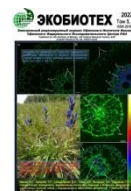




# ЭКОБИОТЕХ

ISSN 2618-964X

http://ecobiotech-journal.ru



## ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА БИОДЕГРАДАЦИИ 2,4-Д В ПОЧВЕ ШТАММАМИ-ДЕСТРУКТОРАМИ ГАЛОГЕНООРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Худайгулов Г.Г.<sup>1</sup>, Стариков С.Н.<sup>1</sup>,  
Столярова Е.А.<sup>1</sup>, Логинова Е.В.<sup>2</sup>,  
Четвериков С.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уфимский Институт биологии Уфимского федерального  
исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

<sup>2</sup> ЗАО НПП «Биомедхим», Уфа, Россия

\*E-mail: [bio-logos@yandex.ru](mailto:bio-logos@yandex.ru)

В работе описана способность штаммов *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-Д и *Pseudomonas* sp. DD4 утилизировать в почве 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту (2,4-Д) с высокой степенью эффективности. Изучена динамика роста бактерий и убыли концентрации 2,4-Д в почве. В модельном эксперименте с почвой загрязненной 2,4-Д показано, что при высоких концентрациях загрязнения (до 100 мг/кг) после периода адаптации исследуемые штаммы утилизировали ксенобиотик с эффективностью до 100%.

Также были подобраны и предложены условия проведения анализа для хроматографического разделения 2,4-Д и промежуточных метаболитов методом ВЭЖХ-МС, отработана методика оценки биодеструкции 2,4-Д в почве.

На основе полученных результатов штаммы бактерий *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-Д и *Pseudomonas* sp. DD4 могут быть рекомендованы для их применения в качестве основы для биопрепаратов для очистки загрязненных 2,4-Д почв при концентрациях поллютанта до 100 мг/кг.

**Ключевые слова:** 2,4-Д ♦ биодegradация ♦ галогенорганические соединения ♦ *Pseudomonas*

## EVALUATION OF THE BIODEGRADATION OF 2,4-D IN SOIL BY STRAINS-DESTRUCTORS OF ORGANOHALOGEN COMPOUNDS

Khudaigulov G.G.<sup>1</sup>, Starikov S.N.<sup>1</sup>,  
Stolyarova E.A.<sup>1</sup>, Loginova E.V.<sup>2</sup>,  
Chetverikov S.P.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ufa Institute of Biology of the Ufa Federal Research Centre of  
the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

<sup>2</sup> TCJSC SPE «Biomedhim», Ufa, Russia

\*E-mail: [bio-logos@yandex.ru](mailto:bio-logos@yandex.ru)

The article describes the ability of *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and *Pseudomonas* sp. DD4 strains to efficiently utilize 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) in soil. The dynamics of bacterial growth and the decrease in the concentration of 2,4-D in the soil were studied. In a model experiment with contaminated 2,4-D soil, it was shown that at high concentrations of contamination (up to 100 mg/kg) after the adaptation period, the studied strains utilized xenobiotic with an efficiency approaching to 100%.

The conditions of chromatographic analysis of 2,4-D and intermediate metabolites of its destruction by HPLC-MS were determined, and a methodology for assessing the biodegradation of 2,4-D in soil was developed.

Studied bacterial strains can be recommended for use as the basis of biological products-destroyers of organohalogen compounds.

**Keywords:** 2,4-D ♦ biodegradation ♦ organohalogen compounds ♦ *Pseudomonas*

Поступила в редакцию: 07.12.2022

Цитировать | Cite as

DOI: [10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217)

EDN: QKNUQM



## ВВЕДЕНИЕ

Количество используемых гербицидов неуклонно растет. Согласно отчету компании «Август» объем продаж гербицидов по итогам 2020 года, не смотря на упадок экономики из-за пандемии, составил 415 млн. рублей, что на 12,8% больше по сравнению с 2019 годом. Для борьбы с сорными растениями, особенно когда речь идет о пшенице, наиболее распространенными и применяемыми являются препараты на основе

2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты (2,4-Д) [Журнал “Агроинвестор”, 2021: <https://www.agroinvestor.ru/>]. Однако, появление устойчивых к гербицидам сорняков, фактическое отсутствие контроля за содержанием в почве остаточных количеств химикатов является причиной завышения фермерами регламентированных норм применения, что является причиной накопления в почве остаточных количеств гербицидов. Помимо дополнительного стрессового воздействия на сами с/х культуры, это негативно сказывается на микробиоме почв [Moretto et al., 2017; Meena et al., 2020]. Из-за слабой адсорбции и высокой растворимости в воде 2,4-Д легко вымывается с полей и часто обнаруживается в поверхностных и подземных водах, что представляет существенную экологическую проблему и опасность для здоровья [Gaultier et al., 2008; Kearns et al., 2014; Shareef, Shaw, 2008].

