



**ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБНОСТИ ШТАММА *PSEUDOMONAS SP. ОВА 2.4.1*
ИСПОЛЬЗОВАТЬ ГЛИФОСАТ В КАЧЕСТВЕ ИСТОЧНИКА УГЛЕРОДА**

*Хакимова Л.Р.^{1,2,3}, Чубукова О.В.^{1,2}, Бигалеева А.Ш.^{1,2}, Симороз Е.В.⁴,
Карпухин А.А.², Кусова М.С.², Вершинина З.Р.^{1,2}

¹Институт биохимии и генетики – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Россия, 450054, Уфа, пр. Октября 71, лит. 1Е

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», кафедра «Школа молекулярных технологий», Россия, 450064, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Башкирский государственный медицинский университет Минздрава России, Россия, 450000, Уфа, ул. Ленина, 3

⁴Федеральная территория «Сириус», Россия, 354349, Краснодарский край, пгт «Сириус», ул. Таврическая д. 5, а/я 69

*E-mail: lili-nigmatullina@bk.ru

Резюме

Глифосат является неселективным системным гербицидом с широким спектром действия для борьбы с сорняками, который ингибирует ключевой фермент, 5-енолпирувилшкимат-3-фосфат-синтазу (EPSP), в шикиматном пути. Наиболее перспективной и экологичной стратегией удаления таких гербицидов из окружающей среды является микробная деградация. Показано, что некоторые бактерии могут превращать пестициды в биохимические строительные блоки, необходимые для цикла Кребса и гликолиза. К таким бактериям относятся *Pseudomonas* spp.; они хорошо адаптированы к стрессовым условиям среды. Псевдомонады могут быть использованы как биоинокулянты почв, загрязненных тяжелыми металлами, гербицидами и другими ксенобиотиками, что представляет собой биологическую альтернативу для повышения эффективности биоремедиации. Целью данной работы было исследование способности ростостимулирующего штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 использовать глифосат в качестве единственного источника углерода для своего роста. В нашем исследовании показано, что максимальная ингибирующая концентрация глифосата для исследуемого штамма равна 10.0 мг/мл в твердой питательной среде. Анализ роста *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 с использованием жидкой минеральной среды Дворкина-Фостера с разными источниками углерода показал хороший рост только в стандартной среде с глюкозой в качестве источника углерода. Активность роста штамма при наличии в питательной среде глифосата в сочетании с глюкозой уменьшалась практически в 2 раза. Полная замена глюкозы на глифосат приводило к еще более существенному снижению оптической плотности бактериальной суспензии. Таким образом, показано, что *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 практически не способен использовать глифосат как единственный источник углерода для своего метаболизма.

Ключевые слова: *Pseudomonas* sp., глифосат, биоремедиация, источник углерода, метаболизм.

Цитирование: Хакимова Л.Р., Чубукова О.В., Бигалеева А.Ш., Симороз Е.В., Карпухин А.А., Кусова М.С., Вершинина З.Р. Исследование способности штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 использовать глифосат в качестве источника углерода // *Biomics*. 2024. V.16(4). С.335-341. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-22

© Авторы

STUDY OF THE ABILITY OF THE *PSEUDOMONAS* SP. OBA 2.4.1 STRAIN
TO USE GLYPHOSATE AS A CARBON SOURCE

*Khakimova L.R.^{1,2,3}, Chubukova O.V.^{1,2}, Bigaleeva A.Sh.^{1,2}, Simoroz E.V.⁴,
Karpukhin A.A.², Kusova M.S.², Vershinina Z.R.^{1,2}

¹Institute of Biochemistry and Genetics - Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Russia, 450054, Ufa, 71 Prospekt Oktyabrya, lit. 1E

²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ufa State Petroleum Technological University" (USPTU), Department of molecular technologies, Russia, 450064, Ufa, 1 Kosmonavtov st.

³Bashkir State Medical University (BSMU), 450008, Russia, Ufa, 3 Lenin st.

