

МИКРОБИОЛОГИЯ

УДК 579.222

DOI: 10.17072/1994-9952-2020-4-294-302.

Д. О. Егорова^a, М. Г. Первова^b, В. А. Демаков^a

^a «Институт экологии и генетики микроорганизмов УрО РАН» - филиал ПФИЦ УрО РАН, Пермь, Россия

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

ВЛИЯНИЕ СУБСТРАТА СЕЛЕКЦИИ НА ПОЛИХЛОРОБИФЕНИЛ-ДЕГРАДАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ АЭРОБНЫХ ПОЧВЕННЫХ БАКТЕРИАЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ

В результате накопительного культивирования с использованием в качестве селективного фактора *ortho*-фталата, нафталина или бифенила, получены шесть аэробных бактериальных ассоциаций. Установлено, что все ассоциации, достигнув стабильного состава, активно растут на селективном субстрате. Однако ассоциации, выделенные с применением в качестве селективного фактора *ortho*-фталата, не обладают способностью использовать бифенил в качестве источника углерода. Ассоциации R24, R63, R26 и R62 эффективно растут в минеральной среде с бифенилом, а также осуществляют разложение коммерческих смесей ПХБ по классическому пути окисления бифенила. Уровень деструкции Трихлорбифенила данными ассоциациями составил 99.7 – 99.8%, а Совола – 99.6 – 99.8% за 8 сут. При этом не выявлено существенной разницы в показателях биодеструкции между ассоциациями R24 и R63, селективными на бифениле, и ассоциациями R26 и R62, изолированными на нафталине.

Ключевые слова: полихлорированные бифенилы; бактериальные ассоциации; селекция; деструкция.

D. O. Egorova^a, M. G. Pervova^b, V. A. Demakov^a

^a Institute of Ecology and Genetics of Microorganisms of the Ural Branch RAS, Perm, Russian Federation

^b Postovsky Institute of Organic Synthesis of the Ural Branch RAS, Ekaterinburg, Russian Federation

INFLUENCE OF SELECTIVE SUBSTRATE ON POLYCHLOROBIPHENYL-DEGRADATIVE ACTIVITY OF AEROBIC SOIL BACTERIAL ASSOCIATIONS

As a result of enrichment cultivation using *ortho*-phthalate, naphthalene or biphenyl as a selective factor, six aerobic bacterial associations were obtained. It was found that all associations, having reached a stable composition, actively grow on a selective substrate. However, associations, isolated using *ortho*-phthalate as a selective factor, do not have the ability to use biphenyl as a carbon source. Associations R24, R63, R26 and R62 grow effectively in a mineral medium with biphenyl, and also decompose commercial PCB mixtures by the classical pathway of biphenyl oxidation. The level of destruction of Trichlorobiphenyl by these associations was 99.7 - 99.8%, and for Sovol - 99.6 - 99.8% in 8 days. At the same time, there was no significant difference in biodegradation indices between the R24 and R63 associations selected on biphenyl and the R26 and R62 associations isolated on naphthalene.

Key words: polychlorinated biphenyls; bacterial associations; selection; destruction.

Введение

Полихлорированные бифенилы (ПХБ) входят в первоначальный список стойких органических загрязнителей (СОЗ) и подлежат полному выводу из производства и применения, а также должны быть уничтожены [Final act ..., 2001]. Помимо существенных объемов, находящихся на захоронении, значительные количества ПХБ оказались в почвах, донных отложениях и других объектах окружающей среды [Devi, 2020].

По химической структуре ПХБ представляют собой два ароматических кольца, соединенных С-С-связью с заместителями – атомами хлора. Количество заместителей в молекуле может быть от 1 до 10. В промышленности выпускались смеси ПХБ, включающие в себя 40–70 конгенеров ПХБ с разным количеством хлора в молекулах. Наиболее распространенные торговые марки ПХБ – Арок-лор, Делор, Клофен, Совол, Трихлорбифенил (ТХБ) [Murinova, Dercova, 2014; Reddy, Moniruz-zaman, Aminabhavi, 2019; Devi, 2020].

Вследствие эволюционной пластичности, ряд почвенных бактерий не только адаптировались к присутствию ПХБ, но и оказались способны осуществлять биотрансформацию данных поллютантов [Su et al., 2015; Hoostal, Bouzat, 2016]. Разложение ПХБ осуществляется как анаэробными, так и аэробными бактериями [Parales, Resnik, 2006; Kolar et al., 2007; Pori, Robinson, Adebuseye, 2008; Liz et al., 2009; Chang et al., 2013; Jia et al., 2019; Pathirajia et al., 2019]. Анаэробному восстановлению подвергаются высокохлорированные конгенеры ПХБ, в результате чего образуются средне- и низкохлорированные конгенеры [Matturro et al., 2016; Pathirajia et al., 2019]. Аэробные бактерии осуществляют окислительное расщепление молекулы ПХБ, что приводит к образованию хлорбензойных кислот с последующей их утилизацией [Parales, Resnik, 2006; Kolar et al., 2007; Pori, Robinson, Adebuseye, 2008; Liz et al., 2009; Chang et al., 2013; Jia et al., 2019]. Биодеструкцию ПХБ осуществляют как индивидуальные штаммы бактерий, так и ассоциации [Kolar et al., 2007; Liz et al., 2009; Chang et al., 2013; Cervantes-González et al., 2019].

