

АГРАРНЫЕ НАУКИ**AGRARIAN SCIENCES**

УДК 632.15:579.64

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Поступило в редакцию 10.01.2025

Received 10.01.2025

Академик В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. В. Погирницкая*Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь***СПОСОБНОСТЬ КАЛИЙМОБИЛИЗУЮЩИХ БАКТЕРИЙ *BACILLUS*
МЕТАБОЛИЗИРОВАТЬ ГЕРБИЦИД ГЛИФОСАТ
С ОБРАЗОВАНИЕМ МЕТИЛГЛИЦИНА**

Аннотация. Установлена перспективность ризосферных калиймобилизующих бактерий *Bacillus* (исследовательская коллекция Института почвоведения и агрохимии) в качестве инокулянтов в условиях интенсивного применения гербицида глифосат. Показано, что штаммы *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт способны разлагать глифосат с образованием саркозина (метилглицина) и неорганического фосфата, обеспечивая безопасную детоксикацию гербицида. Определена деструктивная активность калиймобилизующих ризобактерий *in vitro*. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт составляет 50,6, 43,9, 48,4, 46,3, 65,4 и 64,4 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность штаммов – 40,6, 38,6, 40,1, 42,2, 58,4 и 48,1 % соответственно. Применение глифосат-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* оказывает полифункциональное воздействие на растения в широком диапазоне содержания глифосата в почве (0–50 л/га), что проявляется в стимуляции роста и развития корневой системы, улучшении калийного питания инокулированных растений за счет мобилизации калия из калийсодержащих почвенных минералов.

Ключевые слова: *Bacillus*, глифосат, катаболизм, детоксикация, биологическая мобилизация калия

Для цитирования. Лапа, В. В. Способность калиймобилизующих бактерий *Bacillus* метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. В. Погирницкая // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 3. – С. 258–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Academician Vitaly V. Lapa, Natallia A. Mikhailovskaya, Tatsiana V. Pahirnitckaya*Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***RHIZOSPHERE K-MOBILIZING BACTERIA *BACILLUS* CAPABILITY OF GLYPHOSATE
METABOLIZATION WITH METHYLGLYCYN FORMATION**

Abstract. Rhizosphere bacteria *Bacillus*, preserved in the of the Institute for Soil Science and Agrochemistry, were characterized as promising plant inoculants under intensive application of herbicide glyphosate. Bacteria strains *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81, and Kt were found to metabolize glyphosate without the formation of aminomethylphosphonic acid. Bacteria strains *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81 and Kt are capable of glyphosate decomposition with the formation of safe chemical products. These chemical products include sarcosin (methylglycine) and inorganic phosphate (Pi). The destruction activities of *Bacillus* strains were calculated on the basis of the accumulation of inorganic phosphate in culture liquids. Under glyphosate concentration of 300 mg/l, the destruction activities of *Bacillus* K-32, K-54, K-62, K-65, K-81, and Kt strains were equal to: 50.6, 43.9, 48.4, 46.3, 65.4 and 64.4 %, respectively. Under glyphosate content 500 mg/l, the destruction activities were equal to: 40.6, 38.6, 40.1, 42.2, 58.4 and 48.1 % respectively. The application of potassium-mobilizing rhizobacteria *Bacillus* as inoculants resulted in a significant stimulation effect on plants at high diapason of glyphosate content in the soil (0–50 l/ha). This stimulation effect is manifested in plant growth (stems and roots) and the improvement of plant potassium nutrition.

Keywords: *Bacillus*, glyphosate, catabolism, detoxification, potassium mobilization

For citation. Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Pahirnitskaya T. V. Rhizosphere K-mobilizing bacteria *Bacillus* capability of glyphosate metabolization with methylglycyn formation. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 3, pp. 258–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-3-258-264>

Введение. Глифосат (ГФ) занимает лидирующее место в мире по производству и является самым интенсивно используемым гербицидом в истории химизации сельского хозяйства [1–4]. Глифосат ($C_3H_8NO_5P$) представляет собой производное фосфоновой кислоты [5]. Впервые глифосат (N-фосфометилглицин) был синтезирован в Швейцарии в 1950 г. и использовался как хелатирующий агент для связывания и удаления металлов из растворов. Гербицидные свойства глифосата были обнаружены в 1970 г., а его промышленное производство под коммерческим названием Раундап началось в США в 1974 г.

Интенсивное применение глифосата, связанное с его эффективностью, невысокой стоимостью и созданием устойчивых к гербициду сортов сельскохозяйственных культур, привело к практически повсеместному обнаружению остаточных количеств ГФ и его основного метаболита, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде и продукции растениеводства [1–3].