⁴Federal Territory «Sirius», Russia, 354349, Krasnodar Territory, urban-type settlement «Sirius», st. Tavricheskaya 5, P.O. Box 69

*E-mail: lili-nigmatullina@bk.ru

Resume

Glyphosate is a broad-spectrum, non-selective systemic herbicide for weed control that inhibits a key enzyme, 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSP), in the shikimate pathway. The most promising and environmentally friendly strategy for removing such herbicides from the environment is microbial degradation. Some bacteria have been shown to be able to convert pesticides into biochemical building blocks required for the Krebs cycle and glycolysis. Such bacteria include *Pseudomonas* spp., which are well adapted to stressful environmental conditions. *Pseudomonas* can be used as bioinoculants for soils contaminated with heavy metals, herbicides and other xenobiotics, which represents a biological alternative for increasing the efficiency of bioremediation. The aim of this work was to investigate the ability of the growth-promoting strain *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 to use glyphosate as the sole carbon source for its growth. Our study showed that the maximum inhibitory concentration of glyphosate for the studied strain is 10.0 mg/ml in a solid nutrient medium. Analysis of the growth of *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 using a liquid mineral Dworkin-Foster medium with different carbon sources showed good growth only in a standard medium with glucose as a carbon source. The growth activity of the strain in the presence of glyphosate in combination with glucose in the nutrient medium decreased almost 2 times. Complete replacement of glucose with glyphosate led to an even more significant decrease in the optical density of the bacterial suspension. Thus, it was shown that *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 is practically incapable of using glyphosate as the sole carbon source for its metabolism.

Key words: *Pseudomonas* sp., glyphosate, bioremediation, carbon source, metabolism.

Citation: Khakimova L.R., Chubukova O.V., Simoroz E.V., Karpushin A.A., Kusova M.S., Bigaleeva A.Sh., Vershinina Z.R. Study of the ability of the *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 strain to use glyphosate as a carbon source. *Biomics*. 2024. V.16(4). P.335-341. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2024-22 (In Russian)

© **The Authors**

Введение

В сельском хозяйстве гербициды широко используются для борьбы с сорняками, однако такое повсеместное применение может вызывать экологические проблемы [Thiour-Mauprivez et al., 2019]. Самым широко применяемым гербицидом в мире является глифосат. Глифосат — это синтетическое фосфонатное соединение, применение которого растет с каждым годом [Wang et al., 2019; Maggi et al., 2020; Tang et al., 2021], особенно при выращивании генетически модифицированных растений [Masotti et al., 2021]. Чрезмерное использование глифосата может привести к

нарушению в экосистемах, так как его остатки обнаруживают в воде, почве, воздухе и грунтовых водах, а также в продуктах питания [Zoller et al., 2018; Bocker et al., 2019]. Такой «остаточный эффект» может привести к торможению роста последующих сельскохозяйственных культур, загрязнению водных источников и гибели других организмов [Braga et al., 2016]. Также существуют данные о том, что глифосат воздействует на репродуктивную систему лабораторных крыс, вызывает нарушение в почвенной экосистеме и микробиоте кишечника млекопитающих, домашних птиц, рептилий, а также медоносных пчел [Aitbali et al., 2018; Kittle et al., 2018;

Способность штамма *Pseudomonas* sp. использовать глифосат

Blot et al., 2019; Kubsad et al., 2019; Zhang et al., 2021; Li et al., 2021].

В окружающей среде глифосат может восстанавливаться почвенными микроорганизмами, которые ускоряют его деградацию. Такая естественная биоремедиация считается высокоэффективной, недорогой и экологически чистой для восстановления загрязненных экосистем [Masotti et al., 2021]. Такие штаммы микроорганизмов имеют большой потенциал для широкого применения в мире. Показано, что бактерии могут разлагать глифосат на С, N и P, которые в дальнейшем могут быть использованы в качестве источников питания для роста бактерий [Yu et al., 2023]. У некоторых микроорганизмов, например, у *Agrobacterium tumefaciens* CHLDO обнаружен ген *phn*, отвечающий за метаболизм фосфоната, который активно экспрессируется в присутствии глифосата, что показывает его участие в деградации данного гербицида [Masotti et al., 2021]. Также существуют работы, где увеличивая экспрессию гена *agoA* *Pseudomonas putida* 4G-1, кодирующего ключевой фермент в пути биосинтеза ароматических аминокислот в микроорганизмах и растениях, увеличивали устойчивость микроорганизмов к глифосату [Sun et al., 2005; Ghaderitabar et al., 2020].

Устойчивые к стрессу бактерии с ростостимулирующим потенциалом могут оказывать благотворное влияние на урожайность растений, выращиваемых в неблагоприятных условиях. Целью данной работы было оценка способности штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 использовать глифосат в качестве единственного источника углерода для своего роста.