В большинстве случаев, химическое загрязнение почв носит смешанный характер. Наряду с ПХБ, в почве присутствуют и другие органические/хлорорганические загрязнители [Revich, Shelepchikov, 2008]. Типичным примером являются почвы г. Чапаевска Самарской обл., Россия. В них обнаруживаются в высоких концентрациях такие загрязнители группы СОЗ, как ПХБ, линдан, ДДТ [Revich et al., 2001; Назаров и др., 2016]. Вследствие чего в почвах таких районов формируются микробоценозы, обладающие широким диапазоном биodeградативной активности [Shah et al., 2013; Wu et al., 2013; Su et al., 2015; Hoostal, Bouzat, 2016].

Цель настоящего исследования – выделение из почв, загрязненных несколькими соединениями группы СОЗ, микробные ассоциации, обладающие полихлорбифенил-деградативным потенциалом, при использовании в качестве селективного субстрата различные ароматические соединения.

Материалы и методы исследования

Почвенные образцы

Образцы почв RS1 и RS2 были отобраны на территории ОАО «Средне-Волжский завод химикатов» (г. Чапаевск Самарской обл.) в летний период 2018 г. Отбор почв производили согласно ГОСТ 17.4.4.02-84. Далее транспортировались с соблюдением температурного режима в г. Пермь для дальнейшего исследования в стационарных условиях. Ранее было установлено, что почвы данного района загрязнены такими соединениями

группы СОЗ как линдан, гексахлорбензол, ДДТ и ПХБ [Назаров и др., 2016].

Среда культивирования, реактивы

Минеральная среда К1, состава (г/л): $K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$ – 3.2, $NaH_2PO_4 \cdot 2H_2O$ – 0.4, $(NH_4)_2SO_4$ – 0.5, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ – 0.15, $Ca(NO_3)_2$ – 0.01. Для получения плотных питательных сред вносили агар-агар до конечной концентрации 1.5%.

В работе использовали аналитически чистые химические реактивы, бифенил (>98%), нафталин (>98%), *орто*-фталат (>98%) фирмы Sigma-Aldrich (Steinheim, Germany), ТХБ (ОСТ 6-01-24-85), Совол (ОСТ 6-01-24-75) – коммерческие смеси полихлорированных бифенилов, Россия.

Накопительное культивирование

10 г почвенного образца помещали в колбу Эрленмейера объемом 250 мл, содержащую 100 мл среды К1 и 1 г/л соответствующего селективного субстрата (*орто*-фталат, нафталин, бифенил). Колбы выдерживали в термостате (ТС-1/80 СПУ, Россия) при +28°C 30 дней.

Стабильные бактериальные ассоциации

10 мл бактериальной культуры, полученной при накопительном культивировании с селективным субстратом, помещали в колбу Эрленмейера объемом 250 мл, содержащую 90 мл среды К1 и 100 мг соответствующего субстрата (*орто*-фталат, нафталин, бифенил). Культивирование проводили на термостатируемой круговой качалке (Environmental Shaker-Incubator ES 20/60, “BioSan”, Латвия) при 120 об/мин и +28°C в течение 14 дней. Последующие пересевы (на среду К1 и соответствующий субстрат в концентрации 1 г/л) производили через каждые 7 дней. Бактериальное сообщество считали стабильным, если при 10 последовательных пересевах морфологические и физиологические характеристики сообщества не изменялись.

Периодическое культивирование, анализ ростовых параметров

10 мл стабильной бактериальной культуры помещали в колбу Эрленмейера объемом 250 мл, содержащую 90 мл среды К1 и 100 мг соответствующего субстрата выделения (*орто*-фталат, нафталин, бифенил) или субстрата деструкции (бифенил). Культивирование проводили на термостатируемой круговой качалке (Environmental Shaker-Incubator ES 20/60, “BioSan”, Латвия) при 120 об/мин и +28°C в течение 4–14 дней. Каждые 24 ч. производили измерение оптической плотности культуры на спектрофотометре BioSpec-mini, «Shimadzu», Япония, при длине волны 600 нм.

Удельную скорость роста рассчитывали по классической методике согласно формуле

$$\mu = (\ln C_x - \ln C_0) / (t_x - t_0),$$

где C_x – концентрация культуры в высшей точке роста, C_0 – концентрация культуры в начальный момент роста, t_0 и t_x – время в начале и конце логарифмической фазы роста культуры.