В научной литературе имеются сообщения о разработке и планируемом внедрении устойчивых к 2,4-Д сельскохозяйственных культур (например, новых сортов кукурузы и сои), что может привести к более широкому использованию гербицида и потенциально небезопасному уровню его остатков в окружающей среде [Schutte et al., 2017].

Также актуальна проблема рекультивации (санации) территорий предприятий-производителей продуктов галогенорганической химии, находящихся в стадии ликвидации, в частности, ОАО «Уфахимпром». На сегодняшний день площадь загрязнения на территории предприятия составляет 142,9 га, а в его шламонакопителях находится около 500 тыс. куб. м неочищенных отходов. При этом шлам и ил шламонакопителей, почва и грунт на территории «Уфахимпрома» загрязнены хлорфеноксиуксусными гербицидами (2,4-Д и 2,4,5-Т), хлорбензолами, хлорфенолами, полихлорированными бензолами, дифенилсульфоном, диоксинами, нефтепродуктами и тяжелыми металлами [Шамсутдинова, и др., 2010].

Указанные тенденции повышают актуальность разработки мер по удалению из почвы остатков 2,4-Д и ликвидации локальных очагов загрязнения сельскохозяйственных угодий этим гербицидом, возникающих в случае нарушения техники безопасности во время приготовления рабочих растворов, очистке оборудования и утилизации неиспользованных препаратов. Одно из эффективных, экономически выгодных и безопасных направлений в этой области – применение микроорганизмов-деструкторов [Nayak et al., 2018; Yang et al., 2018], в том числе ассоциированных с растениями бактерий [Germaine et al., 2006].

Основными факторами, влияющими на ход биоразрушения органических загрязнителей, являются их химическая природа (которая обуславливает возможные пути биотрансформации), концентрация и взаимодействие с другими загрязнителями (на уровне их непосредственного взаимодействия или взаимного влияния на биотрансформацию) [Limbert, Betts, 1996].

К неблагоприятным физико-химическим условиям, лимитирующим деградацию микроорганизмами ксенобиотиков в окружающей среде, можно отнести низкую или чрезмерную влажность почвы, недостаточное содержание кислорода, неблагоприятную температуру и pH, низкую концентрацию или доступность ксенобиотиков, их плохую

растворимость в воде, наличие альтернативных, более предпочтительных субстратов и дополнительное ингибирование ксенобиотиками метаболизма микробных клеток через окислительный стресс [de Oliveira et al., 2021]. С другой стороны, пластичность метаболизма бактерий делает возможным биodeградацию токсичных соединений [Rovida et al., 2021].

Таким образом, интродукция активных деструкторов гербицидов может значительно улучшить способность микробиома почвы к деградации поллютанта путем преодоления окислительного стресса и разложения его до менее токсичных компонентов.

Цель работы: оценка потенциала биodeградации 2,4-Д в почве штаммами-деструкторами галогенорганических соединений.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись почвенные бактерии-деструкторы галогенорганических соединений *Pseudomonas plecoglossicida* 2.4-Д (штамм запатентован в качестве деструктора перфтороктансульфоновой кислоты) [Четвериков и др., 2017, 2018] и *Pseudomonas* sp. DD4 (штамм для деструкции галогенсодержащих ПАВ и гербицидов) [Шарипов, Четвериков, 2021].

Для экспериментов использовали 3-х суточные культуры бактерий, выращенные на среде следующего состава, г/л: пептон – 15, NaCl – 5, на орбитальном термостатируемом шейкере Biosan ES-20/60 (Biosan, Латвия).

Для проведения эксперимента использовали серую лесную почву, которую предварительно просеивали через сито с размером ячеек 2 мм. Эксперимент проводили в полипропиленовых емкостях с размерами 24x21x18 см (ВxШxГ) с 2 кг почвы. В почву вносили бактерии-деструкторы и 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту в концентрациях 10, 50, 100 мг/кг и инкубировали при температуре 28-30°C на протяжении 8 недель (схема представлена в таблице 1). Почву периодически увлажняли, добавляя 100 мл дистиллированной воды, и перемешивали.

**Таблица 1. Схема эксперимента**

Контроль (без инокуляции бактерий) 10 мг/кг 2.4-Д	+10 мг/кг 2.4-Д + штамм 2.4-Д	+10 мг/кг 2.4-Д + штамм DD4
Контроль (без инокуляции бактерий) 50 мг/кг 2.4-Д	+50 мг/кг 2.4-Д + штамм 2.4-Д	+50 мг/кг 2.4-Д + штамм DD4
Контроль (без инокуляции бактерий) 100 мг/кг 2.4-Д	+100 мг/кг 2.4-Д + штамм 2.4-Д	+100 мг/кг 2.4-Д + штамм DD4

Численность микроорганизмов определяли высевом последовательных разведений водной суспензии образцов на агаризованную среду: для определения количества гетеротрофных микроорганизмов на среду мясопептонный агар (МПА), для деструкторов на среду Цукамуры с 2,4-Д в качестве единственного источника углерода и энергии.

