl. Environ. Microbiol.*, 61, pp. 443–447.
20. Arensdorf, J. and Focht, D., 1994. Formation of chlorocatechol meta cleavage products by a pseudomonad during metabolism of monochlorobiphenyls // *Appl. Environ. Microbiol.*, 60, pp. 2884–2889.
21. Asturias, J. and Timmis, K., 1993. Three different 2,3-dihydroxybiphenyl-1,2-dioxygenase genes in the gram-positive polychlorobiphenyl-degrading bacterium *Rhodococcus globerulus* P6 // *Journal of bacteriology*, 175(15), pp. 4631–4640.
22. Atago, Y., Shimodaira, J., Araki, N., Bin Othman, N., Zakaria, Z., Fukuda, M., Futami, J. and Hara, H., 2016. Identification of novel extracellular protein for PCB/biphenyl metabolism in *Rhodococcus jostii* RHA1 // *Biosci Biotechnol Biochem.*, 80(5), pp. 1012–1019. <https://doi.org/10.1080/09168451.2015.1127134>
23. Bako, C., Mattes, T., Marek, R., Hornbuckle, K. and Schnoor, J., 2021. Biodegradation of PCB congeners by *Paraburkholderia xenovorans* LB400 in presence and absence of sediment during lab bioreactor experiments // *Environ Pollut.*, 271, Article 116364. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116364>
24. Bedard, D., Wagner, R., Brennan, M., Haberl, M. and Brown, J., 1987. Extensive degradation of Aroclors and environmentally transformed polychlorinated biphenyls by *Alcaligenes eutrophus* H850 // *Appl Environ Microbiol.*, 53(5), pp. 1094–102. <https://doi.org/10.1128/aem.53.5.1094-1102.1987>
25. Bedard, D. and Haberl, M., 1990. Influence of chlorine substitution pattern on the degradation of polychlorinated biphenyls by eight bacterial strains // *Microbial ecology*, 20(1), pp. 87–102.
26. Blasco, R., Wittich, R., Mallavarapu, M., Timmis, K. and Pieper, D. 1995. From xenobiotic to antibiotic, formation of protoanemonin from 4-chlorocatechol by enzymes of the 3-oxoadipate pathway // *J Biol Chem.* V., 270(49), pp. 29229–35. <https://doi.org/10.1074/jbc.270.49.29229>
27. Bokvajová, A. and Burkhard, J., 1994. Screening and separation of microorganisms degrading PCBs // *Environmental Health Perspectives Supplements*, 102(2), pp. 552–559.
28. Brown, J., Wagner, R., Bedard, D., Brennan, M. and Carnahan, J., 1984. PCB transformations in upper Hudson sediments // *Northeastern Environmental Science*, 3, pp. 166–178.
29. Cervantes-González, E., Guevara-García, M., García-Mena, J. and Ovando-Medina, V., 2019. Microbial diversity assessment of polychlorinated biphenyl-contaminated soils and the biostimulation and bioaugmentation processes // *Environmental monitoring and assessment*, 191(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7227-4>
30. Chain, PS, Deneff, VJ, Konstantinidis, KT, Vergez, LM, Agulló, L, Reyes, VL, Hauser, L, Córdova, M, Gómez, L, González, M, Land, M, Lao, V, Larimer, F, LiPuma, JJ, Mahenthalingam, E, Malfatti, SA, Marx, CJ, Parnell, JJ, Ramette, A, Richardson, P, Seeger, M, Smith, D, Spilker, T, Sul, WJ, Tsoi, TV, Ulrich, LE, Zhulin, IB and Tiedje, JM., 2006. *Burkholderia xenovorans* LB400 harbors a multi-replicon, 9.73-Mbp genome shaped for versatility // *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(42), pp. 15280–15287.
31. Chakraborty, J. and Das, S., 2016. Characterization of the metabolic pathway and catabolic gene expression in biphenyl degrading marine bacterium *Pseudomonas aeruginosa* JP-11 // *Chemosphere*, 144, pp. 1706–1714.