Материалы и методы

Максимальную ингибирующую концентрацию глифосата для исследуемого штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 определяли на твердой питательной среде LB (масс. % в водном растворе: бактотриптон – 1, дрожжевой экстракт – 0.5, NaCl – 0.5, агар – 1.5). Глифосат готовили из гербицида «Торнадо-500» (АО «Август», Россия), в качестве исходного раствора использовали 50 %-й стерильный разведенный препарат. Затем культуру клеток выращивали на чашках Петри с добавлением глифосата в конечных концентрациях 3.0, 6.0, 8.0, 10.0 мг/мл. После инкубации в термостате в течение 24 часов при 28°C рассматривали рост бактериальных клеток [Khakimova et al., 2024].

Способность штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 использовать глифосат в качестве единственного источника углерода для своего метаболизма исследовали в жидкой минеральной среде Дворкина-Фостера (г/л): глюкоза – 1.0 г/л, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0.375,

MgSO_4 – 0.075, CaCO_3 – 0.03, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.001, H_3BO_3 – 0.000001, MnSO_4 – 0.000001, NaH_2PO_4 – 6.0, K_2HPO_4 – 2.0, дрожжевой экстракт – 0.0053. При изучении глифосата в качестве источника углерода состав среды был немного изменен (г/л): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 0.375, MgSO_4 – 0,075, CaCO_3 – 0.03, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0.001, H_3BO_3 – 0.000001, MnSO_4 – 0.000001, NaH_2PO_4 – 6.0, K_2HPO_4 – 2.0 [Михайловская и др. (Mikhailovskaya et al.), 2022]. Стерильные растворы глифосата и 10 %-й раствор глюкозы готовили отдельно для использования в качестве источников углерода.

Схема эксперимента (добавки к среде Дворкина-Фостера без источника углерода):

I – глюкоза 0.1 %;

II – глифосат 3.0 мг/мл и 6.0 мг/мл;

III – глюкоза + глифосат 0.1 % + 3.0 мг/мл и 0.1 % + 6.0 мг/мл.

В I колбе выращивали бактерии в стандартной среде Дворкина-Фостера (без дрожжевого экстракта), в следующих вариантах опыта были добавлены стерильный раствор глифосата до конечной концентрации 3 мг/мл и 6 мг/мл (II), в остальные колбы вносили последовательно глюкозу и глифосат (III) и тщательно перемешивали. Колбы помещали в термостат с постоянным перемешиванием (90 об/мин) при 28°C.

Для исследования роста бактерий из каждой опытной колбы отбирали по 1 мл бактериальной суспензии с интервалами в 24 часа на протяжении 5 суток. Критерием активности роста псевдомонад служили показатели оптической плотности бактериальной суспензии ($\lambda = 590$ нм, кювета 10 мм, в качестве контроля – питательная среда). Изначально псевдомонады были взяты в концентрации 10^6 КОЕ/мл.

Статистическая обработка результатов. Эксперименты проводили в трех биологических и трех аналитических повторностях. Результаты обрабатывали с использованием пакета Microsoft Office Excel 2010. Представленные данные имеют соответствующие доверительные интервалы при уровне доверительной вероятности равной 0.95.

Результаты и обсуждение

Pseudomonas sp. ОВА 2.4.1 был выделен из ризосферы остролодочника башкирского (*Oxytropis bashkiriensis* Knjas.) и в результате исследования по гену 16S рPHK и *rpoD* показано его сходство с типовым штаммом *P. fluorescens* IAM 12022 T [Чубукова и др. (Chubukova et al.), 2022]. Также показаны положительная сидерофорная активность и ростостимулирующий эффект данного штамма на растения гороха посевного [Хакимова и др. (Khakimova et al.), 2022; Khakimova et al., 2023].

Способность штамма *Pseudomonas* sp. использовать глифосат

Микроорганизмы могут по-разному переносить негативное влияние различных соединений. Устойчивые к воздействию таких абиотических стрессов штаммы бактерий, обладающие ростостимулирующим действием, имеют

особую ценность. В нашем исследовании штамм *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 показал устойчивость к глифосату в концентрации до 8.0 мг/мл в среде, при 10.0 мг/мл – роста бактерий не наблюдалось (рис.1).