Деструкция смесей ПХБ

При исследовании деструкции смесей полихлорбифенилов (ТХБ, Совол) 1 мл отмытых дважды в среде К1 клеток ($OD_{600} = 1.5-2.0$), выращенных на бифениле (1 г/л) до середины логарифмической фазы, переносили во флаконы объемом 5 мл с тefлоновыми крышками, добавляя субстраты до конечной концентрации ТХБ – 13.8 мг/л, Совол – 55 мг/л и инкубировали на шейкере (Environmental Shaker-Incubator ES 20/60, “BioSan”, Латвия) 200 об/мин при 28°C. Для анализа пробы отбирали в начальный момент времени, а также на 4- и 8-е сут.

Аналитические процедуры

Количественный анализ ПХБ проводили в условиях ГХ-ПИД: газовый хроматограф “Shimadzu GC 2010” с пламенно-ионизационным детектором и кварцевой капиллярной колонкой ZB-5 (длина 30 м, диаметр 0.25 мм), толщина пленки неподвижной фазы составляла 0.25 мкм (Shimadzu, Япония). Начальная температура колонки – 40°C (3 мин.) с последующим её повышением 10°/мин до конечной температуры 280°C (изотерма 15 мин.). Температура испарителя – +250°C, детектора – +300°C.

Расчет содержания ПХБ в каждом исследуемом образце проводили методом внутренней нормализации, рассчитывая вклад отдельных соединений в суммарную площадь пиков. На основании полученных расчетных площадей пиков оценивали содержание исходных ПХБ после процесса биодеструкции.

Продукты деградации хлорбифенилов определяли спектрофотометрически и методом ВЭЖХ. Для анализа культуральную жидкость очищали от бактериальных клеток центрифугированием (9660 g в течение 3 мин. на центрифуге miniSpin («Eppendorf», Германия)). Образование продуктов *мета*-расщепления ароматического кольца хлорбифенилов – 2-гидроксо-6-оксо-(хлорфенил)гекса-2,4-диеновые кислоты (ГОФДК) анализировали в надосадочной жидкости на спектрофотометре UV-Visible BioSpec-mini («Shimadzu», Япония) при $\lambda_{\text{макс}}$ от 390 нм до 440 нм.

Наличие ионов хлора в супернатанте определяли на спектрофотометре UV-Visible BioSpec-mini («Shimadzu», Япония) при $\lambda_{\text{макс}}$ от 460 нм до 540 нм через 5 мин. после внесения в супернатант

5%-ного азотнокислого серебра. Количественную оценку проводили согласно калибровочной кривой. Наличие в супернатанте хлорбензойных (ХБК) кислот определяли на хроматографе LC-20A («Shimadzu», Япония) с колонкой Discovery C18 (150 × 4.6 мм или 250 × 4.6 мм) («Supelco», «Sigma-Aldrich», США) и УФ-детектором при 205 нм. Анализ проводили в системе ацетонитрил-0.1%-ный H_3PO_4 (70:30). Идентификация осуществлялась с помощью сравнения времени удержания на колонке исследуемых и стандартных соединений. Количество образовавшихся продуктов оценивали по величине площади и высоты пиков на хроматограмме относительно данных величин стандартных соединений.

Скорость деструкции ПХБ

Скорость деструкции субстрата рассчитывали по формуле

$$V = (C_0 - C_i) / ((t_i - t_0) \cdot C_{\text{cell}}),$$

где C_0 – концентрация смеси ПХБ в начальный момент времени, мг/л, C_i – концентрация смеси ПХБ в конечный момент времени, мг/л, t_i – конечный момент времени, сут., t_0 – начальный момент времени, сут., C_{cell} – концентрация клеток бактериальной ассоциации, г.

Концентрацию клеток рассчитывали исходя из того, что 0.432 мг сухих клеток соответствует 1 мл бактериальной суспензии с $OP_{600} = 1.0$ о.е.

Статистический анализ

Все эксперименты проводили в трехкратной повторности. Полученные данные обрабатывали с использованием стандартных пакетов компьютерных программ Microsoft Excel и Statistica 6.0.

Результаты и их обсуждение

В результате селекции на ароматическом субстрате (*орто*-фталат, нафталин, бифенил) были получены 6 бактериальных ассоциаций (табл. 1).

Таблица 1

Бактериальные ассоциации, селектированные из загрязненных почв

Почвенный образец	Субстрат селекции		
	<i>орто</i> -фталат	бифенил	нафталин
RS1	R21	R24	R26
RS2	R65	R63	R62

При периодическом культивировании на субстрате выделения данные ассоциации характеризовались стабильной удельной скоростью роста и достигали за 4 сут. сходных значений плотности культуры при многократных пересевах (табл. 2).

Наибольшей удельной скоростью роста характеризовались ассоциации R24 и R63, изолированные с

применением бифенила в качестве селективного фактора. Вероятно, ферментативные системы бактерий, входящих в микробоценоз почв территории ОАО «СВЗХ» г. Чапаевска, более адаптированы к окислению соединений группы ПХБ, чем соединений груп-

пы полиароматических углеводородов (ПАУ). Подобное явление может быть обусловлено длительным загрязнением данных почв полихлорированными бифенилами.