32. Chang, YC, Takada, K, Choi, D, Toyama, T, Sawada, K and Kikuchi, S., 2013. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway // *Applied biochemistry and biotechnology*, 170(2), pp. 381–398. <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>
33. Chang, YC, Sawada, K, Kim, ES, Jung, K and Kikuchi, S., 2015. Whole-genome sequence of *Aquami-*

- crobiom sp. strain SK-2, a polychlorinated biphenyl-utilizing bacterium isolated from sewage sludge // *Genome Announce*, 3(3), <https://doi.org/10.1128/genomeA.00439-15>
34. Chun, C., 2013. Electrical stimulation of microbial PCB degradation in sediment // *Water Res.*, 47, pp.141–152. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.09.038>
35. Chung, S., Maeda, M., Song, E., Horikoshij, K. and Kudo, T., 1994. A Gram-positive polychlorinated biphenyl-degrading bacterium, *Rhodococcus erythropolis* strain TA421, isolated from a termite ecosystem // *Bioscience, biotechnology, and biochemistry*, 58(11), pp. 2111–2113.
36. Colbert, C., Agar, N., Kumar, P., Chakko, M., Sinha, S., Powlowski, J., Eltis, L. and Bolin, J., 2013. Structural characterization of *Pandoraea pnomenus* B-356 biphenyl dioxygenase reveals features of potent polychlorinated biphenyl-degrading enzymes // *PLoS One*, 8(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0052550>
37. Devi, N., 2020. 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*. Springer, Singapore. pp. 53–76. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4
38. Elangovan, S., Pandian, S. and Joshi, S., 2019. Polychlorinated Biphenyls (PCBs): Environmental Fate, Challenges and Bioremediation // *Microbial Metabolism of Xenobiotic Compounds*, pp. 165–188.
39. Erickson, B. and Kaley II, R., 2011. Application of polychlorinated biphenyls // *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 18, pp. 135–151.
40. Erickson, B. and Mondello, F., 1993. Enhanced biodegradation of polychlorinated biphenyls after site-directed mutagenesis of a biphenyl dioxygenase gene // *Appl. Environ. Microbiol.*, 59(11), pp. 3858–3862.
41. Ewald, J., Humes, S., Martinez, A., Schnoor, J. and Mattes, T., 2020. Growth of *Dehalococcoides* spp. and increased abundance of reductive dehalogenase genes in anaerobic PCB-contaminated sediment microcosms // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, pp. 8846–8858. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05571-7>
42. Fava, F., Di Gioia, D., Marchetti, L. and Quattroni G., 1996. Aerobic dechlorination of low-chlorinated biphenyls by bacterial biofilms in packed-bed batch bioreactors // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 45, pp. 562–568.
43. Fava, F., Di Gioia, D., Cinti, S., Marchetti, L. and Quattroni, G., 1994. Degradation and dechlorination of low-chlorinated biphenyls by a three-membered bacterial co-culture // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 41, pp. 117–123.
44. Fava, F., Di Gioia, D. and Marchetti, L., 2000. Role of the reactor configuration in the biological detoxification of a damp site-polychlorobiphenyl-contaminated soil in lab-scale slurry phase conditions // *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 53, pp. 243–248.
45. Field, J. and Sierra-Alvarez, R., 2008. Microbial transformation of chlorinated benzoates // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 7, pp. 191–210.
46. Final act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm, 22-23 May // UNEP / POPS/CONF/4. United Nations Environment Programme. Geneva. 2001. 44 p.
47. Fukuda, K., Hosoyama, A., Tsuchikane, K., Ohji, S., Yamazoe, A., Fujita, N., Shintani, M. and Kimbara, K., 2014. Complete genome sequence of polychlorinated biphenyl degrader *Comamonas testosteroni* TK102 (NBRC 109938) // *Genome Announce*, 2(5). <https://doi.org/10.1128/genomeA.00865-14>
48. Furukawa, K., 2000. Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) // *The Journal of general and applied microbiology*, 46(6), pp. 283–296.
49. Gioia, R., Akindele, A., Adebuseye, S., Asante, K., Tanabe, S., Buekens, A. and Sasco, A., 2014. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in Africa: a review of environmental levels // *Environmental Science and Pollution Research*, 21(10), pp. 6278–6289. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1739-1>
50. Gómez-Gil, L., Kumar, P., Barriault, D., Bolin, J., Sylvestre, M. and Eltis L., 2007. Characterization of biphenyl dioxygenase of *Pandoraea pnomenus* B-356 as a potent polychlorinated biphenyl-degrading enzyme // *Journal of bacteriology*, 189(15), pp. 5705–5715.