Пробы отбирали массой 1 г из разных участков для усреднения и высевали на твердую питательную среду. Культивирование микроорганизмов осуществляли при

температуре 28°C в течение 5 суток. Подсчитывали число выросших колоний с учетом разведения суспензии (считали, что каждая колония вырастает из одной бактериальной клетки). Численность выражали в колониеобразующих единицах на грамм воздушно-сухого грунта (КОЕ/г).

Для определения содержания 2,4-Д в почве отбирали пробы массой 1 г из разных участков для усреднения. Навеску сухой почвы экстрагировали хлористым метиленом, полученный экстракт упаривали досуха, сухой остаток растворяли в 1 мл подвижной фазы и анализировали методом ВЭЖХ-МС.

Пробы анализировали в системе ВЭЖХ LC-20 Prominence с диодно-матричным детектором SPD-M20A («Shimadzu», Япония). Для хроматографического разделения использовали колонку PerfectSil Target ODS-3 HD 5µm (150x4,6 mm) («MZ-Analysentechnik», Германия). В качестве подвижной фазы использовали 50%-ный раствор ацетонитрила в 0,1%-ной уксусной кислоте при скорости элюирования 0,4 мл/мин. Объем вводимой пробы – 5 мкл.

Анализ ВЭЖХ-МС проводили на жидкостном тандемном хромато-масс-спектрометре LCMS-IT-TOF («Shimadzu», Япония) в ЦКП УФИЦ РАН «Агидель». Прибор LCMS-IT-TOF работал с использованием ионизации электрораспылением (ESI) в режиме отрицательных ионов со следующими параметрами: высоковольтный зонд: 3,5 кВ; поток распыляющего газа: 1,5 л/мин; температура CDL: 200 °C; температура термоблока: 200 °C; давление газа-осушителя: 100 кПа; напряжение детектора TOF: 1,6 кВ. Раствор трифторуксусной кислоты использовался в качестве стандартного образца для настройки чувствительности и разрешения, а также для выполнения калибровки массового числа (ионная ловушка и времяпролетный анализатор).

Концентрацию 2,4-Д определяли по калибровочной кривой, построенной с использованием стандарта (Sigma-Aldrich, США), в интервале концентраций 50-100000 нг/мл.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уменьшение концентраций введённого в почву гербицида 2,4-Д происходит двумя путями: биологическим (деструкция) и абиотическим (связывание). Способность почвы к адсорбции зависит от минерального состава, pH, гранулометрического состава и других факторов [Buerge, et al., 2020].

В эксперименте без интродукции штаммов-деструкторов содержание экстрагируемого гербицида через 8 недель снижалась на 40% (наблюдалось снижение субстрата с 10 до 6 мг/кг, с 50 до 33 мг/кг, со 100 до 63 мг/кг (рис. 1)). Число микроорганизмов-деструкторов в 1 г сухой почвы в начале эксперимента без интродукции активных штаммов составляло  $2 \cdot 10^7$  КОЕ/г.

