

УДК 577.337+579.258

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ ВНЕШНЕЙ ЦЕПИ БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ БЕЗМЕМБРАННОГО ТИПА НА ДЕСТРУКЦИЮ ИМИДАКЛОПРИДА И ПРЕДСТАВЛЕННОСТЬ ГЕНОВ *MtrB* И ПЕРОКСИДАЗ *DyP*-ТИПА

© 2024 г. А. А. Самков^{a, *}, С. М. Самкова^a, М. Н. Круглова^a

^aФГБОУ ВО “Кубанский государственный университет”, Краснодар, 350040, Россия

*e-mail: andreysamkov@mail.ru

Поступила в редакцию 16.10.2023 г.

После исправления 10.11.2023 г.

Принята к опубликованию 14.11.2023 г.

Деструкция имидаклоприда микрофлорой донных отложений была кратно выше контроля во всех вариантах, где имелся углеродный войлок, возрастая до $84.0 \pm 1.7\%$ при полярном подключении внешнего источника напряжения 1.2 В. При внесении *Shewanella oneidensis* MR-1 наблюдалась почти полная деградация поллютанта, в случае контроля без электродов равная $29.7 \pm 6.0\%$. Относительная представленность генов трансмембранного белка дыхательной цепи *MtrB*, связанного с экзоэлектрогенезом, зависела от внешней цепи и имела максимальное значение при полярном подключении источника напряжения, коррелируя с деградацией пестицида автохтонной микрофлорой, аналогично генам *DyP*. Внесение *S. oneidensis* MR-1 вызвало почти десятикратный рост относительной представленности *DyP*. При этом для всех опытных вариантов отмечены кратно более высокие, по сравнению с контролем без углеродного войлока, значения показателя *DyP*, как и в случае прироста деструкции имидаклоприда в данных экспериментальных условиях.

Ключевые слова: биоэлектрохимическая система, биоэлектрокатализ, биodeградация, краситель-обесцвечивающие *DyP* пероксидазы, перенос электронов, экзоэлектрогенез, имидаклоприд, *MtrB*, пестицид, *Shewanella oneidensis* MR-1

DOI: 10.31857/S0026365624040096

Применение биоэлектрохимических систем в экологической биотехнологии представляет собой перспективное направление, реализующее новые механизмы взаимодействия с микробными сообществами (Mohanakrishna et al., 2020; Cabrera et al., 2021; Wang et al., 2021; Lan et al., 2023). Активизация катаболической активности анаэробных микробиоценозов, при размещении там проводящих материалов, связана с формированием и увеличением эффективности путей межвидовой передачи электронов. Например, при одноэлектродной модели, когда единый углеродный проводник был размещен в анаэробной зоне, отмечалось возрастание продукции водорода и метана, благодаря интенсификации прямого транспорта электронов в синтрофных ассоциациях ацетогенных бактерий и метаногенов (Ножевникова и соавт., 2020; Laikova et al., 2023). При наличии двух электродов, один из которых размещен в аэробной зоне и осуществляет катодные полуреакции, а другой находится в анаэробной зоне, возможно формирование сложного

сообщества, в итоге передающего на анод электрон, который покидает анаэробную зону по внешней электрической цепи (Kiely et al., 2011), что является искусственным аналогом работы “бактериальных кабелей” из трихомов *Desulfobulbaceae* и подобных (Yuan et al., 2021). В этой ситуации для общей катаболической активности микробиоценоза возрастает важность конечного звена анаэробной цепи межвидовой передачи электронов, способного эффективно передавать электрон на внешний акцептор, например, представителей рода *Shewanella* (Voeikova et al., 2013) и других микроорганизмов, участвующих в формировании “биоэлектрохимических трубопроводов” (Marzocchi et al., 2020). Большой интерес представляет собой использование внешней электрической стимуляции цепи биоэлектрохимической системы. При воздействии внешнего напряжения 1.2 В было отмечено изменение состава микробиоценоза: происходила стимуляция бродильщиков и гидрогенотрофных метаногенов с увеличением выделения метана в 8.6 раза