Таблица 2

Ростовые показатели бактериальных ассоциаций

Бактериальная ассоциация	Субстрат селекции		Субстрат деструкции	
	ОП ₆₀₀ , о.е.	μ, сут ⁻¹	ОП ₆₀₀ , о.е.	μ, сут ⁻¹
R21	0.407±0.002	0.136	0.001±0.0002	–
R65	0.428±0.001	0.142	0.001±0.0004	–
R24	0.854±0.002	0.284	1.018±0.002	0.339
R63	0.704±0.003	0.234	0.727±0.001	0.242
R26	0.562±0.002	0.187	0.546±0.002	0.182
R62	0.664±0.002	0.221	0.488±0.005	0.162

Анализ биодegradативного потенциала выделенных бактериальных ассоциаций в отношении бифенила показал, что при периодическом культивировании ассоциации R21 и R65, селектированные на *ortho*-фталате, не способны использовать бифенил в качестве источника углерода и энергии (табл. 2). Ассоциации R26 и R62, изолированные на нафталине, демонстрируют близкие ростовые параметры как в случае применения в качестве ростового субстрата нафталина, так и бифенила. Ассоциации R24 и R63 обладают наибольшей скоростью роста и достигают более высокой плотности культуры (табл. 2). Следует отметить, что все изолированные в настоящем исследовании бактериальные ассоциации, проявившие способность расти на бифениле как источнике углерода, обладают более высокой удельной скоростью роста по сравнению с ассоциацией, выделенной из почв штата Верacruz (Мексика), загрязненных трансформаторным маслом, но уступают по данному параметру штаммам, изолированным из донных отложений, загрязненных коммерческими смесями ПХБ (Словакия) [Liz et al., 2009; Horváthová, Lászlóvá, Derkova, 2018]. Ассоциации R24 и R63 при культивировании на бифениле обладают плотностью культуры, сопоставимой с аналогичным показателем штамма *Pseudomonas aeruginosa* TMU56 [Hatamian-Zarmi et al., 2009]. Ассоциации R26 и R62 характеризуются более низкой плотностью культуры как при культивировании на нафталине, так и при культивировании на бифениле, чем штамм *P. aeruginosa* TMU56. Стоит отметить, что штамм *P. aeruginosa* TMU56 более активно растет при использовании бифенила в качестве ростового субстрата, а не нафталина. У изолированных в настоящем исследовании бактериальных

ассоциаций подобной закономерности не выявлено.

Установлено, что ассоциации R26, R62, R24 и R63 осуществляют разложение коммерческих смесей ПХБ – ТХБ и Совол (рис. 1, 2, табл. 3). За 8 сут. инкубации деструкция ТХБ бактериальными ассоциациями составила 99.7–99.8%. Аналогичный показатель в случае трансформации Совола составил 99.6–99.8%. В ряде работ описаны бактериальные сообщества и индивидуальные штаммы, способные разлагать коммерческие смеси ПХБ. Так штаммы рода *Rhodococcus*, выделенные из смешанных культур ПХБ-загрязнённых донных отложений (Хорватия), осуществляют деструкцию Ароклора 1248 (близок по составу конгенеров к Соволу) на 5–61% [Kolar et al., 2007], а штаммы, изолированные в Норвегии, разлагают Ароклор 1242 (аналог ТХБ) на 50% [Papale et al., 2017]. Большая деградативная активность в отношении Ароклора 1242 описана для штамма *P. aeruginosa* TMU56 – 73.3% [Hatamian-Zarmi et al., 2009]. Бактериальные сообщества, состоящие из штаммов-деструкторов бифенила (Словакия), осуществляют разложение Делора 103 (аналог ТХБ) на 73–85%, тогда как деградативная активность в отношении Ароклора 1242 бактериальной ассоциации 1-2Mix (Южная Корея) составляет 63.0–71.1% [Kwon et al., 2008; Horváthová, Lászlóvá, Derkova, 2018]. Стоит отметить, что активность сообщества, описанного G. Pathiraja с коллегами [2019] в отношении Ароклора 1260, содержащего большее число высокохлорированных конгенеров, чем смеси ТХБ и Совол, составляет 49.2%. Таким образом, изолированные в настоящем исследовании бактериальные ассоциации эффективно разлагают коммерческие смеси ПХБ.

Таблица 3

Образование хлорбензойных кислот при разложении смесей ПХБ бактериальными ассоциациями, мг

Бактериальная ассоциация	ТХБ		Совол	
	4 сут.	8 сут.	4 сут.	8 сут.
R24	0.064±0.001	0.109±0.001	0.018±0.002	0.028±0.004
R63	0.078±0.001	0.106±0.002	0.028±0.002	0.027±0.003
R26	0.039±0.002	0.146±0.001	0.046±0.002	0.058±0.002
R62	0.085±0.001	0.321±0.001	0.011±0.003	0.016±0.002