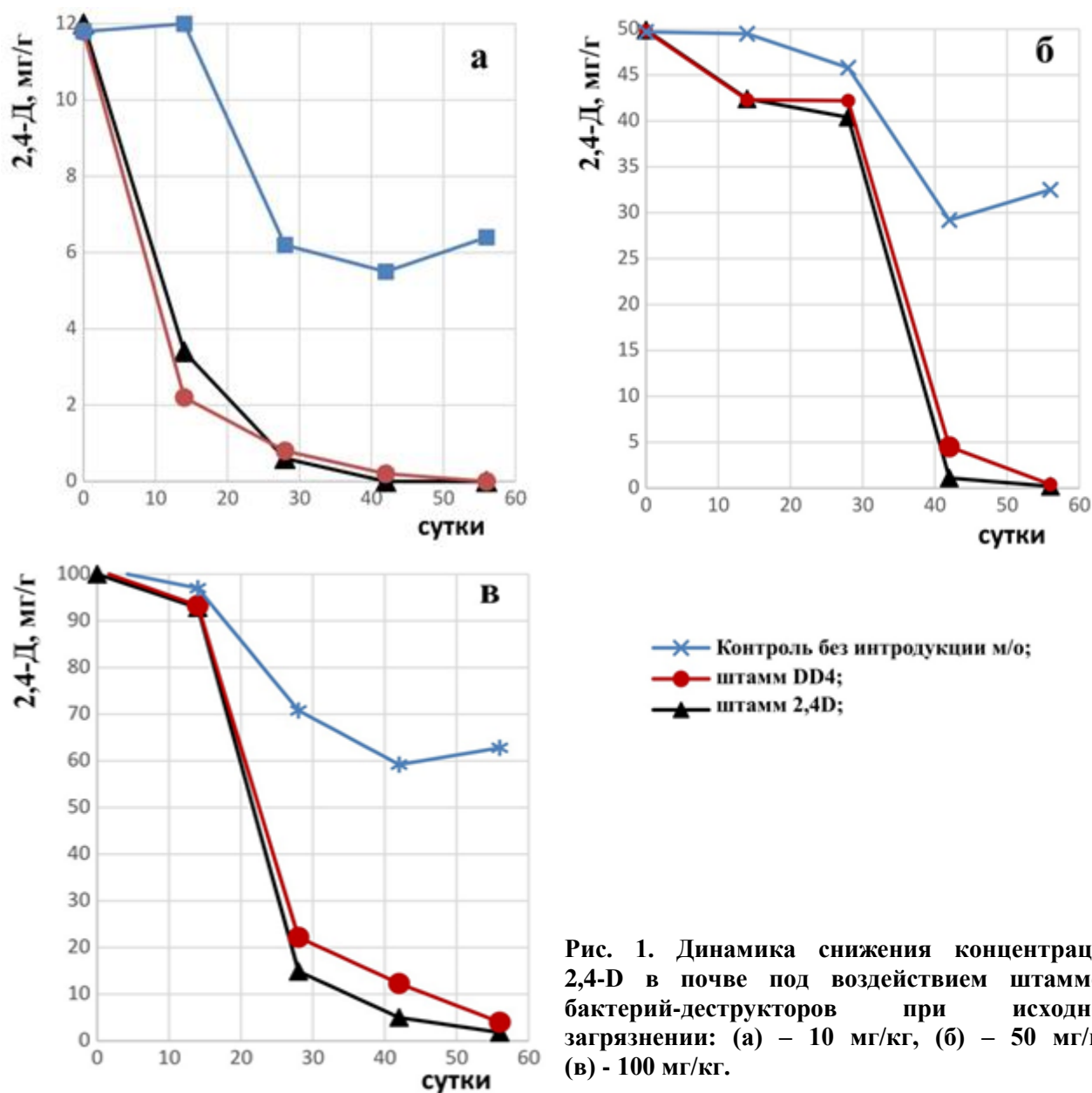


Рис. 1. Динамика снижения концентрации 2,4-Д в почве под воздействием штаммом бактерий-деструкторов при исходном загрязнении: (а) – 10 мг/кг, (б) – 50 мг/кг, (в) - 100 мг/кг.

При внесении исследуемых штаммов в почву биологическая декомпозиция 2,4-Д выходит на первый план. При загрязнении 10 мг/кг и внесении штаммов-деструкторов (рис. 1а) деструкция уже через 2 недели доходила до уровня 80%, было достаточно 4 недель для разложения более 90% токсичного субстрата. Численность деструкторов в контрольном варианте резко повышалась только при снижении количества экстрагируемого 2,4-Д, тогда как в вариантах с экзогенным внесением бактерий, способных к разложению токсичного вещества, данный показатель снижался только в первые две недели эксперимента, а затем резко возрастал. По рис. 1б и рис. 1в заметно увеличение адапционного периода при более высоких дозировках загрязнителя (2,4-Д). Так при загрязнении 50 мг/кг (рис. 1б) микроорганизмам потребовалась трехнедельная адаптация к субстрату, после чего деструкция ещё через 2 недели доходила до уровня не ниже 90%. В варианте загрязнения 100 мг/кг (рис. 1в) подготовительный адапционный период составил не более 14 суток, через 3 недели деструкция доходила до 75%, а через 4 недели остаточное количество

составляло не более 15%. Численность бактерий при этом резко возростала только по прошествии адаптационного периода.

Помимо анализа изменения концентрации внесённого 2,4-Д в почве, контролировали общую численность микроорганизмов (среда МПА) (рис. 2) и изменение численности микроорганизмов-деструкторов 2,4-Д (среда Цукамуры) (рис. 3).