(Zhi et al., 2022). При воздействии внешнего источника напряжения в биоэлектрoхимической системе мембранного типа на чистую культуру *Shewanella oneidensis* MR-1, обесцвечивающую различные красители, было отмечено влияние полярности подключения внешнего источника и разности потенциалов на удельную скорость реакции (Самков и соавт., 2023). Данный микроорганизм хорошо изучен в части строения и работы дыхательной цепи, обеспечивающей экзоэлектрогенез и содержащей, в том числе мембранный комплекс MtrB-MtrC-OmcA, на который электрон передается с СумА цитохромом MtrA (Shi et al., 2012). Представители *Shewanellaceae* способны к непосредственному участию в биодеградационных процессах, как это было продемонстрировано для штамма *S. oneidensis* MR-1, использующего краситель-обесцвечивающие пероксидазы ДуР-типа в биодеструкционных процессах (Xiao et al., 2012; Самков и соавт., 2023) и при этом участвующего в переносе электронов на анод. Таким образом, наличие в донных отложениях водоемов микроорганизмов, способных к экзоэлектрогенезу, может оказывать влияние на сопряжение электрохимических процессов на электроде и биодегградации органических субстратов.

В связи с интенсивным развитием сельского хозяйства одним из актуальных вызовов является накопление разнообразных пестицидов, в том числе имидаклоприда из ряда неоникотиноидов, который из-за аккумуляции в природных средах и токсического действия на нецелевые организмы представляет значительную проблему (Zhang et al., 2023), при этом лидируя по мировым продажам среди других инсектицидов. Известно, что данный пестицид весьма устойчив и крайне медленно подвергается биодегградации в естественных микробиоценозах (Sabourmoghaddam et al., 2015; Gautam et al., 2022). Коррелирующие с биодегградацией имидаклоприда ферменты отличаются значительным разнообразием. В частности, для *Rhodopseudomonas capsulata* при деградации имидаклоприда был отмечен рост экспрессии генов цитохром 450 монооксигеназы (Wu et al., 2020). Для *Agrobacterium* sp. InxBP2 с биодегградацией пестицида была предположена связь ферментов семейств амидогидралаз и монооксигеназ, в том числе нитратмонооксигеназ и других (Gautam et al., 2023). Известны недавние работы, посвященные исследованиям биодегградации ксенобактерии в биоэлектрoхимических системах. В работе (Li et al. 2023) было показано, что в безмембранной биоэлектрoхимической системе, с размещением подключенных к источнику тока и напряжения электродов в одной камере, при биодегградации имидаклоприда смешанной культурой возрастает доля протеобактерий, а также копияность целого ряда ферментов катаболических путей (Li et al., 2023). Наконец, для ряда организмов было обнаружено

участие в биотрансформации имидаклоприда пероксидаз (Zhu et al., 2023).

Целью работы служило исследование биодегградации имидаклоприда в донных отложениях при электрической стимуляции внешней цепи биоэлектрoхимической системы, с учетом относительной представленности генов MtrB — одного из ключевых элементов дыхательной цепи шewanелл, связанного с экзоэлектрогенезом, и генов краситель-обесцвечивающих пероксидаз ДуР-типа, широко распространенных среди протеобактерий и потенциально связанных с различными катаболическими процессами. Сравнение результатов для автохтонной микрофлоры донных отложений и в случае дополнительного внесения *Shewanella oneidensis* MR-1 призвано выяснить роль экзоэлектрогенных микроорганизмов в биоэлектрoхимической стимуляции деградации неоникотиноида в сложном сообществе.

В донные отложения (ил) пресного водоема (оз. Карасунское, г. Краснодар) с общим содержанием гетеротрофных микроорганизмов 8×10^7 КОЕ/мл, в тотальной ДНК из которых, с использованием вырожденных праймеров (F 5'-GAYCTGTGCTTYGARCTSGC-3', R 5'-ASCCGATRAARTASGTGCC-3') (Tian et al., 2016), предварительно был обнаружен максимально высокий из исследованных уровень относительной (к генам 16s рПНК, праймеры 27F, 805R) представленности генов ДуР, вносили имидаклоприд до конечной концентрации 40 мг/л. Ил размещали в емкостях слоем высотой 5 см, сверху поддерживали слой воды 2 см. На дне сосуда предварительно размещали анод из углеродного войлока НТМ-200М толщиной 4 мм, а в слое воды — аналогичный катод. К электродам подключали внешнюю цепь: пассивное сопротивление (резистор 1 кОм), либо заряженный до напряжения 1.2 В, ионистор с прямой полярностью подключения (отрицательный полюс подключен к аноду биоэлектрoхимической системы, “ионистор “+””), либо аналогичный ионистор с обратной полярностью подключения (положительный полюс к аноду, “ионистор “—”). В контролях отсутствовали оба электрода. При отсутствии резистора или ионистора цепь являлась разомкнутой. Параллельно был подготовлена аналогичная серия экспериментов, отличающаяся внесением в ил клеток штамма *Shewanella oneidensis* MR-1, полученного из ВКМ, до титра 5×10^6 кл./мл. После инкубации в течение 45 сут в донных отложениях методом ВЭЖХ определяли концентрацию остаточного имидаклоприда, процентные доли деградации которого от исходного количества приведены на рис. 1.