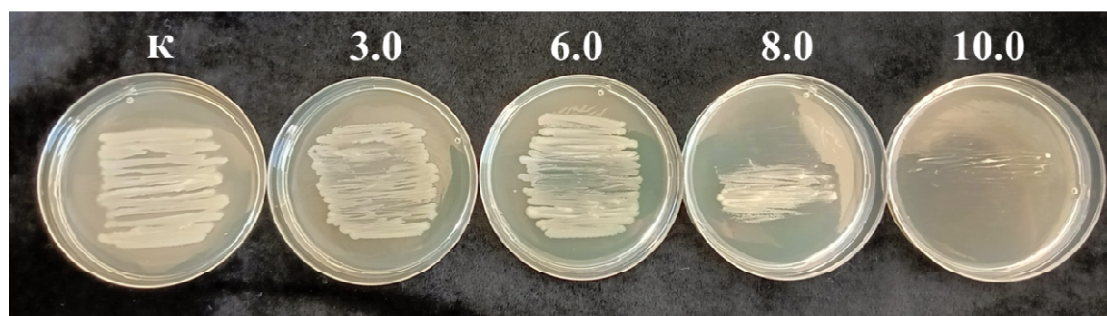


Рис. 1. Рост штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 на среде (к – контроль) и при стрессовом воздействии глифосата (концентрации в мг/мл)

Fig. 1. Growth of the *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 strain on the medium (k – control) and under the stress effect of glyphosate (concentrations in mg/ml)

В литературе описываются *Pseudomonas* spp. 548, у которого не ингибировался рост в присутствии глифосата [Rabelo et al., 2023]. Другие масштабные исследования показывают, что многократное введение глифосата в почву на протяжении нескольких лет подряд ведет к снижению численности псевдомонад в грунте [Lorch et al., 2021]. В целом эти результаты подтверждают мнение о том, что повторное применение глифосата оказывает отрицательное влияние на численность почвенных псевдомонад. Известен штамм *Pseudomonas* sp. QJX-1, способный расщеплять глифосат на нетоксичные продукты распада, такие как глицин, фосфат, $\text{NH}_3\text{-N}$ и $\text{NO}_3\text{-N}$, далее эти метаболиты используются в качестве источников энергии для роста бактерий [Yu et al., 2023]. Ввиду этого устойчивые к данному

пестициду *Pseudomonas* spp. особенно актуальны для поддержания равновесия определенной экосистемы.

Далее был проведен анализ роста штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 с использованием жидкой минеральной среды Дворкина-Фостера с разными источниками углерода. Для этого сравнивали активность роста бактериального штамма в жидких средах с глюкозой (I), с глифосатом (II) и с двумя источниками углерода – глюкозой и глифосатом (III). Экспериментальные данные показывают, что штамм *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 относительно хорошо рос в стандартной жидкой среде Дворкина-Фостера с глюкозой (I) в качестве источника углерода. При наличии в питательной среде глифосата титры бактерий, как правило, снижались. При замене стандартного источника углерода глифосатом бактерии практически не развивались (рис.2).

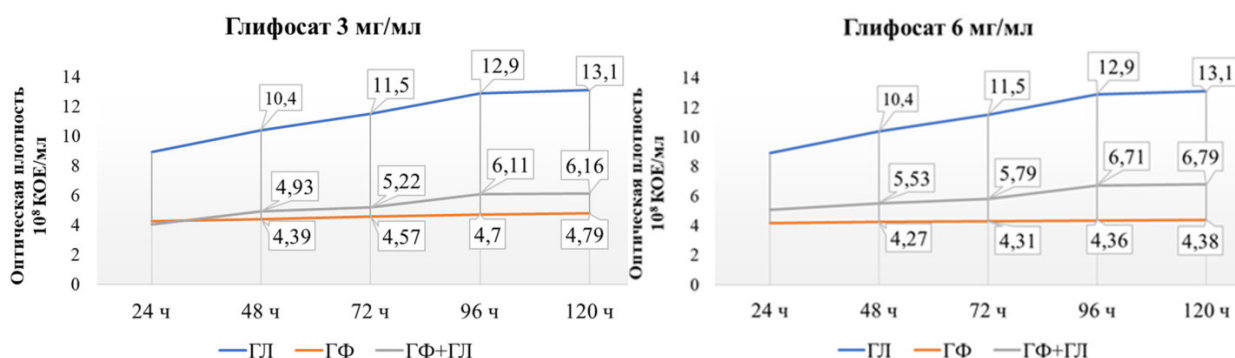


Рисунок 2. Рост штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 в зависимости от источника углерода