51. Goris, J., De Vos, P., Caballero-Mellado, J., Park, J., Falsen, E., Quensen, J., Tiedje, J. and Vandamme, P., 2004. Classification of the biphenyl- and polychlorinated biphenyl-degrading strain LB400^T and relatives as *Burkholderia xenovorans* sp. nov // *International journal of systematic and evolutionary microbiology*, 54(5), pp. 1677–1681.
52. Hatamian-Zarmi, A., Shojaosadati, S., Vashghani-Farahani, E., Hosseinkhani, S. and Emamzadeh, A., 2009. Extensive biodegradation of highly chlorinated biphenyl and Aroclor 1242 by *Pseudomonas aeruginosa* TMU56 isolated from contaminated soils // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(6), pp. 788–794.
53. Holoman, T., Elberson, M., Cutter, L., May, H. and Sowers K., 1998. Characterization of defined 2,3,5,6-tetrachlorobiphenyl-ortho-dechlorinating microbial community by comparative sequence analysis of genes coding for 16S rRNA // *Appl. Environ. Microbiol.*, 64, pp. 3359–3367.
54. Hong, Q., Dong, X., He, L., Jiang, X., Li, S., 2009. Isolation of a biphenyl-degrading bacterium, *Achromobacter* sp. BP3, and cloning of the *bph* gene cluster // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 63(4), pp. 365–370.
55. Horvathova, H., Laszlova, K. and Dercova, K., 2018. Bioremediation of PCB-contaminated shallow river sediments: the efficacy of biodegradation using individual bacterial strains and their consortia // *Chemosphere*, 193, pp. 270–277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.012>
56. Hou, L., Dutta, S., 2000. Phylogenetic characterization of several para- and meta-PCB dechlorinating *Clostridium* species: 16s rDNA sequence analyses // *Letters in applied microbiology*, 30(3), pp. 238–243.
57. Hu, J., Qian, M., Zhang, Q., Cui, J., Yu., Su, X., Shen, C., Hashmi, M.Z., Shi, J., 2015. *Sphingobium fuliginis* HC3: a novel and robust isolated biphenyl- and polychlorinated biphenyls-degrading bacterium without dead-end intermediates accumulation // *PloS one*, 10(4), Article e0122740. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122740>

58. Huang, S., Shan, M., Chen, J., Penttinen, P. and Qin, H., 2018. Contrasting dynamics of polychlorinated biphenyl dissipation and fungal community composition in low and high organic carbon soils with biochar amendment // *Environmental Science and Pollution Research*, 25, pp. 33432–33442
59. Ilori, M., Robinson, G. and Adebuseye, S., 2008. 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.*, 24, pp. 1259–1265.
<https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>
60. Ilori, M., Picardal, F., Aramayo, R., Adebuseye, S., Obayori, O. and Benedik M., 2015. Catabolic plasmid specifying polychlorinated biphenyl degradation in *Cupriavidus* sp. strain SK-4: Mobilization and expression in a pseudomonad // *Journal of basic microbiology*, 55(3), pp. 338–345.
61. Jia, L., Zheng, A., Xu, L., Huang, X. Zhang, Q. and Yang, F., 2008. Isolation and characterization of comprehensive polychlorinated biphenyl degrading bacterium, *Enterobacter* sp. LY402 // *J Microbiol Biotechnol.*, 18(5), pp. 952–957.
62. Jia, Y., Wang, J., Ren, C., Nahurira, R., Khokhar, J., Wang, J., Fan, S. and Yan, Y., 2019. Identification and characterization of a meta-cleavage product hydrolase involved in biphenyl degradation from *Arthrobacter* sp. YC-RL1 // *Appl. Microb. Biotech.* 103, pp. 6825–6836.
<https://doi.org/10.1007/s00253-019-09956-z>
63. Kim, S., Picarda, F., 2000. A novel bacterium that utilizes monochlorobiphenyls and 4-chlorobenzoate as growth substrates // *FEMS Microbiology Letters*, 185(2), pp. 225–229.