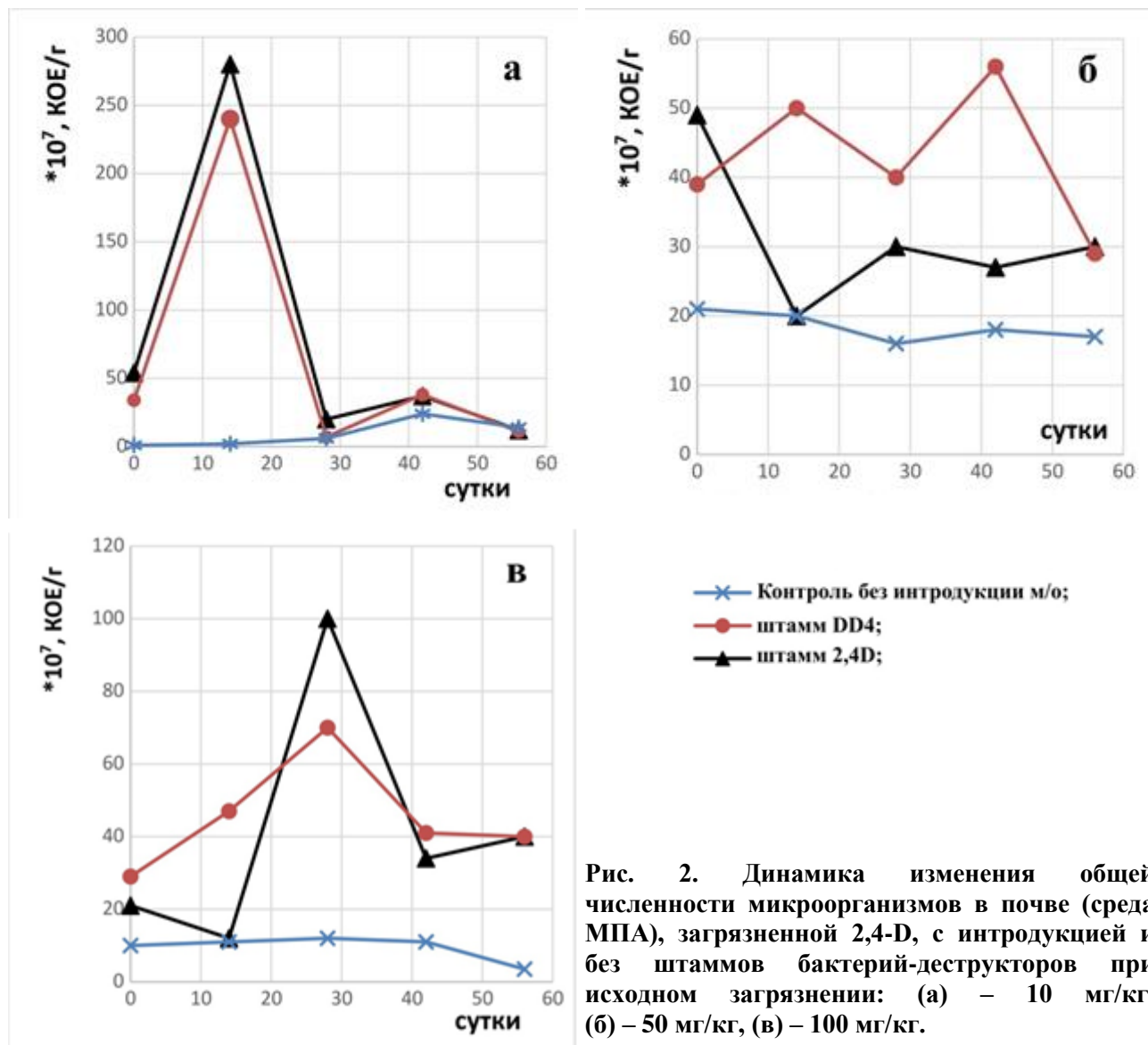


Рис. 2. Динамика изменения общей численности микроорганизмов в почве (среда МПА), загрязненной 2,4-Д, с интродукцией и без штаммов бактерий-деструкторов при исходном загрязнении: (а) – 10 мг/кг, (б) – 50 мг/кг, (в) – 100 мг/кг.

Число жизнеспособных бактерий в 1 г сухой почвы в начале эксперимента без интродукции деструкторов составляло до  $2 \cdot 10^8$  КОЕ/г, на среде Цукамуры высевалось  $2 \cdot 10^7$  КОЕ/г. Их численность в процессе эксперимента практически не изменялась.

В вариантах опыта с интродукцией штаммов деструкторов наблюдали увеличение числа жизнеспособных бактерий в 1 г сухой почвы в 5-15 раз к середине эксперимента (к периоду активной деструкции) и последующим торможением роста (при загрязнении 50 и 100 мг/кг) или снижением титра микроорганизмов (при загрязнении 10 мг/кг) в связи с истощением в среде основного источника питания.