Figure 2. Growth of *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 strain depending on carbon source

Способность штамма *Pseudomonas* sp. использовать глифосат

По результатам экспериментов получены кривые роста, характеризующие зависимость плотности популяции микроорганизмов от источника углерода в жидкой питательной среде и длительности эксперимента. Показаны кривые роста *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 при двух концентрациях глифосата 3 и 6 мг/мл. Характер кривых роста наглядно показывает хороший рост только в стандартной жидкой среде Дворкина-Фостера с глюкозой в качестве источника углерода. Активность роста штамма при наличии в питательной среде глифосата в сочетании с глюкозой уменьшалась практически в 2 раза. Полная замена глюкозы на глифосат в жидкой питательной среде приводило к еще более существенному снижению оптической плотности бактериальной суспензии.

Таким образом, результаты скрининга позволяют заключить, что *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 практически не способен использовать глифосат как единственный источник углерода для своего метаболизма.

Заключение

В нашем исследовании ростостимулирующий штамм *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1, обладающий многими положительными активностями и устойчивый к глифосату до 8.0 мг/мл на твердой среде не показал устойчивый рост в жидкой питательной среде с глифосатом в качестве единственного источника углерода. Дальнейшие наши исследования будут направлены на поиск ризосферных PGPR псевдомонад, устойчивых к воздействию различных тяжелых металлов, гербицидов и других агрохимикатов, которые могут защищать растения от их токсического воздействия и стимулировать рост сельскохозяйственных культур даже при неблагоприятных условиях среды.

Работа была выполнена с привлечением приборного парка ЦКП «Биомика» (Отделение биохимических методов исследований и нанобиотехнологии РЦКП «Агидель») и УНУ «КОДИНК».

Литература

1. Михайловская Н.А., Барашенко Т.Б., Погирницкая Т.В., Дюсова С.В. Скрининг зональных изолятов *Pseudomonas* sp. по устойчивости к глифосату и его утилизации как источника углерода и фосфора // Почвоведение и агрохимия. 2022. №2. С. 35-48.
2. Хакимова Л.Р., Чубукова О.В., Мурясова А.Р., Вершинина З.Р. Влияние штамма *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 на растения гороха посевного (*Pisum sativum* L.) при ингибирующем действии солей кадмия // Биомика. 2022. V. 14(2). С. 101-110. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2022-7.
3. Чубукова О.В., Хакимова Л.Р., Акимова Е.С., Вершинина З.Р. Филогения и свойства новых штаммов *Pseudomonas* sp. из ризосферы бобовых растений Южного Урала // Микробиология. 2022. Т. 91(5). С. 537-546 doi: 10.31857/S0026365622100196
4. Aitbali Y., Ba-M'hamed S., Elhidar N., Nafis A., Soraa N., Bennis M. Glyphosate based- herbicide exposure affects gut microbiota, anxiety and depression-like behaviors in mice // Neurotoxicol. Teratol. 2018. V. 67. P. 44-49. doi: 10.1016/j.ntt.2018.04.002
5. Blot N., Veillat L., Rouz, R., Delatte H. Glyphosate, but not its metabolite AMPA, alters the honeybee gut microbiota // PLoS One. 2019. V. 14(4). e0215466. doi: 10.1371/journal.pone.0215466
6. Bocker T., Mohring N., Finger R. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production // Agric Syst. 2019. V. 173. P. 378-392. doi: 10.1016/j.agsy.2019.03.001
7. Braga R.R., Santos J.B., Zanuncio J.C., Bibiano C.S., Ferreira E.A., Oliveira M.C., Silva D.V., Serrão J.E. Effect of growing *Brachiria brizanta* on phytoremediation of picloram under different pH environments // Ecol. Eng. 2016. V. 94. P. 102-106. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.050
8. Ghaderitabar H., Mousavi A., Hatef Salmanian A., Hadi F. Novel aroA of Glyphosate-Tolerant Bacterium *Pseudomonas* sp. Strain HA-09 Isolated from Roundup-Contaminated Garden Soils in Iran // Iran J Biotechnol. 2020. V. 18(3). e2597. doi: 10.30498/IJB.2020.204133.2597
9. Khakimova L., Chubukova O., Vershinina Z., Maslennikova D. Effects of *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4. 1 on Growth and Tolerance to Cadmium Stress in *Pisum sativum* L. // BioTech. 2023. V. 12(1). 5. doi: 10.3390/biotech12010005
10. Khakimova L.R., Chubukova O.V., Vershinina Z.R. Use of the *Pseudomonas* sp. ОВА 2.4.1 Strain for presowing treatment of pea seeds (*Pisum Sativum* L.) in the presence of heavy metals and glyphosate // Applied Biochemistry and Microbiology. 2024. V. 60(4). P. 722-729. doi: 10.1134/S0003683824604414
11. Kittle R.P., McDerimid K.J., Muehlstein L., Balazs G.H. Effects of glyphosate herbicide on the gastrointestinal microflora of Hawaiian green turtles (*Chelonia mydas*) Linnaeus // Mar. Pollut. Bull. 2018. V. 127. P. 170-174. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.030
12. Kubsad D., Nilsson E.E., King S.E., Sadler-Riggelman I., Beck D., Skinner M.K. Assessment of glyphosate induced epigenetic transgenerational inheritance of pathologies and sperm epimutations: generational toxicology // Sci. Rep. 2019. V. 9(1). P. 6372. doi: 10.1038/s41598-019-42860-0
13. Li J., Chen W. J., Zhang W., Zhang Y., Lei Q., Wu S., Huang Y., Mishra S., Bhatt P., Chen S. Effects of free or immobilized bacterium *Stenotrophomonas acidaminiphila*