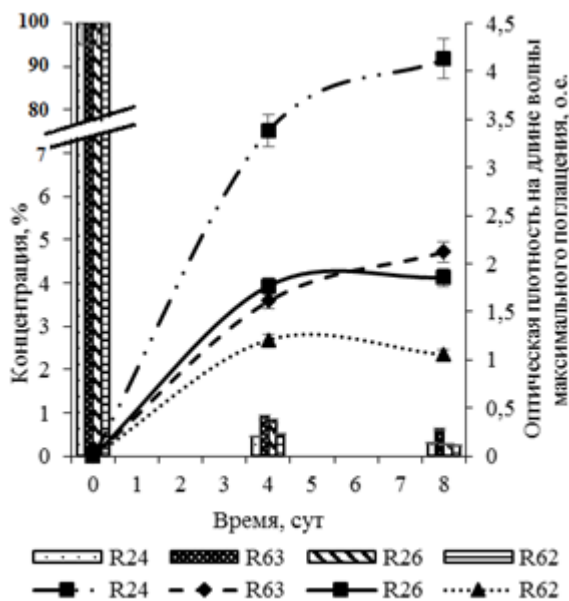


Рис. 1. Деструкция ТХБ и выделение метаболита (ГОФДК) бактериальными ассоциациями

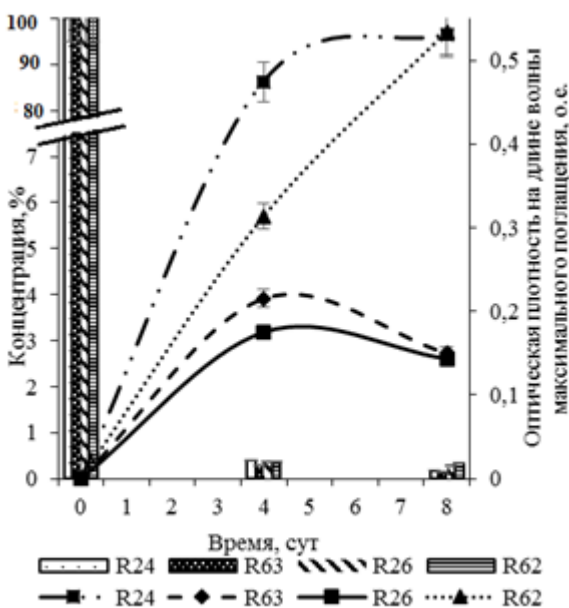


Рис. 2. Деструкция Совола и выделение метаболита (ГОФДК) бактериальными ассоциациями

Анализ образующихся метаболитов показал, что биодеструкция конгенов ПХБ происходит по классическому окислительному пути. При этом в среде фиксируется образование таких промежуточных продуктов, как гидрокси-оксо-фенилгексадиеновые кислоты (ГОФДК) и хлорбензойные кислоты (рис. 1, 2, табл. 3). Динамика накопления ГОФДК в среде при деструкции ТХБ имеет схожий характер у всех исследуемых ассоциаций (рис. 1). Напротив, при разложении Совола, динамика накопления ГОФДК ассоциацией R62 приближает-

ся к линейной, чем существенно отличается от аналогичного показателя остальных ассоциаций (рис. 2). Совол является более токсичным для бактериальных клеток, чем ТХБ, так как содержит большее количество пента- и гексахлорированных конгенов. Вероятно, в данном случае проявляется токсическое действие образующихся полихлорированных ГОФДК на клетки штаммов ассоциации R62 и замедляет процесс дальнейшего окисления ГОФДК до хлорбензойных кислот. Данная гипотеза подтверждается и более низкой концентрацией ХБК в среде у ассоциации R62 при разложении Совола, чем при разложении ТХБ, а также по сравнению с концентрацией ХБК в культуральной среде остальных исследуемых бактериальных ассоциаций (табл. 3).

Стоит отметить, что при анализе концентраций, отражающих содержание в среде как исходного субстрата, так и образующихся метаболитов, не выявлено различий в деградативной активности между ассоциациями, изолированными на нафталине, и ассоциациями, изолированными на бифениле.

Для дальнейшего анализа был произведен расчет скорости деструкции смесей ПХБ бактериальными ассоциациями, с учетом веса биомассы (табл. 4).

Таблица 4
Скорость деструкции смесей ПХБ бактериальными ассоциациями, мг ПХБ сут⁻¹ г сух биомассы⁻¹

Бактериальная ассоциация	ТХБ	Совол
R24	42.82	15.21
R63	59.89	13.32
R26	35.40	15.61
R62	35.55	15.23

Установлено, что скорость деструкции ТХБ ассоциациями, селективными на бифениле, превышает аналогичный показатель ассоциаций, изолированных на нафталине в 1.2–1.7 раза. Напротив, скорость деструкции Совола у всех ассоциаций была сопоставима друг с другом. Вероятно, в данном случае, существенную роль оказывает состав смеси ПХБ, а не первоначальный субстрат селекции, оказывавший давление на формирование бактериальной ассоциации.