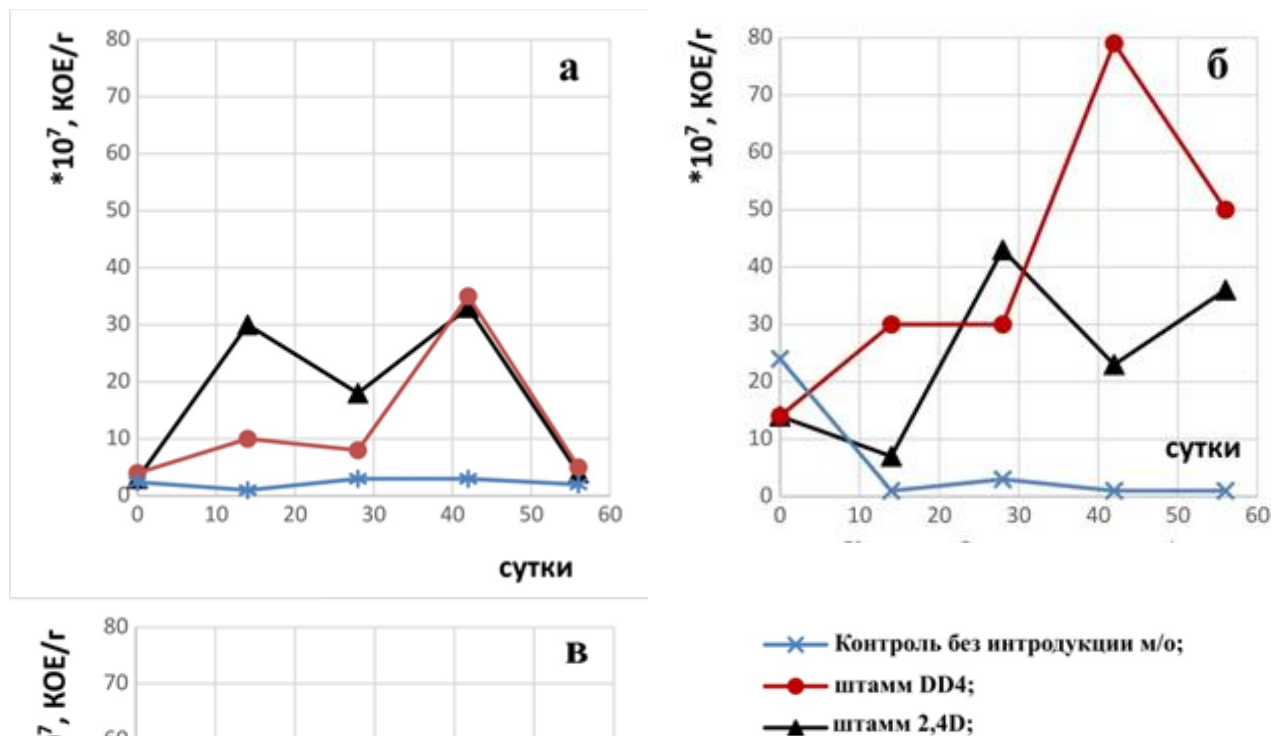
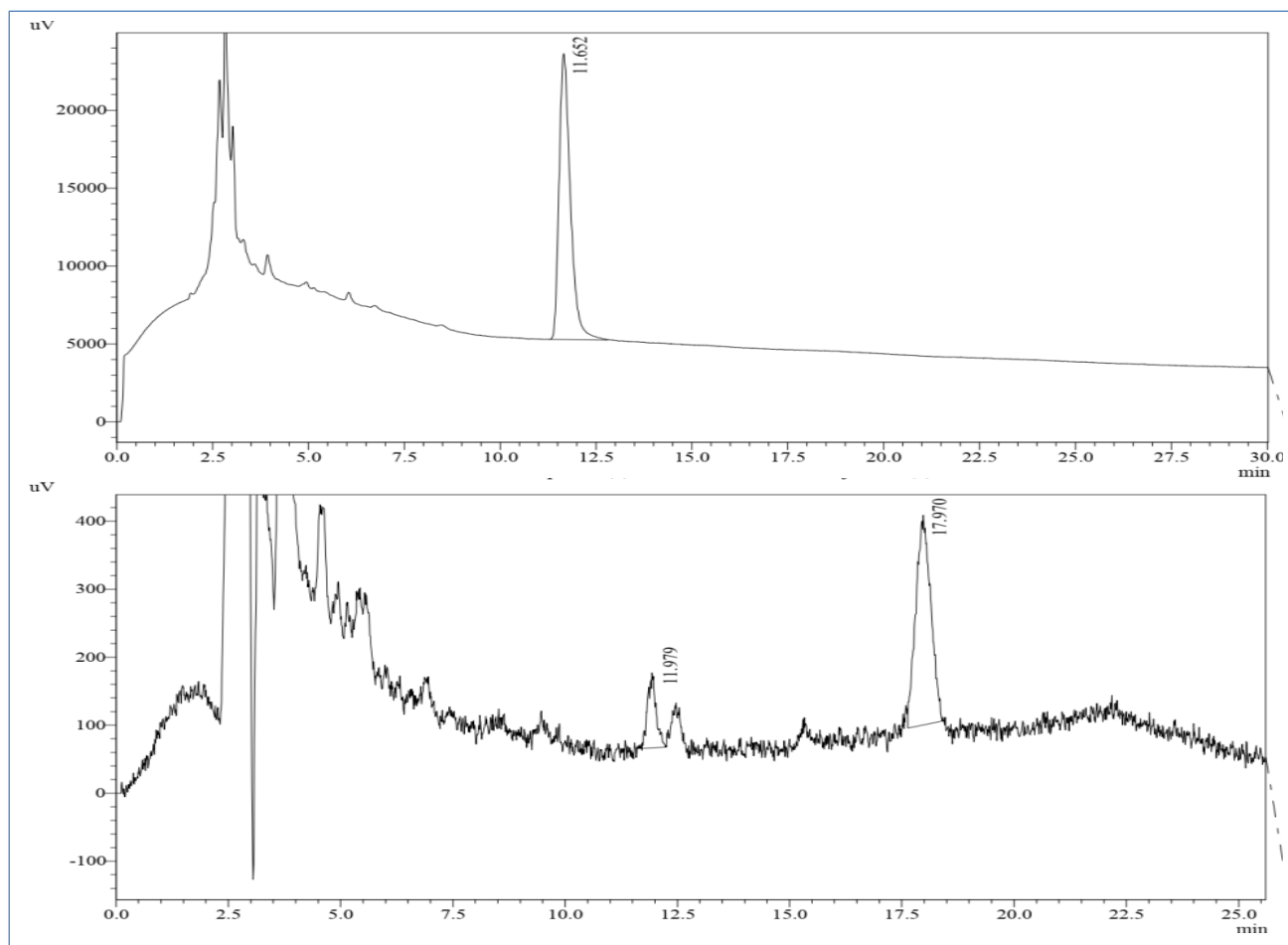