64. Kim, S. and Picardal, F., 2001. Microbial growth on dichlorobiphenyls chlorinated on both rings as a sole carbon and energy source // *Appl. Environ. Microbiol.* 67(4), pp. 1953–1955.
65. Kolar, A., Hršak, D., Fingler, S., Četković, H., Petrić, I. and Kolić, N., 2007. PCB-degrading potential of aerobic bacteria enriched from marine sediments // *Int. Biodeter. Biodegrad.* 60, pp. 16–24.
<https://doi.org/10.16/j.ibiod.2006.11.004>
66. Kour, D., Rana, K., Kumar, R., Yadav, N., Rastegari, A., Yadav, A. and Singh, K., 2019. Gene manipulation and regulation of catabolic genes for biodegradation of biphenyl compounds // *In New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering*, pp. 1–23.
67. Kranzioch, I., Stoll, C., Holbach, A., Chen, H., Wang, L., Zheng, B., Norra, S., Bi, Y., Schramm, K. and Tiehm, A., 2013. Dechlorination and organohalide-respiring bacteria dynamics in sediment samples of the Yangtze Three Gorges Reservoir // *Environmental Science and Pollution Research*, 20(10), pp. 7046–7056.
68. Kumar, P., Mohammadi, M., Viger, J., Barriault, D., Gomez-Gil, L., Eltis, L., Bolin, J. and Sylvestre, M., 2011. Structural insight into the expanded PCB-degrading abilities of a biphenyl dioxygenase obtained by directed evolution // *Journal of molecular biology*. 405(2), pp. 531–547.
69. Lambo, A. and Patel, T., 2006. Cometabolic degradation of polychlorinated biphenyls at low temperature by psychrotolerant bacterium *Hydrogenophaga* sp. IA3-A // *Current microbiology*. 53(1), pp. 48–52.
70. Liang, Y., Martinez, A., Hornbuckle, K. and Mattes, T., 2014. Potential for polychlorinated biphenyl biodegradation in sediments from Indiana Harbor and Ship Canal // *International biodeterioration & biodegradation*. 89, pp. 50–57.
71. Maltseva, O., Tsoi, T. and Quensen, J., 1999. 3rd, Fukuda M., Tiedje J.M. Degradation of anaerobic reductive dechlorination products of Aroclor 1242 by four aerobic bacteria // *Biodegradation*. 10(5), pp. 363–371.
72. Masai, E., Yamada, A., Healy, J., Hatta, T., Kimbara, K., Fukuda, M. and Yano, K., 1995. Characterization of biphenyl catabolic genes of gram-positive polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Appl. Environ. Microbiol.* 61(6), pp. 2079–2085.
73. Matturo, B., Ubaldi, C., Grenni, P., Caracciolo, A. and Rossetti, S., 2016. Polychlorinated biphenyl (PCB) anaerobic degradation in marine sediments: microcosm study and role of autochthonous microbial communities // *Environmental Science and Pollution Research*. 23, pp. 12613–12623. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.004>
74. Mohn, W. and Tiedje, J., 1992. Microbial reductive dehalogenation // *Microbiological Reviews*. 56, pp. 482–507.
75. Mondello, F., 1989. Cloning and expression in *Escherichia coli* of *Pseudomonas* strain LB400 genes encoding polychlorinated biphenyl degradation // *Journal of bacteriology*. 171(3), pp. 1725–1732.
76. Müller, M., Polder, A., Brynildsrud, O., Karimi, M., Lie, E., Manyilizu, W., Mdegela, R., Mokiti, F., Murtagha, M., Nonga, H., Skaare, J. and Lyche, J., 2017. Organochlorine pesticides (OCPs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in human breast milk and associated health risks to nursing infants in Northern Tanzania // *Environmental research*. 154, pp. 425–434.
77. Murinová, S., Dercová, K. and Dudášová, H., 2014. Degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs) by four bacterial isolates obtained from the PCB-contaminated soil and PCB-contaminated sediment // *Int. Biodeter. Biodegrad.* 91, pp. 52–59.