Заключение

В результате проведенных исследований получены шесть бактериальных ассоциаций с разным биодegradативным потенциалом. Установлено, что в случае, если селективным субстратом выделения ассоциации является моноароматическое соедине-

ние, то сформировавшиеся бактериальные сообщества не проявляют активности к ПХБ. Напротив, при использовании в качестве селективного субстрата бифенила и нафталина, сформировались сообщества аэробных бактерий с близкими биодеградативными характеристиками в отношении коммерческих смесей ПХБ. Описанные ассоциации могут служить основой для биоремедиационных технологий, направленных на очистку окружающей среды от полихлорированных бифенилов.

Работа выполнена в рамках НИОКР АААА-А19-119112290009-1 «Молекулярные механизмы адаптации микроорганизмов к факторам среды». Анализ методом газовой хроматографии выполнен с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений» (ЦКП «САОС»).

Библиографический список

- ГОСТ 17.4.3.01-82. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М.: Госстандарт, 1983. 8 с.
- Назаров А.В. и др. Эколого-микробиологическая оценка грунтов, загрязненных полихлорированными бифенилами // Экология человека. 2016. № 3. С. 3–8.
- Cervantes-González E. et al. Microbial diversity assessment of polychlorinated biphenyl-contaminated soils and the biostimulation and bioaugmentation processes // Environmental Monitoring and Assessment 2019. Vol. 191. P. 118. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7227-4>.
- Chang Y.-C. et al. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway // Applied Biochemistry and Biotechnology. 2013. Vol. 170. P. 381–398 <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>.
- Devi N.L. Persistent Organic Pollutants (POPs): Environmental Risks, Toxicological Effects, and Bioremediation for Environmental Safety and Challenges for Future Research // Bioremediation of Industrial Waste for Environmental Safety / eds. G. Saxena, R. Bharagava. Singapore: Springer, 2020. P. 53–76. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4.
- Final act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm convention on persistent organic pollutants, Stockholm, 22-23 May // UNEP/POPs/CONF/4. United Nations Environment Programme. Geneva. 2001. 44 p.
- Hatamian-Zarmi A. et al. Extensive biodegradation of highly chlorinated biphenyl and Aroclor 1242 by *Pseudomonas aeruginosa* TMU56 isolated from contaminated soils // International Biodeterioration and Biodegradation. 2009. Vol. 63. P. 788–794. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.06.009>.
- Hoostal M.J., Bouzat J.L. Spatial patterns of *bphA* gene diversity reveal local adaptation of microbial communities to PCB and PAH contaminants // Microbiol. Ecology. 2016. Vol. 72. P. 559–570. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0812-y>.
- Horváthová H., Lászlóvá K., Derkova 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>.
- Ilori M.O., Robinson G.K., Adebuseye S.A. Aerobic mineralization of 4,4'-dichlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by a novel natural bacterial strain that grows poorly on benzoate and biphenyl // World Journal of Microbiology Biotechnology. 2008. Vol. 24. P. 1259–1265. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>.
- Jia Y. et al. Identification and characterization of a meta-cleavage product hydrolase involved in biphenyl degradation from *Arthrobacter* sp. YC-RL1 // Applied Microbiol. Biotechnology. 2019. Vol. 103, № 16. P. 6825–6836. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09956-z>
- Kolar A.B. et al. PCB-degrading potential of aerobic bacteria enriched from marine sediments // International Biodeterioration and Biodegradation. 2007. Vol. 60. P. 16–24. <https://doi.org/10.16/j.ibiod.2006.11.004>.
- Kwon S.-H. et al. Bioremediation of Aroclor 1242 by a consortium culture in marine sediment microcosm // Biotechnology and Bioprocess Engineering. 2008. Vol. 13. P. 730–737. <https://doi.org/10.1007/s12257-008-0111-7>.
- Liz J.A.Z.E. et al. Degradation of polychlorinated biphenyl (PCB) by a consortium obtained from a contaminated soil composed of *Brevibacterium*, *Pandora* and *Ochrobactrum* // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2009. Vol. 25. P. 165–170. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9875-3>.
- Matturro B. et al. Polychlorinated biphenyl (PCB) anaerobic degradation in marine sediments: microcosm study and role of autochthonous microbial communities // Environmental Science Pollution Research. 2016. Vol. 23. P. 12613–12623. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4960-2>.
- 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. P. 1980. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1980-3>
- Papale M. et al. Enrichment, isolation and biodegradation potential of psychrotolerant polychlorinated-biphenyl degrading bacterial from the Kongsfjorden (Svalbard Islands, High Arctic Norway) // Marine