Рис. 3. Динамика изменения численности микроорганизмов-деструкторов 2,4-Д в почве (среда Цукамуры), загрязненной, с интродукцией и без штаммов бактерий-деструкторов при исходном загрязнении: (а) – 10 мг/кг, (б) – 50 мг/кг, (в) – 100 мг/кг.

Наличие периода адаптации, как и его увеличение при повышенных концентрациях 2,4-Д, может быть связано с окислительным воздействием гербицида, который ввиду своего состава и строения способен оказывать стрессовое воздействие на микробиом почвы повреждая липиды, генетический материал и протеины микроорганизмов, и для штаммов-деструкторов требуется больше времени для выработки факторов защиты от негативного влияния [Song, et al., 2020].

При масс-спектрометрическом анализе почвенного экстракта, помимо ионов 2,4-Д, зарегистрированных в отрицательной области, обнаруживались ионы, принадлежавшие разным соединениям. По результатам интерпретации электронных и масс-спектров этих соединений установили наличие предположительно интермедиата биодеструкции – 2,4-дихлорфенола, что коррелирует с исследованиями других авторов [Serbent, et al., 2019]. На рисунке 4 представлены типовые хроматограммы экстрактов почвы в начале и конце эксперимента.





**Рис. 4. Типовые хроматограммы экстрактов почвы:**  
**(а) - контроль со 100 мг/кг 2,4-Д (исходная), (б) – со 100 мг/кг 2,4-Д и интродукцией штамма 2,4-Д бактерий-деструкторов (через 8 недель эксперимента)**

На основе полученных данных, исследуемые штаммы показали близкую к 100% эффективность в качестве деструктора 2,4-дихлорфеноксиуксусной кислоты и могут рассматриваться как кандидаты для создания на их основе биопрепаратов для санации почв загрязненных галогенорганическими соединениями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Четвериков С.П., Шарипов Д.А., Коршунова Т.Ю., Логинов О.Н. Разложение перфтороктансульфоната штаммом *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-Д // Прикладная биохимия и микробиология. 2017. Т. 5. С. 477–483. DOI: [10.7868/S0555109917050026](https://doi.org/10.7868/S0555109917050026)
2. Четвериков С.П., Шарипов Д.А., Логинов О.Н. Штамм бактерий *Pseudomonas plecoglossicida*, осуществляющий биодegradацию перфтороктансульфоновой кислоты // Патент РФ № 2644206. Заявл. 14.07.2017; опубл. 08.02.2018. Бюл. № 4.
3. Шарипов Д.А., Четвериков С.П. Штамм *Pseudomonas sp. DD4* для деструкции галогенсодержащих ПАВ и гербицидов // Экобиотех. 2021. Т. 4(1). С. 60-67. DOI: [10.31163/2618-964X-2021-4-1-60-67](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2021-4-1-60-67)
4. Шамсутдинова Л. Р. и др. Загрязнение почв территории ОАО "Уфахимпром" // Башкирский экологический вестник. 2010. Т. 1(22). С. 31-35.