<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.011>
78. Murinová, S. and Dercová, K., 2014. Potential Use of newly isolated bacterial strain *Ochrobactrum anthropi* in bioremediation of polychlorinated biphenyls. // *Water, Air, & Soil Pollution*. 225. Article 1980.
<https://doi.org/10.1007/s11270-014-1980-3>
79. Murugan, K. and Vasudevan, N., 2018. Intracellular toxicity exerted by PCBs and role of VBNC bacterial strains in biodegradation // *Ecotoxicology and environmental safety*. 157, pp. 40–60.
80. Nam, I., Chon, C., Jung, K. and Kim, J., 2014. Biodegradation of biphenyl and 2-chlorobiphenyl by a *Pseudomonas* sp. KM-04 isolated from PCBs-contaminated coal mine soil // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 93(1), pp. 89–94.
<https://doi.org/10.1007/s00128-014-1286-6>

81. Natarajan, M., Wu, W.-M., Sanford, R. and Jain, M., 1999. Degradation of biphenyl by methanogenic microbial consortium // *Biotechnol. Lett.* 21, pp. 741–745.
82. Negrete-Bolagay, D., Zamora-Ledezma, C., Chuya-Sumba, C., De Sousa, F., Whitehead, D., Alexis, F. and Guerrero, V., 2021. Persistent organic pollutants: the trade-off between potential risks and sustainable remediation methods. // *Journal of environmental Management.* 300. Article 113737. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113737>
83. Nogales, B., Moore, E.R., Llobet-Brossa, E., Rosello-Mora, R., Amann, R. and Timmis, K., 2001. Combined use of 16S ribosomal DNA and 16S rRNA to study the bacterial community of polychlorinated biphenyl-polluted soil // *Appl. Environ. Microbiol.* 67, pp. 1874–1884.
84. Ouyang, X., Yin, H., Yu, X., Guo, Z., Zhu, M., Lu, G. and Dang, Z., 2021. Enhanced bioremediation of 2,3',4,4',5-prntachlorobiphenyl by consortium GYB1 immobilized on sodium alginate-biochar // *Science of the Total Environment.* 788. Article 147774.
85. Papale, M., Giannarelli, S., Francesconi, S., Di Marco, G., Mikkonen, A., Conte, A., Rizzo, C., De Domenico, E., Michaud, L. and Giudice A., 2017. Enrichment, isolation and biodegradation potential of psychrotolerant polychlorinated-biphenyl degrading bacteria from the Kongsfjorden (Svalbard Islands, High Arctic Norway) // *Marine pollution bulletin.* 114(2), pp. 849–859.
86. Parales, R. and Resnic, S., 2006. Aromatic ring hydroxylating dioxygenases // In: Ramos J.L., Levesque R.C. (eds) *Pseudomonas*. Springer. Boston, MA. P. 287–340.
87. Park, S., Oh, K. and Kim, C., 2001. Adaptive and cross-protective responses of *Pseudomonas* sp. DJ-12 to several aromatics and other stress shocks // *Curr. Microbiol.* 43(3), pp. 176–181.
88. Passatore, L., Rossetti, S., Juwarkar, A. and Mascacci, A., 2014. Phytoremediation and bioremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs): state of knowledge and research perspectives // *Journal of Hazardous Materials.* 278, pp. 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.051>
89. Petrić, I., Hršak, D., Fingler, S., Udiković-Kolić, N., Bru, D. and Martin-Laurent, F., 2011. Insight in the PCB-degrading functional community in long-term contaminated soil under bioremediation // *Journal of soils and sediments.* 11(2), pp. 290–300.
90. Pieper, D., 2005. Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls // *Applied microbiology and biotechnology.* 67(2), pp. 170–191. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1810-4>
91. Pieper, D. and Seeger, M., 2008. Bacterial metabolism of polychlorinated biphenyls // *Journal of molecular microbiology and biotechnology.* 15(2-3), pp. 121–138.
92. Ponce, B., Latorre, V., González, M., Seeger and M., 2011. Antioxidant compounds improved PCB-degradation by *Burkholderia xenovorans* strain LB400 // *Enzyme and microbial technology.* 49(6-7), pp. 509–516.