Способность штамма *Pseudomonas* sp. использовать глифосат

- Y4B on glyphosate degradation performance and indigenous microbial community structure // *J. Agric. Food Chem.* 2022. V. 70(43). P. 13945-13958. doi: 10.1021/acs.jafc.2c05612
14. Lorch M., Agaras B., García-Parisi P., Druille M., Omacini M., Valverde C. Repeated annual application of glyphosate reduces the abundance and alters the community structure of soil culturable pseudomonads in a temperate grassland // *Agriculture, Ecosystems & Environment.* 2021. V. 319. P. 107503. doi: 10.1016/j.agee.2021.107503
15. Maggi F., la Cecilia D., Tang F.H.M., McBratney A. The global environmental hazard of glyphosate use // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 717. P. 137167. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137167
16. Masotti F., Garavaglia B.S., Piazza A., Burdisso P., Altabe S., Gottig N., Ottado J. Bacterial isolates from Argentine Pampas and their ability to degrade glyphosate // *Sci Total Environ.* 2021. V. 774. P. 145761. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145761
17. Rabelo J.S., Dos Santos E.A., de Melo E.I., Vaz M. G.M. V., de Oliveira Mendes G. Tolerance of microorganisms to residual herbicides found in eucalyptus plantations // *Chemosphere.* 2023. V. 329. 138630. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138630
18. Sun Y.C., Chen Y.C., Tian Z.X., Li F.M., Wang X.Y., Zhang J., Xiao Z.L., Lin M., Gilmartin N., Dowling D.N., Wang Y.P. Novel AroA with high tolerance to glyphosate, encoded by a gene of *Pseudomonas putida* 4G-1 isolated from an extremely polluted environment in China // *Appl Environ Microbiol.* 2005. V. 71(8). P. 4771-4776. doi: 10.1128/AEM.71.8.4771-4776.2005
19. Tang F.H.M., Lenzen M., McBratney A., Maggi F. Risk of pesticide pollution at the global scale // *Nat. Geosci.* 2021. V. 14. P. 206-210. doi: 10.1038/s41561-021-00712-5
20. Thiour-Mauprivez C., Martin-Laurent F., Calvayrac C., Barthelmebs L. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers? // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 684. P. 314-325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.230
21. Wang L., Deng Q., Hu H., Liu M., Gong Z., Zhang S., Xu-Monette Z.Y., Lu Z., Young K.H., Ma X., Li Y. Glyphosate induces benign monoclonal gammopathy and promotes multiple myeloma progression in mice // *J. Hematol. Oncol.* 2019. V. 12(70). P. 1-11. doi: 10.1186/s13045-019-0767-9
22. Yu J., Jin B., Ji Q., Wang H. Detoxification and metabolism of glyphosate by a *Pseudomonas* sp. via biogenic manganese oxidation // *J Hazard Mater.* 2023. V. 448. P. 130902. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.130902
23. Zhang F., Qiao Z., Yao C., Sun S., Liu W., Wang J. Effects of the novel HPPD-inhibitor herbicide QYM201 on enzyme activity and microorganisms, and its degradation in soil // *Ecotoxicology.* 2021. V. 30. P. 80-90. doi: 10.1007/s10646-020-02302-4
24. Zoller O., Rhyn P., Rupp H., Zarn J. A., Geiser C. Glyphosate residues in Swiss market foods: monitoring and risk evaluation // *Food Addit. Contam. Part B.* 2018. V. 11(2). P. 83-91. doi: 10.1080/19393210.2017.1419509