Установлен широкий спектр негативных воздействий глифосата и АМФК на живые организмы. Глифосат и его метаболит АМФК оказывают цитотоксическое действие на клетки человека, вызывая их апоптоз [3]. Известно негативное действие на репродуктивное здоровье человека, глифосат приводит к гибели эмбриональных и плацентарных клеток [3; 4]. Действие глифосата вызывает эндокринные нарушения у человека [3], отмечается негативное действие на эритроциты крови [4]. В тканях человека и животных обнаруживаются остатки глифосата [4]. Это вызывает необходимость детоксикации ГФ и АМФК в окружающей среде [1; 3; 6].

Для снижения негативных последствий многократного применения глифосата необходима периодическая ремедиация. По современным представлениям микробные методы разложения ГФ и АМФК считаются самыми эффективными, так как могут обеспечить разложение глифосата и АМФК до экологически безопасных соединений [1; 4–6]. Активными деструкторами гербицида являются бактерии. Применение бактерий-деструкторов, способных разлагать глифосат до безопасных химических продуктов, обосновано с экологических и экономических позиций.

Безопасная детоксикация глифосата предполагает применение бактериальных деструкторов, использующих глифосат как источник фосфора, при этом фосфоновая С–Р связь в молекуле гербицида разрушается с образованием неорганического фосфата. Такие бактериальные деструкторы имеют активные С–Р лиазные ферментные системы [1; 5; 6]. В пределах одного рода бактерий только отдельные штаммы имеют активные С–Р лиазы и способны обеспечивать детоксикацию ГФ.

Наиболее перспективен поиск деструкторов глифосата среди ризосферных бактерий, предназначенных для применения в качестве инокулянтов. В Институте почвоведения и агрохимии имеется коллекция слизиобразующих *Bacillus*, которые широко распространены в зоне умеренного климата и представляют большой интерес как инокулянты. В состав микробных слизей входят полисахариды и уроновые кислоты, содержащие карбоксильные и фенольные группы, способные образовывать комплексные связи с химическими элементами в составе минералов. Действие микробных слизей приводит к их постепенному высвобождению из кристаллической решетки и переходу в растворимое состояние [7; 8]. Образование слизи является также важным защитным фактором, обеспечивающим выживание бактерий при неблагоприятных экологических условиях.

Наши многолетние исследования с коллекционными штаммами *Bacillus* показали, что их применение в качестве инокулянтов индуцирует существенный гормональный эффект и улучшает калийное питание в ризосфере за счет мобилизации калия из почвенных минералов, слюд и гидрослюд [7; 8], повышает доступность трехзамещенных фосфатов [9] и обеспечивает биологический контроль корневых фитопатогенов [10]. Совокупное действие указанных факторов способствует повышению урожайности и качества растениеводческой продукции [7; 8; 11].

В результате скрининга коллекционного фонда *Bacillus* установлено, что ряд штаммов калиймобилизующих ризобактерий проявляют значимую активность в отношении деструкции глифосата [12]. Это подтверждает полифункциональность *Bacillus* и расширяет область их практического применения.

Цель исследований – изучение способности слизиобразующих бактерий *Bacillus* исследовательской коллекции метаболизировать гербицид глифосат с образованием метилглицина (саркозина).

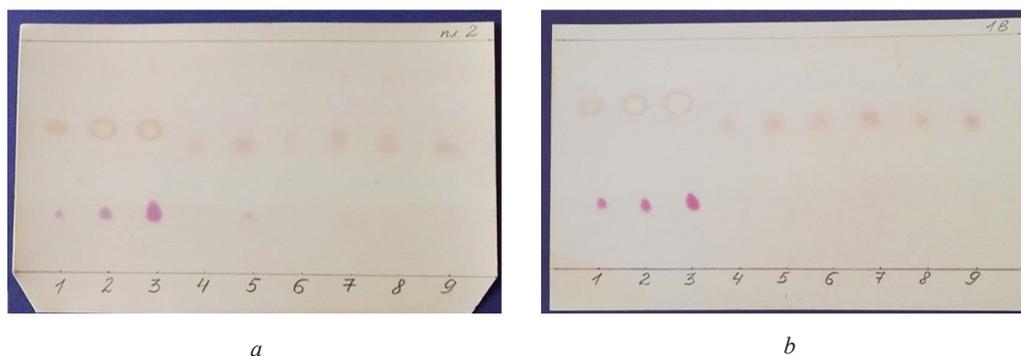
Материалы и методы исследований. Для изучения продуктов катаболизма глифосата проведены модельные эксперименты по культивированию ризобактерий *Bacillus* с глифосатом как единственным источником фосфора. В колбы Эрленмейера (объем 250 мл) со 100 мл жидкой минеральной среды Дворкина–Фостера [12] вносили 600 (C₁) или 1000 (C₂) мкл гербицида Торнадо и по 2 мл инокулянта. Инкубация проводилась в термостате 7 суток при 28 °С при постоянном перемешивании (шейкер орбитальный KS-501 digital IKA WERKE, 80 об/мин). Инкубационную смесь центрифугировали (10 мин, 5000 об/мин), затем фильтровали через мембранный фильтр (0,2 мкм) для получения бесклеточной культуральной жидкости (КЖ).