- Pollution Bulletin. 2017. Vol. 114. P. 849–859.
- Parales R.E., Resnick S.M. Aromatic Ring Hydroxylating Dioxygenases // *Pseudomonas* / eds. J.L. Ramos, R.C. Levesque. Boston: Springer, 2006. P. 287–340. https://doi.org/10.1007/0-387-28881-3_9.
- Pathiraja G. et al. Effective degradation of polychlorinated biphenyls by a facultative anaerobic bacterial consortium using alternating anaerobic aerobic treatments // *Science of Total Environment*. 2019. Vol. 659. P. 507–514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.385>.
- 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. 11860–11207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>.
- Revich B., Shelepchikov A. Persistent organic pollutants (POPs) hot spots in Russia // *The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment* / eds. E. Mehmetli, B. Koumanova. Springer, 2008. P. 113–126.
- Revich B. et al. Dioxin exposure and public health in Chapaevsk, Russia // *Chemosphere*. 2001. Vol. 43. P. 951–966.
- Shah V. et al. Taxonomic profiling and metagenome analysis of a microbial community from a habitat contaminated with industrial discharges // *Microbiol. Ecology*. 2013. Vol. 66. P. 533–550. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0253-9>.
- Su X. et al. Enhanced degradation of biphenyl from PCB-contaminated sediments: the impact of extracellular organic matter from *Micrococcus luteus* // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2015. Vol. 99. P. 1989–2000. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6108-6>.
- Wu M. et al. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media // *Environmental Pollution*. 2013. Vol. 178. P.152–158. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.004>.
- References**
- GOST 17.4.3.01-82. *Ochrana prirody. Počvy. Obščie trebovanija k otboru prob* [Nature protection. Soils. General requirements for sampling]. Moscow, Gosstandart Publ., 1983. 8 p. (In Russ.).
- Nazarov A.V., Egorova D.O., Makarenko A.A., Demakov V.A., Plotnikova E.G. [Ecological-Microbiological Assessment of Polychlorinated Biphenyl-Contaminated Grounds]. *Ėkologija čeloveka*. N 3 (2016): pp. 3-8. (In Russ.).
- Cervantes-González E. et al. Microbial diversity assessment of polychlorinated biphenyl-contaminated soils and the biostimulation and bioaugmentation processes. *Environmental Monitoring and Assessment*. V. 191 (2019): p. 118. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7227-4>
- Chang Y.-C. et al. Isolation of biphenyl and polychlorinated biphenyl-degrading bacteria and their degradation pathway. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. V. 170 (2013): pp. 381-398 <https://doi.org/10.1007/s12010-013-0191-5>
- 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*. Springer, Singapore, 2020, pp. 53-76. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1891-7_4
- Final act of the Conference of Plenipotentiaries on the Stockholm convention on persistent organic pollutants, Stockholm, 22-23 May. UNEP/POPS/CONF/4. United Nations Environment Programme. Geneva. 2001. 44 p.
- Hatamian-Zarmi A. et al. Extensive biodegradation of highly chlorinated biphenyl and Aroclor 1242 by *Pseudomonas aeruginosa* TMU56 isolated from contaminated soils. *International Biodeterioration and Biodegradation*. V. 63 (2009): pp. 788-794. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.06.009>
- Hoostal M.J., Bouzat J.L. Spatial patterns of *bphA* gene diversity reveal local adaptation of microbial communities to PCB and PAH contaminants. *Microbiol. Ecology*. V. 72 (2016): pp. 559-570. <https://doi.org/10.1007/s00248-016-0812-y>
- Horváthová H., Lászlóvá K., Derkova K. Bioremediation of PCB-contaminated shallow river sediments: the efficacy of biodegradation using individual bacterial strains and their consortia. *Chemosphere*. V. 193 (2018): pp. 270-277. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.11.012>
- Ilori M.O., Robinson G.K., Adebuseye S.A. Aerobic mineralization of 4,4'-dichlorobiphenyl and 4-chlorobenzoic acid by a novel natural bacterial strain that grows poorly on benzoate and biphenyl. *World Journal of Microbiology Biotechnology*. V. 24 (2008): pp. 1259-1265. <https://doi.org/10.1007/s11274-007-9597-y>
- Jia Y. et al. Identification and characterization of a meta-cleavage product hydrolase involved in biphenyl degradation from *Arthrobacter* sp. YC-RL1. *Applied Microbiol. Biotechnology*. V. 103, N 16 (2019): pp. 6825-6836. <https://doi.org/10.1007/s00253-019-09956-z>
- Kolar A.B. et al. PCB-degrading potential of aerobic bacteria enriched from marine sediments. *International Biodeterioration and Biodegradation*. V. 60 (2007): pp. 16-24. <https://doi.org/10.16/j.ibiod.2006.11.004>
- Kwon S.-H. et al. Bioremediation of Aroclor 1242 by a consortium culture in marine sediment micro-