References

1. Aitbali Y., Ba-M'hamed S., Elhidar N., Nafis A., Soraa N., Bennis M. Glyphosate based- herbicide exposure affects gut microbiota, anxiety and depression-like behaviors in mice. *Neurotoxicol. Teratol.* 2018. V. 67. P. 44-49. doi: 10.1016/j.ntt.2018.04.002
2. Blot N., Veillat L., Rouz, R., Delatte H. Glyphosate, but not its metabolite AMPA, alters the honeybee gut microbiota. *PLoS One.* 2019. V. 14(4). e0215466. doi: 10.1371/journal.pone.0215466
3. Bocker T., Mohring N., Finger R. Herbicide free agriculture? A bio-economic modelling application to Swiss wheat production. *Agric Syst.* 2019. V. 173. P. 378-392. doi: 10.1016/j.agsy.2019.03.001
4. Braga R.R., Santos J.B., Zanuncio J.C., Bibiano C.S., Ferreira E.A., Oliveira M.C., Silva D.V., Serrão J.E. Effect of growing *Brachiria brizanta* on phytoremediation of picloram under different pH environments. *Ecol. Eng.* 2016. V. 94. P. 102-106. doi: 10.1016/j.ecoleng.2016.05.050
5. Chubukova O.V., Khakimova L.R., Akimova E.S., Vershinina Z.R. Filogeniya i svojstva novyh shtammov *Pseudomonas* sp. iz rizosfery bobovyh rastenij Yuzhnogo Urala. *Mikrobiologiya.* 2022. V. 91(5). P. 537-546. doi: 10.31857/S0026365622100196 [Phylogeny and properties of new strains of *Pseudomonas* sp. from the rhizosphere of leguminous plants of the Southern Urals] (In Russian)
6. Ghaderitabar H., Mousavi A., Hatef Salmanian A., Hadi F. Novel aroA of Glyphosate-Tolerant Bacterium *Pseudomonas* sp. Strain HA-09 Isolated from Roundup-Contaminated Garden Soils in Iran. *Iran J Biotechnol.* 2020. V. 18(3). e2597. doi: 10.30498/IJB.2020.204133.2597
7. Khakimova L., Chubukova O., Vershinina Z., Maslennikova D. // Effects of *Pseudomonas* sp. OBA 2.4. 1 on Growth and Tolerance to Cadmium Stress in *Pisum sativum* L. *BioTech.* 2023. V. 12. 5. doi: 10.3390/biotech12010005
8. Khakimova L.R., Chubukova O.V., Muryasova A.R., Vershinina Z.R. Vliyaniye shtamma *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 na rasteniya gorokha posevnogo (*Pisum sativum* L.) pri ingibiruyushchem deystvii soley kadmiya. *Biomics.* 2022. V. 14(2). P. 101-110. doi: 10.31301/2221-6197.bmcs.2022-7 [Effect of *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 strain on pea plants (*Pisum sativum* L.) under the inhibitory action of cadmium salts] (In Russian)