5. Электронный ресурс URL: <https://www.agroinvestor.ru/business-pages/35133-biznes-avgusta-po-prodazhe-industrialnykh-gerbitsidov-vyros-v-40-raz-za-10-let/> (дата обращения 22.11.2021)
6. Buerge, I.J., Pavlova, P., Hanke, I. et al. Degradation and sorption of the herbicides 2,4-D and quizalofop-P-ethyl and their metabolites in soils from railway tracks // *Environmental Sciences Europe*. 2020. T. 32. P. 1-15. DOI: [10.1186/s12302-020-00422-6](https://doi.org/10.1186/s12302-020-00422-6)
7. de Oliveira EP, Rovida AFdS, Martins JG, et al. Tolerance of *Pseudomonas* strain to the 2,4-D herbicide through a peroxidase system // *PLoS ONE*. V. 16(12). P. 11415. DOI: [10.1371/journal.pone.0257263](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257263)
8. Gaultier J., Farenhorst A., Cathcart J., Goddard T. Degradation of [carboxyl-14C] 2,4-D and [ring-U-14C] 2,4-D in 114 agricultural soils as affected by soil organic carbon content // *Soil Biol. Biochem.* 2008. V. 40. P. 217-227. DOI: [10.1016/j.soilbio.2007.08.003](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.08.003)
9. Germaine K.J., Liu X., Cabellos G.C., et al. Bacterial endophyte-enhanced phytoremediation of the organochlorine herbicide dichlorophenoxyacetic acid // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2006. V. 57 (2). P. 302-310. DOI: [10.1111/j.1574-6941.2006.00121.x](https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2006.00121.x)
10. Kearns J.P., Wellborn L.S., Summers R.S., Knappe D.R.U. 2,4-D adsorption to biochars: Effect of preparation conditions on equilibrium adsorption capacity and comparison with commercial activated carbon literature data // *Water Research*. 2014. V. 62. P. 20-28. DOI: [10.1016/j.watres.2014.05.023](https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.05.023)
11. Li M., Song J., Ma Q., et al. Insight into the Characteristics and New Mechanism of Nicosulfuron Biodegradation by a *Pseudomonas* sp. LAM1902 // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020. T. 68(3) P. 826–837. DOI: [10.1021/acs.jafc.9b06897](https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06897)
12. Limbert E.S.B., Betts W.B. Influences of substrate chemistry and microbial metabolic diversity on the bioremediation of xenobiotic contamination // *Genet. Eng. and Biotechnol.* 1996. V. 16(3). P. 159-180.
13. Meena, R. S., Kumar, S., Datta, R., et al. Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: a review // *Land*. 2020. V. 9(2). P. 34. DOI: [10.3390/land9020034](https://doi.org/10.3390/land9020034)
14. Moretto, J. A. S., Altarugio, L. M., Andrade, P. A., et al. Changes in bacterial community after application of three different herbicides // *FEMS Microbiol Lett.* 2017. V. 364(13). fnx113. DOI: [10.1093/femsle/fnx1133](https://doi.org/10.1093/femsle/fnx1133)
15. Nayak S.K., Dash B., Baliyarsingh B. Microbial Remediation of Persistent Agro-chemicals by Soil Bacteria: An Overview. In: *Microbial Biotechnology*. Ed. by J. Patra, G. Das, H.S. Shin. Springer, Singapore. 2018. V. 2. P. 275-301. DOI: [10.1007/978-981-10-7140-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-10-7140-9_13)
16. Rovida AFdS, Costa G, Santos MI et al. Herbicides tolerance in a *Pseudomonas* strain is associated with metabolic plasticity of antioxidative enzymes regardless of selection // *Frontiers in microbiology*. V. 12 2021. – P. 1430. DOI: [10.3389/fmicb.2021.673211](https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.673211)
17. Schutte G., Eckerstorfer M., Rastelli V., et al. Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicideresistant plants // *Environ. Sci. Eur.* 2017. V. 29. Article 5. DOI: [10.1186/s12302-016-0100-y](https://doi.org/10.1186/s12302-016-0100-y)
18. Serbent, M.P., Rebelo, A.M., Pinheiro, A. et al. Biological agents for 2,4-dichlorophenoxyacetic acid herbicide degradation // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2019. V. 103(13), P. 5065–5078. DOI: [10.1007/s00253-019-09838-4](https://doi.org/10.1007/s00253-019-09838-4)
19. Shareef K., Shaw G. Sorption kinetics of 2,4-D and carbaryl in selected agricultural soils of northern Iraq: Application of a dual-rate model // *Chemosphere*. 2008. V. 72 (1). P. 8-15. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2008.02.056](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.02.056)

20. Yang Z., Xu X., Dai M., et al. Combination of bioaugmentation and biostimulation for remediation of paddy soil contaminated with dichlorophenoxyacetic acid // J. Hazardous Materials. 2018. V. 353 (5). P. 490-495. DOI: [10.1016/j.jhazmat.2018.04.052](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.052)

Цитировать как

Худайгулов Г.Г., Стариков С.Н., Столярова Е.А., Логинова Е.В., Четвериков С.П. Оценка потенциала биodeградации 2,4-Д в почве штаммами-деструкторами галоген-органических соединений // Экобиотех, 2022, Т. 5 (4). С. 208-217. DOI: [10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217), EDN: QKNUQM

Cited as

Khudaigulov G.G., Starikov S.N., Stolyarova E.A., Loginova E.V., Chetverikov S.P. Evaluation of the biodegradation of 2,4-D in soil by strains-destructors of organohalogen compounds. *Ekobiotek.* V. 5 (4). P. 208-217. DOI: [10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217](https://doi.org/10.31163/2618-964X-2022-5-4-208-217), EDN: QKNUQM (In Rus.)