В течение эксперимента ионисторы, по мере разрядки менее 1 В, заряжали до 1.2 В. Отмечена значительно более быстрая разрядка ионистора, подключенного с обратной полярностью. Высокие

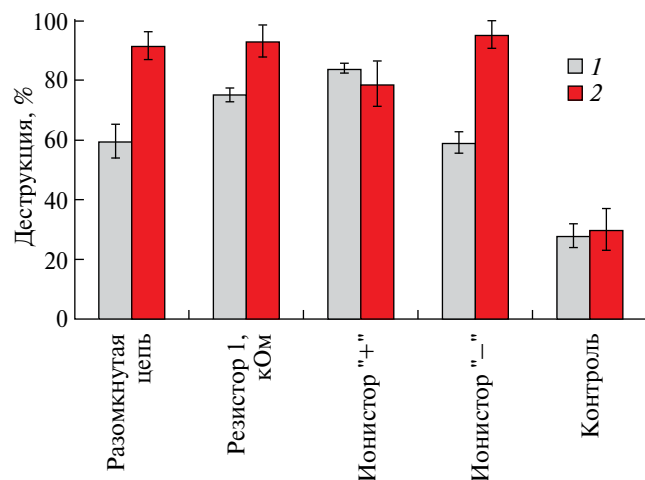


Рис. 1. Влияние способа электростимуляции внешней цепи биоэлектрохимической системы и внесения *Shewanella oneidensis* MR-1 на биодegradацию имидаклоприда в донных отложениях. 1 – автохтонная микрофлора; 2 – автохтонная микрофлора и *S. oneidensis* MR-1.

значения напряжения для вариантов “разомкнутая цепь” и “резистор 1 кОм”, не связанных с искусственными источниками напряжения, показали отсутствие токсического действия данной концентрации пестицида на электрогенную микробиоту, обычно выражающегося в значительном снижении электрогенеза (Lu et al., 2020). Влияние внешней электростимуляции проявлялось в вариантах опыта с автохтонной микрофлорой, присутствовавшей в донных отложениях. Максимальное значение деструкции было отмечено для варианта, где был подключен ионистор с прямой полярностью подключения (ионистор “+”) – $84.0 \pm 1.7\%$. Минимальные значения отмечены для разомкнутой цепи и ионистора с обратной полярностью подключения: 59.4 ± 5.7 и $59.0 \pm 3.5\%$ соответственно. В случае внесения клеток штамма *Shewanella oneidensis* MR-1 отмечено значительное возрастание показателя, варьировавшего в пределах 78.8 ± 7.7 – $95.2 \pm 4.6\%$, при этом ключевым для деструкции являлось наличие электропроводящего углеродного войлока, а отличия между вариантами опыта, различающимися внешней цепью, были незначительными. В контроле показатели деструкции были минимальными (27.7 ± 4.0 – $29.7 \pm 6.0\%$) и не зависели от внесения шеванеллы.

Из материала анода и прилегающего к нему ила выделяли ДНК, в которой методом ПЦР в реальном времени определяли относительную представленность гена *mtrB* трансмембранного белка дыхательной цепи MtrB (праймеры F 5'-AAACTCAAGGGTGATCGTTG и R 5'-TGGTTTCACGGTCTTGATAA), связанного с экзоэлектрогенезом, а также генов