Способность штамма *Pseudomonas* sp. использовать глифосат

9. Khakimova L.R., Chubukova O.V., Vershinina Z.R. Use of the *Pseudomonas* sp. OBA 2.4.1 Strain for Presowing Treatment of Pea Seeds (*Pisum Sativum* L.) in the Presence of Heavy Metals and Glyphosate. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2024. V. 60(4). P. 722-729. doi: 10.1134/S0003683824604414
10. Kittle R.P., McDermid K.J., Muehlstein L., Balazs G.H. Effects of glyphosate herbicide on the gastrointestinal microflora of Hawaiian green turtles (*Chelonia mydas*) Linnaeus. *Mar. Pollut. Bull.* 2018. V. 127. P. 170-174. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.030
11. Kubsad D., Nilsson E.E., King S.E., Sadler-Riggelman I., Beck D., Skinner M.K. Assessment of glyphosate induced epigenetic transgenerational inheritance of pathologies and sperm epimutations: generational toxicology. *Sci. Rep.* 2019. V. 9(1). 6372. doi: 10.1038/s41598-019-42860-0
12. Li J., Chen W. J., Zhang W., Zhang Y., Lei Q., Wu S., Huang Y., Mishra S., Bhatt P., Chen S. Effects of free or immobilized bacterium *Stenotrophomonas acidaminiphila* Y4B on glyphosate degradation performance and indigenous microbial community structure. *J. Agric. Food Chem.* 2022. V. 70(43). P. 13945-13958. doi: 10.1021/acs.jafc.2c05612
13. Lorch M., Agaras B., García-Parisi P., Druille M., Omacini M., Valverde C. Repeated annual application of glyphosate reduces the abundance and alters the community structure of soil culturable pseudomonads in a temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2021. V. 319. P. 107503. doi: 10.1016/j.agee.2021.107503
14. Maggi F., la Cecilia D., Tang F.H.M., McBratney A. The global environmental hazard of glyphosate use. *Sci. Total Environ.* 2020. V. 717. P. 137167. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137167
15. Masotti F., Garavaglia B.S., Piazza A., Burdisso P., Altabe S., Gottig N., Ottado J. Bacterial isolates from Argentine Pampas and their ability to degrade glyphosate. *Sci Total Environ.* 2021. V. 774. P. 145761. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145761
16. Mikhailovskaya N.A., Barashenko T.B., Pogiritskaya T.V., Dyusova S.V. Skrining zonal'nykh izolyatov *Pseudomonas* sp. po ustoychivosti k glifosatu i yego utilizatsii kak istochnika ugleroda i fosfora. *Soil science and agrochemistry*. 2022. No 2. P. 35-48. [Screening of zonal isolates of *Pseudomonas* sp. for resistance to glyphosate and its utilization as a source of carbon and phosphorus] (In Russian)
17. Rabelo J.S., Dos Santos E.A., de Melo E.I., Vaz M. G.M. V., de Oliveira Mendes G. Tolerance of microorganisms to residual herbicides found in eucalyptus plantations. *Chemosphere*. 2023. V. 329. P. 138630. doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.138630
18. Sun Y.C., Chen Y.C., Tian Z.X., Li F.M., Wang X.Y., Zhang J., Xiao Z.L., Lin M., Gilmartin N., Dowling D.N., Wang Y.P. Novel AroA with high tolerance to glyphosate, encoded by a gene of *Pseudomonas putida* 4G-1 isolated from an extremely polluted environment in China. *Appl Environ Microbiol.* 2005. V. 71(8). P. 4771-4776. doi: 10.1128/AEM.71.8.4771-4776.2005
19. Tang F.H.M., Lenzen M., McBratney A., Maggi F. Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nat. Geosci.* 2021. V. 14. P. 206-210. doi: 10.1038/s41561-021-00712-5
20. Thiour-Mauprivez C., Martin-Laurent F., Calvayrac C., Barthelmebs L. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers? *Sci. Total Environ.* 2019. V. 684. P. 314-325. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.230
21. Wang L., Deng Q., Hu H., Liu M., Gong Z., Zhang S., Xu-Monette Z.Y., Lu Z., Young K.H., Ma X., Li Y. Glyphosate induces benign monoclonal gammopathy and promotes multiple myeloma progression in mice. *J. Hematol. Oncol.* 2019. V. 12. № 70. P. 1-11. doi: 10.1186/s13045-019-0767-9
22. Yu J., Jin B., Ji Q., Wang H. Detoxification and metabolism of glyphosate by a *Pseudomonas* sp. via biogenic manganese oxidation. *J Hazard Mater.* 2023. V. 448. 130902. doi: 10.1016/j.jhazmat.2023.130902
23. Zhang F., Qiao Z., Yao C., Sun S., Liu W., Wang J. Effects of the novel HPPD-inhibitor herbicide QYM201 on enzyme activity and microorganisms, and its degradation in soil. *Ecotoxicology*. 2021. V. 30. P. 80-90. doi: 10.1007/s10646-020-02302-4
24. Zoller O., Rhyn P., Rupp, H., Zarn J. A., Geiser C. Glyphosate residues in Swiss market foods: monitoring and risk evaluation. *Food Addit. Contam. Part B.* 2018. V. 11(2). P. 83-91. doi: 10.1080/19393210.2017.1419509