93. Potrawfke, T., Armengaud, J. and Wittich, R.-M., 2001. Chlorocatechols substituted at positions 4 and 5 are substrates of the broad-spectrum chlorocatechol 1,2-dioxygenase of *Pseudomonas chlororaphis* RW71 // *Appl. Environ. Microbiol.* 183, pp. 997–1011.
94. Reddy, A., Moniruzzaman, M. and Aminabhavi, T., 2019. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in the environment: recent updates on sampling, pretreatment, cleanup technologies and their analysis. // *Chemical Engineering Journal.* 358, pp. 1186–1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>
95. Ridl, J., Suman, J., Fraraccio, S., Hradilova, M., Strejcek, M., Cajthaml, T., Zubrova, A., Macek, T., Strnad, H. and Uhlík, O., 2018. Complete genome sequence of *Pseudomonas alcaliphila* JAB1 (= DSM 26533), a versatile degrader of organic pollutants // *Standards in genomic sciences.* 13(1) <https://doi.org/10.1186/s40793-017-0306-7>
96. Sakai, M., Miyauchi, K., Kato, N., Masai, E. and Fukuda, M., 2003. 2-Hydroxypenta-2, 4-dienoate metabolic pathway genes in a strong polychlorinated biphenyl degrader, *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Appl. Environ. Microbiol.* 69(1), pp. 427–433
97. Serdar, B., LeBlanc, W., Norris, J. and Dickinson, L., 2014. Potential effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) and selected organochlorine pesticides (OCPs) on immune cells and blood biochemistry measures: a cross-sectional assessment of the NHANES 2003-2004 data // *Environmental Health.* 13(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069x-13-114>
98. Seto, M., Kimbara, K., Shimura, M., Hatta, T., Fukuda, M. and Yano, K., 1995. A novel transformation of polychlorinated biphenyls by *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Appl. Environ. Microbiol.* 61(9), pp. 3353–3358.
99. Shah, V., Zakrzewski, M., Wibberg, D., Eikmeyer, F., Schlüter, A. and Madamwar, D., 2013. Taxonomic profiling and metagenome analysis of a microbial community from a habitat contaminated with industrial discharges // *Microbiol Ecology.* 66. pp. 533–550. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0253-9>
100. Sharma, J., Gautam, R., Nanekar, S., Weber, R., Singh, B., Singh, S. and Juwarkar, A., 2018. Advances and perspective in bioremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils // *Environmental Science and Pollution Research.* 25, pp. 16355–16375.
101. Shimura, M., Mukerjee-Dhar, G., Kimbara, K., Nagato, H., Kiyohara, H. and Hatta, T., 1999. Isolation and characterization of a thermophilic *Bacillus* sp. JF8 capable of degrading polychlorinated biphenyls and naphthalene // *FEMS microbiology letters.* 178(1), pp. 87–93.
102. Shintani, M., Ohtsubo, Y., Fukuda, K., Ho-soyama, A., Ohji, S., Yamazoe, A., Fujita, N., Nagata, Y., Tsuda, M., Hatta, T. and Kimbara, K., 2014. Complete genome sequence of the thermophilic polychlorinated biphenyl degrader *Geobacillus* sp. strain JF8 (NBRC 109937 // *Genome Announce.* 2(1), <https://doi.org/10.1128/genomeA.01213-13>
103. Shuai, J., Yua, X., Zhang, J., Xiong, A. and Xiong, F., 2016. Regional analysis of potential polychlorinated biphenyl degrading bacterial strains from China // *Brazilian journal of microbiology.* 47(3), pp. 536–541.
104. Sierra, I., Valera, J.L., Marina, M.L. and Laborda, F., 2003. Study of the biodegradation process of polychlorinated biphenyls in liquid medium and soil by a new isolated aerobic bacterium (*Janibacter* sp.) // *Chemosphere.* 53(6), pp. 609–618.

105. Somaraja, P., Gayathri, D. and Ramaiah, N., 2013. Molecular characterization of 2-chlorobiphenyl degrading *Stenotrophomonas maltophilia* GS-103 // *Bulletin of environmental contamination and toxicology*. 91(2), pp. 148–153.