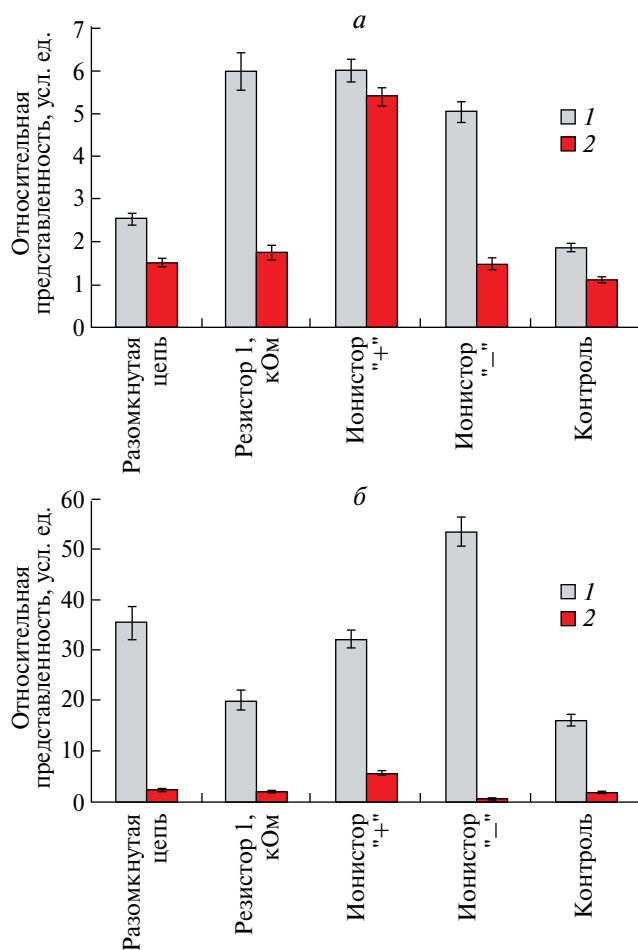


Рис. 2. Относительная представленность генов краситель-обесцвечивающих пероксидаз DyP-типа и трансмембранного белка дыхательной цепи MtrB в случае автохтонной микрофлоры донных отложений (а) и автохтонной микрофлоры донных отложений, куда дополнительно внесли *Shewanella oneidensis* MR-1 (б). 1 – DyP; 2 – MtrB.

краситель-обесцвечивающих пероксидаз DyP-типа. Для получения стандартных кривых и определения эффективности ПЦР реакции проводили с серией десятикратных разбавлений ДНК, выделенной из клеточной биомассы *S. oneidensis* MR-1 с праймерами к генам *mtrB*, DyP и 16s рНК. Эффективность ПЦР при использованных параметрах реакции составила 1.91, 1.87 и 1.99 для генов *mtrB*, DyP и 16s рНК соответственно. Относительную представленность выражали как отношение эффективностей референсного гена (16s рНК) к целевому в степенях соответствующих количественных циклов (Yuan et al., 2006). Результаты оценки относительной представленности исследуемых генов приведены на рис. 2.

В случае автохтонной микрофлоры донных отложений сравнение деструкции со значениями относительной представленности генов

краситель-обесцвечивающих пероксидаз DyP-типа и трансмембранного белка дыхательной цепи MtrB показало значительную корреляцию показателей. Максимальные значения для генов MtrB и DyP составили 5.38 ± 0.22 и 6.00 ± 0.26 усл. ед. соответственно и были отмечены для варианта цепи “ионистор “+””. В случае DyP показатель для вариантов “резистор 1 кОм” и “ионистор “–”” отличался от максимального незначительно, в целом сохраняя корреляцию с соответствующими значениями деструкции имидаклоприда. Напротив, в случае белка дыхательной системы MtrB, для варианта с максимальной деструкцией было отмечено значительное превышение показателя относительной представленности по отношению к остальным вариантам, варьировавшим в диапазоне 1.47 ± 0.1 (ионистор “–”) – 1.74 ± 0.17 (резистор 1 кОм).

При внесении *S. oneidensis* MR-1 отмечено сохранение зависимости показателя MtrB от внешней цепи – максимальное значение показателя сохранялось для варианта “ионистор “+”” и составило 5.46 ± 0.39 . При этом значения не коррелировали со степенью деструкции имидаклоприда. В случае же DyP происходило практически десятикратное возрастание показателей, величины варьировали от 19.84 ± 1.76 (резистор 1 кОм) до 53.41 ± 2.88 (ионистор “–”), значения зависели от цепи сходным с показателями деструкции образом, с доминированием последнего варианта.