Анализ и идентификацию продуктов катаболизма глифосата в бесклеточной культуральной жидкости *Bacillus* проводили методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) [13; 14]. Использовали хроматографические пластины Сорбфил ПТСХ-АФ-Ф-УФ (Россия). Система растворителей: изопропанол : 5 %-ный водный NH₄OH в соотношении 1 : 1 (V / V). Хроматография восходящим способом. После разделения КЖ на индивидуальные компоненты, пластины высушивали. Для обнаружения аминов (глифосат и глицин) полученные хроматограммы обрабатывали раствором нингидрина в ацетоне (0,25 %) и нагревали в течение 1–2 мин при 80 °С. В присутствии аминов на пластине проявляются окрашенные пятна, соответствующие индивидуальным веществам: розово-фиолетовые пятна глифосата и оранжево-бурые пятна глицина [13; 14]. Сначала на хроматограмме проявляются первичные амины, глицин и аминометилфосоновая кислота, позднее по времени проявляются вторичные амины, глифосат и саркозин.

Деструктивную активность *Bacillus* оценивали по накоплению неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ. Концентрацию Pi определяли колориметрическим методом по J. P. Murphy, J. P. Riley [15]. В мерные колбы (объем 50 мл) отбирали по 2 мл КЖ, доводили до метки дистиллированной водой. В пробирки отбирали по 5 мл разбавленной КЖ, приливали 1 мл окрашивающего раствора и выдерживали 10 мин при комнатной температуре для развития окраски. Оптическую плотность (OD₇₁₀) измеряли на спектрофотометре Metertech UV-VISSP 8001. В присутствии неорганического фосфата раствор окрашивается в голубой цвет с фиолетовым оттенком. По количеству накопившегося за время инкубации Pi в культуральной жидкости рассчитывали деструктивную активность ризобактерий.

Результаты и их обсуждение. Необходимо отметить сложность проблемы идентификации глифосата в смесях, которая обусловлена его химическими свойствами. Молекула глифосата содержит фрагмент фосфоновой кислоты, фрагмент карбоновой кислоты и аминокгруппу. Глифосат проявляет свойства трех классов химических соединений, что усложняет его идентификацию. В молекулах глифосата и АМФК отсутствуют хромофоры, поэтому невозможно использование спектральных методов для определения этих веществ в видимой части спектра. В настоящее время основными методами идентификации глифосата являются хроматография (жидкостная, газовая, ионная), сочетание хроматографии с масс-спектрометрией и тонкослойная хроматография. В наших исследованиях использован метод ТСХ.

Хроматография в тонком слое сорбента является доказательным экспресс-методом разделения и идентификации малых количеств органических соединений и широко используется, в том числе для идентификации продуктов катаболизма глифосата в культуральной жидкости ГФ-утилизирующих ризобактерий [13; 14]. Основным критерием в методе ТСХ является коэффициент хроматографической подвижности *R_f*. Для идентификации индивидуальных веществ используют стандарты, коэффициент хроматографической подвижности которых известен.



ТСХ-хроматограммы бесклеточной КЖ штаммов *Bacillus* после 4 недель инкубации в жидкой среде с ГФ (источник фосфора): а) 1–3: глицин + глифосат; 4 и 5 – *Bacillus* К-32; 6 и 7 – *Bacillus* К-54; 8 и 9 – *Bacillus* К-62; б) 1–3: глицин + глифосат; 4 и 5 – *Bacillus* К-65; 6 и 7 – *Bacillus* К-81; 8 и 9 – *Bacillus* Кт

TLC-chromatograms of cell-free culture liquids of *Bacillus* after incubation in liquid medium with glyphosate (phosphorus source) during 4 weeks: а) 1–3: glycine + glyphosate; 4 and 5 – *Bacillus* К-32; 6 and 7 – *Bacillus* К-54; 8 and 9 – *Bacillus* К-62; б) 1–3: glycine + glyphosate; 4 and 5 – *Bacillus* К-65; 6 and 7 – *Bacillus* К-81; 8 and 9 – *Bacillus* Кт