106. Sondossi, M., Barriault, D. and Sylvestre, M., 2004. Metabolism of 2,2'-and 3,3'-dihydroxybiphenyl by the biphenyl catabolic pathway of *Comamonas testosteroni* B-356 // *Appl. Environ. Microbiol.* 70(1), pp. 174–181.
107. Song, M., Luo, C., Li, F., Jiang, L., Wang, Y., Zhang, D. and Zhang, G., 2015. Anaerobic degradation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Polychlorinated Biphenyls Ethers (PBDEs), and microbial community dynamics of electronic waste- contaminated soil. // *Sci. Total Environ.* 502, pp. 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.Sci-totenv.2014.09.045>
108. Song, M., Jiang, L., Zhang, D., Luo, C., Yin, H., Li, Y. and Zhang, G., 2018. Identification of biphenyl-metabolizing microbes in activated biosludge using cultivation-independent and -dependent approaches // *Journal of Hazardous Materials*. 353, pp. 534–541.
109. Sowers, K. and May, H., 2013. In situ treatment of PCBs by anaerobic microbial dechlorination in aquatic sediment: are we there yet? // *Current opinion in biotechnology*. 24(3), pp. 482–488
110. Šrédlová, K. and Cajthaml, T., 2022. Recent advances in PCB removal from historically contaminated environmental matrices // *Chemosphere*. 287. Article 132096.
111. Steliga, T., Wojtowicz, K., Kapusta, P. and Brzeszcz, J., 2020. Assessment of biodegradation efficiency of polychlorinated biphenyls (PCBs) and petroleum hydrocarbons (TPH) in soil using three individual bacterial strains and their mixed culture. // *Molecules*. 25. Article 709.
112. Suenaga, H., Yamazoe, A., Hosoyama, A., Kimura, N., Hirose, J., Watanabe, T., Fujihara, H., Futagami, T., Goto, M. and Furukawa, K., 2015. Draft genome sequence of the polychlorinated biphenyl-degrading bacterium *Cupriavidus basilensis* KF708 (NBRC 110671) isolated from biphenyl-contaminated soil // *Genome Announce*. 3(2). <https://doi.org/10.1128/genomeA.00143-15>
113. Suenaga, H., Fujihara, H., Kimura, N., Hirose, J., Watanabe, T., Futagami, T., Goto, M., Shimodaira, J. and Furukawa, K., 2017. Insights into the genomic plasticity of *Pseudomonas putida* KF715, a strain with unique biphenyl-utilizing activity and genome instability properties // *Environmental microbiology reports*. 9(5), pp. 589–598.
114. Tu, C., Ma, L., Guo, P., Song, F., Teng, Y., Zhang, H. and Luo, Y., 2017. Rhizoremediation of a dioxin-like PCB polluted soil by alfalfa: dynamic characterization at temporal and spatial scale // *Chemosphere*. 189, pp. 517–524.
115. Valizadeh, S., Lee, S., Baek, K., Choi, Y., Jeon, B., Rhee, G., Andrew, Lin, K. and Park, Y., 2021. Bioremediation strategies with biochar for polychlorinated biphenyls (PCBs)-contaminated soils: A review // *Environmental Research*. 200. Article 111757.
116. Vilo, C., Benedik, M., Ilori, M. and Dong, Q., 2014. Draft genome sequence of *Cupriavidus* sp. strain SK-4, a di-ortho-substituted biphenyl-utilizing bacterium isolated from polychlorinated biphenyl-contaminated sludge // *Genome Announce*. 2(3). <https://doi.org/10.1128/genomeA.00474-14>
117. Warenik-Bany, M., Maszewski, S., Mikołajczyk, S. and Piskorska-Pliszczynska, J., 2019. Impact of environmental pollution on PCDD/F and PCB bioaccumulation in game animals // *Environmental Pollution*. 255. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113159>
118. Warren, R., Hsiao, W., Kudo, H., Myhre, M., Dosanjh, M., Petrescu, A., Kobayashi, H., Shimizu, S., Miyauchi, K., Masai, E., Yang, G., Stott, J., Schein, J., Shin, H., Khattra, J., Smailus, D., Butterfield, Y., Siddiqui, A., Holt, R., Marra, M., Jones, S., Mohn, W., Brinkman, F., Fukuda, M., Davies, J. and Eltis, L., 2004. Functional characterization of a catabolic plasmid from polychlorinated-biphenyl-degrading *Rhodococcus* sp. strain RHA1 // *Journal of bacteriology*. 186(22), pp. 7783–7795.