Предположена связь катаболических путей микроорганизмов, использующих пероксидазы DyP-типа, с биодegradацией имидаклоприда в условиях микробиоценоза донных отложений, поскольку наблюдавшаяся корреляция представленности DyP с деструкцией сохранялась как в случае автохтонной микрофлоры, где присутствие генов было подтверждено экспериментально, так и при внесении культуры *S. oneidensis* MR-1, имеющей их в геноме каждой клетки. Это согласуется с данными о вовлечении внеклеточных пероксидаз в деструкцию имидаклоприда (Zhu et al., 2023). Роль дыхательной цепи экзоэлектрогенных микроорганизмов в сопряжении катаболизма поллютантов и электрохимических реакций на электродах биоэлектрохимической системы может быть связана с недавно открытой способностью шеванелл к двустороннему переносу электронов через свою дыхательную цепь, что обеспечивало возможность восстановительной трансформации субстратов электронами, поступающими от внешнего электрода через мембранный комплекс MtrB–MtrC–OmcA (Li Y. et al., 2023). Относительно отсутствия прироста представленности *mtrB* при внесении шеванеллы на фоне роста деструкции имидаклоприда можно отметить, что для восстановительной трансформации ряда поллютантов *S. oneidensis* MR-1 способна использовать, помимо дыхательного пути

Mtr, альтернативные: в частности, NfnB (Wang et al., 2020). Увеличение биодegradации пестицида по сравнению с контролем без углеродного войлока, отмеченное как для аборигенного сообщества, так и в еще более выраженной мере при внесении *S. oneidensis* MR-1, согласуется с данными о возможности усиления синтрофных взаимодействий за счет прямого транспорта электронов при наличии в анаэробной среде электропроводящих материалов, обеспечивающих межвидовой перенос заряда (Ножевникова и соавт., 2020).