- cosm. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*. V. 13 (2008): pp. 730-737. <https://doi.org/10.1007/s12257-008-0111-7>
- Liz J.A.Z.E. et al. Degradation of polychlorinated biphenyl (PCB) by a consortium obtained from a contaminated soil composed of *Brevibacterium*, *Pandora* and *Ochrobactrum*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. V. 25 (2009): pp. 165-170. <https://doi.org/10.1007/s11274-008-9875-3>
- Matturro B. et al. Polychlorinated biphenyl (PCB) anaerobic degradation in marine sediments: microcosm study and role of autochthonous microbial communities. *Environmental Science Pollution Research*. V. 23 (2016): pp. 12613-12623. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4960-2>
- Murínová S., Dercová K. Potential Use of newly isolated bacterial strain *Ochrobactrum anthropi* in bioremediation of polychlorinated biphenyls. *Water Air Soil Pollution*. V. 225 (2014): p. 1980. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-1980-3>
- Papale M. et al. Enrichment, isolation and biodegradation potential of psychrotolerant polychlorinated-biphenyl degrading bacterial from the Kongsfjorden (Svalbard Islands, High Arctic Norway). *Marine Pollution Bulletin*. V. 114 (2017): pp. 849-859.
- Parales R.E., Resnick S.M. Aromatic Ring Hydroxylating Dioxygenases. In: Ramos JL., Levesque R.C. (eds) *Pseudomonas*. Springer, Boston, MA, 2006, pp. 287-340. https://doi.org/10.1007/0-387-28881-3_9
- Pathiraja G. et al. Effective degradation of polychlorinated biphenyls by a facultative anaerobic bacterial consortium using alternating anaerobic aerobic treatments. *Science of Total Environment*. V. 659 (2019): pp. 507-514. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.385>
- 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*. V. 358 (2019): pp. 1186-1207. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.09.205>
- Revich B., Shelepchikov A. Persistent organic pollutants (POPs) hot spots in Russia. In: Mehmetli E., Koumanova B. (eds.) *The Fate of Persistent Organic Pollutants in the Environment*. Springer, 2008, pp. 113-126.
- Revich B. et al. Dioxin exposure and public health in Chapaevsk, Russia. *Chemosphere*. V. 43 (2001): pp. 951-966.
- Shah V. et al. Taxonomic profiling and metagenome analysis of a microbial community from a habitat contaminated with industrial discharges. *Microbiol. Ecology*. V. 66 (2013): pp. 533-550. <https://doi.org/10.1007/s00248-013-0253-9>
- Su X. et al. Enhanced degradation of biphenyl from PCB-contaminated sediments: the impact of extracellular organic matter from *Micrococcus luteus*. *Applied Microbiology and Biotechnology*. V. 99 (2015): pp. 1989-2000. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6108-6>
- Wu M. et al. Degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons by microbial consortia enriched from three soils using two different culture media. *Environmental Pollution*. V. 178 (2013): pp. 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.004>

Поступила в редакцию 05.10.2020

Об авторах

Егорова Дарья Олеговна, кандидат биологических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории молекулярной микробиологии и биотехнологии

«ИЭГМ УрО РАН»

ORCID: 0000-0001-8018-4687

614081, г. Пермь, ул. Голева, 13;

daryao@rambler.ru; +7(342)2808431

Первова Марина Геннадьевна, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории фторорганических соединений Института органического синтеза им. И.Я. Попова УрО РАН

ORCID: 0000-0002-0719-2645

620137, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 22/20; pervova@ios.uran.ru

About the authors

Egorova Darya Olegovna, candidate of biology, senior scientist researcher of the laboratory of molecular microbiology and biotechnology Institute of Ecology and Genetics of Microorganism UB RAS.

ORCID: 0000-0001-8018-4687

13, Golev str., Perm, Russia, 614081;

daryao@rambler.ru; +7(342)2808431

Pervova Marina Gennadievna, candidate of chemistry, senior researcher of the laboratory of organofluorine compounds Postovsky Institute of Organic Synthesis of the Ural Branch RAS.

ORCID: 0000-0002-0719-2645

620137, Russia, Yekaterinburg, Sofya Kovalevskaya str., 22/20; pervova@ios.uran.ru

Демаков Виталий Алексеевич, чл.-корр РАН,
доктор медицинских наук, зав. лабораторией
молекулярной микробиологии и биотехнологии
ИЭГМ УрО РАН

ORCID: 0000-0002-3392-7553
614081, Пермь, ул. Голева, 13;
demakov@iegm.ru; +7(342)2808431

Demakov Vitaly Alekseevich, Corresponding
Member of the Russian Academy of Sciences, Doc-
tor of Medical Sciences, Head of the Laboratory of
Molecular Microbiology and Biotechnology
Institute of Ecology and Genetics of Microorganism
UB RAS.

ORCID: 0000-0002-3392-7553
13, Golev str., Perm, Russia, 614081;
demakov@iegm.ru; +7(342)2808431

Информация для цитирования:

Егорова Д.О., Первова М.Г., Демаков В.А. Влияние субстрата селекции на полихлорбифенил-деградативную активность аэробных почвенных бактериальных ассоциаций // Вестник Пермского университета. Сер. Биология. 2020. Вып. 4. С. 294–302. DOI: 10.17072/1994-9952-2020-4-294-302.

Egorova D.O., Pervova M.G., Demakov V.A. [Influence of selective substrate on polychlorobiphenyl-degradative activity of aerobic soil bacterial associations]. *Vestnik Permskogo universiteta. Biologija*. Iss. 4 (2020): pp. 294-302. (In Russ.). DOI: 10.17072/1994-9952-2020-4-294-302.