119. Watanabe, T., Yamazoe, A., Hosoyama, A., Fujihara, H., Suenaga, H., Hirose, J., Futagami, T., Goto, M., Kimura, N. and Furukawa, K., 2015. Draft genome sequence of *Cupriavidus pauculus* strain KF709, a biphenyl-utilizing bacterium isolated from biphenyl-contaminated soil // *Genome Announce*. 3(2). <https://doi.org/10.1128/genomeA.00222-15>
120. Watanabe, T., Yamazoe, A., Hosoyama, A., Fujihara, H., Suenaga, H., Hirose, J., Futagami, T., Goto, M., Kimura, N. and Furukawa, K., 2015. Draft genome sequence of *Pseudomonas toyotomiensis* KF710, a polychlorinated biphenyl-degrading bacterium isolated from biphenyl-contaminated soil // *Genome Announce*. 3(2). <https://doi.org/10.1128/genomeA.00223-15>
121. Wiegel, J. and Wu, Q., 2000. Microbial reductive dehalogenation of polychlorinated biphenyls // *FEMS Microbiol. Lett.* 32(1), pp. 1–15.
122. Xu, L., Xu, J., Jia, L., Liu, W. and Jian, X., 2011. Congener selectivity during polychlorinated biphenyls degradation by *Enterobacter* sp. LY402 // *Current microbiology*. 62(3), pp. 784–789.
123. Xu, Y., Yu, M. and Shen, A., 2016. Complete genome sequence of the polychlorinated biphenyl degrader *Rhodococcus* sp. WB1 // *Genome Announce*. 4(5). <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.12.004 e00996-16>
124. Yang, X., Liu, X., Song, L., Xie, F., Zhang, G. and Qian, S., 2007. Characterization and functional analysis of a novel gene cluster involved in biphenyl degradation in *Rhodococcus* sp. strain R04 // *J. Appl. Microbiol.* 103(6), pp. 2214–2224.
125. Yu, H., Wan, H., Feng, Ch., Yi, X., Liu, X., Ren, Y. and Wei, C., 2017. Microbial polychlorinated biphenyl dechlorination in sediments by electrical stimulation: The effect of adding acetate and nonionic surfactant // *Science of the Total Environment*. 580, pp. 1371–1380.
126. Zhang, P., Ge, L., Gao, H., Yao, T., Fang, X., Zhou, C. and Na, G., 2014. Distribution and transfer pattern of polychlorinated biphenyls (PCBs) among the selected environmental media of Ny-Alesund, the Arctic: as a case study // *Marine pollution bulletin*. 89(1-2), pp. 267–275.

127. Zhang, Y., Deng, C., Shen, B., Yang, J., Wang, E. and Yuan, H., 2016. Syntrophic interactions within a butane-oxidizing bacterial consortium isolated from Puguang Gas Field in China. // *Microb. Ecol.* 72, pp. 538–548. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0799-4>

128. Zhao, Q., Bai, J., Lu, Q., Gao, Z., Jia, J., Cui, B. and Liu, X., 2016. Polychlorinated biphenyls (PCBs) in sediments/soils of different wetlands along 100-year

coastal reclamation chronosequence in the Pearl River Estuary, China // *Environmental pollution*. 213, pp. 860–869.

129. Zhu, L., Zhou, J., Zhang, R., Tang, X., Wang, J., Li, Y., Zhang, Q. and Wang, W., 2020. Degradation mechanism of biphenyl and 4,4'-dichlorobiphenyl cis-dihydroxylation by non-heme 2,3 dioxygenases BphA: A QM/MM approach / L. Zhu [et al.] // *Chemosphere*. 247. Article 125844.

Статья поступила в редакцию 14.10.2023; одобрена после рецензирования 24.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.

The article was submitted 14.10.2023; approved after reviewing 24.10.2023; accepted for publication 02.11.2023.