Таким образом, усиление дегradации имидаклоприда в донных отложениях аборигенной микрофлорой зависело от электрической стимуляции внешней цепи, а при обогащении клетками *S. oneidensis* MR-1 определялось наличием электропроводящего анода. Изменения относительной представленности генов краситель-обесцвечивающих пероксидаз DyP-типа, а также трансмембранного белка дыхательной цепи шеванелл MtrB, были разными в случае экспериментов с автохтонной микрофлорой донных отложений и при добавлении клеток *S. oneidensis* MR-1. Относительная представленность генов трансмембранного белка дыхательной системы шеванелл MtrB во всех случаях зависела от внешней цепи, показав наибольший показатель в случае варианта “ионистор “+””, а для вариантов опытов с аборигенной микрофлорой также коррелировала с дегradацией пестицида. Значительное возрастание представленности генов краситель-обесцвечивающих пероксидаз DyP-типа происходило при внесении *S. oneidensis* MR-1, сопровождаясь, при наличии в донных отложениях электропроводящего материала анода, практически полной дегradацией имидаклоприда. Можно предположить механизм сопряжения электрохимических реакций на аноде и биодеструкционных процессов в толще донных отложений за счет способности дыхательных систем шеванелл к двустороннему переносу электронов на анод и обратно, в зависимости от приложенной к системе разности потенциала, либо за счет использования электропроводящего материала анода, независимо от внешней цепи, для передачи заряда в стимулируемом микробном сообществе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-24-00401 (<https://rscf.ru/project/22-24-00401/>).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая статья не содержит результатов исследований с использованием животных в качестве объектов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ножжевникова А.Н., Русскова Ю.И., Литти Ю.В., Паршина С.Н., Журавлева Е.А., Никитина А.А. Синтрофия и межвидовой перенос электронов в метаногенных микробных сообществах // Микробиология. 2020. Т. 89. С. 131–151.
- Nozhevnikova A.N., Russkova Yu.I., Litt Yu.V., Parshina S.N., Zhuravleva E.A., Nikitina A.A. Syntrophy and interspecies electron transfer in methanogenic microbial communities // Microbiology (Moscow). V. 89. P. 129–148.
- Самков А.А., Чугунова Ю.А., Круглова М.Н., Моисеева Е.В., Волченко Н.Н., Худокормов А.А., Самкова С.М., Карасева Э.В. Обесцвечивание красителей в биоэлектрохимической системе при иммобилизации клеток *Shewanella oneidensis* MR-1 на поверхности анода и электрической стимуляции внешней цепи // Прикл. биохимия и микробиология. 2023. Т. 59. С. 191–199.
- Samkov A.A., Chugunova Yu.A., Kruglova M.N., Moiseeva E.V., Volchenko N.N., Khudokormov A.A., Samkova S.M., Karaseva E.V. Decolorization of dyes in a bioelectrochemical system depending on the immobilization of *Shewanella oneidensis* Mr-1 cells on the anode surface and electrical stimulation of an external circuit // Appl. Biochem. Microbiol. V. 59. P. 198–206.
- Cabrera J., Irfan M., Dai Y., Zhang P., Zong Y., Liu X. Bioelectrochemical system as an innovative technology for treatment of produced water from oil and gas industry – a review // Chemosphere. 2021. V. 285. Art. 131428.
- Gautam P., Dubey S.K. Biodegradation of imidacloprid: molecular and kinetic analysis // Bioresour. Technol. 2022. V. 350. Art. 126915.
- Gautam P., Pandey A.K., Dubey S.K. Multi-omics approach reveals elevated potential of bacteria for biodegradation of imidacloprid // Environ. Res. 2023. V. 221. Art. 115271.
- Kiely P.D., Regan J.M., Logan B.E. The electric picnic: synergistic requirements for exoelectrogenic microbial communities // Curr. Opin. Biotechnol. 2011. V. 22. P. 378–385.
- Laikova A.A., Kovalev A.A., Kovalev D.A., Zhuravleva E.A., Shekhurdina S.V., Loiko N.G., Litt Yu.V. Feasibility of successive hydrogen and methane production in a single-reactor configuration of batch anaerobic digestion through bioaugmentation and stimulation of hydrogenase activity and direct interspecies electron transfer // Int. J. Hydrog. Energy. 2023. V. 48. P. 12646–12660.
- Lan J., Wen F., Ren Y., Liu G., Jiang Y., Wang Z., Zhu X. An overview of bioelectrokinetic and bioelectrochemical remediation of petroleum-contaminated soils // Environ. Sci. Technol. 2023. V. 16. Art. 100278.
- Lu H., Yua Y., Xi H., Wang C., Zhou Y. Bacterial response to formaldehyde in an MFC toxicity sensor // Enzyme Microb. Technol. 2020. V. 140. Art. 109565.
- Li X., Fan S., Zhang Y., Li D., Su C., Qi Z., Liang H., Gao S., Chen M. Performance and microbial metabolic mechanism of imidacloprid removal in a microbial electrolysis cell-integrated adsorption biological coupling system // Bioresour. Technol. 2023. V. 386. Art. 129513.
- Li Y., Qiao S., Guo M., Hou C., Wang J., Yu C., Zhou J., Quan X. Microbial electrosynthetic nitrate reduction to ammonia by reversing the typical electron transfer pathway in *Shewanella oneidensis* // Cell Rep. Phys. Sci. 2023. V. 4. Art. 101433.
- Marzocchi U., Palma E., Rossetti S., Aulenta F., Scoma A. Parallel artificial and biological electric circuits power petroleum decontamination – the case of snorkel and cable bacteria // Water Res. 2020. V. 173. Art. 115520.
- Mohanakrishna G., Al-Raoush R.I., Abu-Reesh I.M. Sewage enhanced bioelectrochemical degradation of petroleum hydrocarbons in soil environment through bioelectrostimulation // Biotechnol. Rep. 2020. V. 27. Art. e00478.
- Sabourmoghaddam N., Zakaria M.P., Dzolikhifli O. Evidence for the microbial degradation of imidacloprid in soils of Cameron Highlands // J. Saudi Soc. Agric. Sci. 2015. V. 14. P. 182–188.
- Shi L., Rosso K.M., Clarke T.A., Richardson D.J., Zachara J.M., Fredrickson J.K. Molecular underpinnings of Fe (III) oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 // Front. Microbiol. 2012. V. 3. Art. 50. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00050>
- Tian J.-H., Pourcher A.-M., Klingelschmitt F., Le Roux S., Peu P. Class P dye-decolorizing peroxidase gene: degenerated primers design and phylogenetic analysis // J. Microbiol. Methods. 2016. V. 130. P. 148–153.
- Voeikova T.A., Emel'yanova L.K., Novikova L.M., Shakulov R.S., Sidoruk K.V., Smirnov I.A., Il'in V.K., Soldatov P.E., Tyurin Kuz'min A. Yu., Smolenskaya T.S., Debabov V.G. Intensification of bioelectricity generation in microbial fuel cells using *Shewanella oneidensis* MR-1 mutants with increased reducing activity // Microbiology (Moscow). 2013. V. 82. P. 410–414.
- Wang H., Xing L., Zhang H., Gui C., Jin S., Lin H., Li Q., Cheng Ch. Key factors to enhance soil remediation by bioelectrochemical systems (BESs): a review // Chem. Eng. J. 2021. V. 419. Art. 129600.
- Wang H., Zhao H.-P., Zhu L. Structures of nitroaromatic compounds induce *Shewanella oneidensis* MR-1 to adopt different electron transport pathways to reduce the contaminants // J. Hazard. Mater. 2020. V. 384. Art. 121495.
- Wu P., Zhang X., Niu T., Wang Y., Liu R., Zhang Y. The imidacloprid remediation, soil fertility enhancement and microbial community change in soil by *Rhodopseudomonas capsulate* using effluent as carbon source // Environ. Pollut. 2020. V. 267. Art. 114254.

- Xiao X., Xu C.-C., Wu Y.-M., Cai P.-J., Li W.-W., Du D.-L., Yu H.-Q. Biodecolorization of Naphthol Green B dye by *Shewanella oneidensis* MR-1 under anaerobic conditions // Bioresour. Technol. 2012. V. 110. P. 86–90.
- Yuan J.S., Reed A., Chen F., Stewart C.N. Jr. Statistical analysis of real-time PCR data // BMC Bioinform. 2006. V. 7. Art. 85.
- Yuan Y., Zhou L., Hou R., Wang Y., Zhou S. Centimeter-long microbial electron transport for bioremediation applications // Trends Biotechnol. 2021. V. 39. P. 181–193.
- Zhang X., Huang Y., Chen W.-J., Wu S., Lei Q., Zhou Z., Zhang We., Mishra S., Bhatt P., Chen S. Environmental occurrence, toxicity concerns, and biodegradation of neonicotinoid insecticides // Environ. Res. 2023. V. 218. Art. 114953.
- Zhi Z., Pan Y., Lu X., Wang J., Zhen G. Bioelectrochemical regulation accelerates biomethane production from waste activated sludge: focusing on operational performance and microbial community // Sci. Total Environ. 2022. V. 814. Art. 152736.
- Zhu S., Chen A., Chai Y., Cao R., Zeng J., Bai M., Peng L., Shao J., Wang X. Extracellular enzyme mediated biotransformation of imidacloprid by white-rot fungus *Phanerochaete chrysosporium*: mechanisms, pathways, and toxicity // Chem. Eng. J. 2023. V. 472. Art. 144798.

SHORT COMMUNICATIONS

Effect of Electrical Stimulation of the External Circuit of Membraneless Bioelectrochemical Systems on Imidacloprid Degradation and Representation of the *mtrB* and DyP-Type Peroxidases Genes

A. A. Samkov¹, *, S. M. Samkova¹, and M. N. Kruglova¹

¹Kuban State University, 350040, Krasnodar Russia

*e-mail: andreysamkov@mail.ru

Received October 16, 2023; revised November 10, 2023; accepted November 14, 2023

Abstract. In all variants where carbon felt was present, imidacloprid degradation by the microflora of bottom sediments was many times higher than in the control, reaching $84.0 \pm 1.7\%$ under the polar connection of an external voltage source (1.2 V). When *Shewanella oneidensis* MR-1 was introduced, almost complete degradation of the pollutant was observed, while in the control without electrodes, it was 29.7 ± 6.0 . The relative representation of the genes of the MtrB transmembrane protein of the respiratory chain, which is associated with exoelectrogenesis, depended on the external chain and had a maximum value when the voltage source was connected polarly, correlating with the pesticide degradation by the autochthonous microflora, similar to the DyP-type peroxidase genes. The introduction of *S. oneidensis* MR-1 resulted in an almost tenfold increase in the relative representation of DyP-type peroxidase genes. In all experimental variants, the values of the DyP relative representation were significantly higher than in the control without carbon felt, as well as the degree of imidacloprid degradation under these experimental conditions.

Keywords: bioelectrochemical system, bioelectrocatalysis, biodegradation, dye-decolorizing DyP peroxidases, electron transfer, exoelectrogenesis, imidacloprid, MtrB, pesticide, *Shewanella oneidensis* MR-1