Т а б л и ц а 1. Хроматографическая подвижность (R_f) продуктов катаболизма глифосата (изопропанол : 5 %-ный водный NH_4OH (1 : 1, V / V))

Table 1. Chromatographic motility (R_f) of glyphosate catabolism products (isopropanol : 5 % water NH_4OH (1 : 1, V / V))

Продукт катаболизма Product of catabolism	R_f
Глицин	$0,64 \pm 0,025$
Саркозин	$0,54 \pm 0,022$
Глифосат	$0,33 \pm 0,010$
АМФК	$0,25 \pm 0,010$

Получены хроматограммы бесклеточной культуральной жидкости калиймобилизирующих ризобактерий *Bacillus* К-32, К-54 и К-62 после трех недель инкубации при содержании ГФ в среде 1,0 и 2,0 мг ГФ/мл. Анализ ТСХ-хроматограмм свидетельствует, что протестированные штаммы нашей коллекции разлагают глифосат, в культуральной жидкости он практически отсутствует. На ТСХ-хроматограмме регистрируется новое вещество с более высокой хроматографической подвижностью, R_f которого соответствует саркозину (метилглицину) (рисунок, а; табл. 1).

Анализ хроматограмм бесклеточных КЖ штаммов *Bacillus* К-65, К-81 и Кт показал, что их культивирование в жидкой среде с глифосатом (1,0 и 2,0 мг ГФ/мл) как источником фосфора приводит к разложению гербицида. При этом продуктом катаболизма глифосата является безопасный саркозин (метилглицин) ($R_f = 0,54 \pm 0,022$). Аминометилфосфоновая кислота ($R_f = 0,25 \pm 0,01$) среди продуктов катаболизма не обнаружена (рисунок, б; табл. 1).

Это означает, что отобранные в результате скрининга шесть штаммов *Bacillus* разлагают глифосат по безопасному пути, без образования аминометилфосфоновой кислоты. Полученные данные указывают на разрыв фосфоновой связи в молекуле глифосата под действием калиймобилизирующих бацилл и предполагают наличие С–Р лиазной активности у коллекционных штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт.

В настоящее время обсуждаются два основных пути микробной деградации глифосата в почве. При разрыве фосфоновой С–Р связи в молекуле глифосата продуктами его разложения являются саркозин (метилглицин) и неорганический фосфат [1; 4–6]. По второму пути при разрыве связи С–N продуктами разложения являются аминометилфосфоновая кислота (в которой сохраняется фосфоновая связь) и гликосилат [1; 4; 6].

При деструкции глифосата по фосфоновой С–Р связи в культуральной жидкости бактерий регистрируется неорганический фосфор (Pi), по накоплению которого можно количественно оценить деструктивную активность штаммов *Bacillus* [5; 6]. Для определения деструктивной активности ризобактерий по накоплению неорганического фосфата (Pi) проведены *in vitro* эксперименты с культивированием калиймобилизующих бактерий в жидкой среде Дворкина–Фостера [12] с разным содержанием глифосата в качестве источника фосфора: С₁ – 300 мг ГФ/л и С₂ – 500 мг ГФ/л. По истечении 7 суток в бесклеточной КЖ определяли содержание неорганического фосфата колориметрическим методом J. P. Murphy, J. P. Riley [15]. На основании количественных данных по содержанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ *Bacillus* с учетом химического состава глифосата (изопропиламинная соль С₃Н₈NO₅P) рассчитаны показатели деструктивной активности штаммов слизеобразующих бацилл.

При концентрации глифосата 300 мг/л наиболее высокая деструктивная активность отмечена у штаммов *Bacillus* К-81 и Кт – в пределах 64,4–65,4 %. Деструктивная активность штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62 и К-65 составила 43,9–50,6 % соответственно (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Деструктивная активность ГФ-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* при исходной концентрации глифосата 300 мг/л

T a b l e 2. Destructive activity of glyphosate-utilizing bacteria *Bacillus* under initial glyphosate concentration 300 mg/l

Показатель Index	<i>Bacillus</i> К-32	<i>Bacillus</i> К-54	<i>Bacillus</i> К-62	<i>Bacillus</i> К-65	<i>Bacillus</i> К-81	<i>Bacillus</i> Кт
Накопление (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л (PO ₄ ⁻³)	21,2	18,4	20,3	19,4	27,4	27,0
Разложилось глифосата, мг/л	151,7	131,7	145,3	138,8	196,1	193,2
Деструктивная активность, %	50,6	43,9	48,4	46,3	65,4	64,4

При концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность *Bacillus* К-81 и Кт – в пределах 48,1–58,4 %. Деструктивная активность штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62 и К-65 составила 38,6–42,2 % соответственно (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Деструктивная активность ГФ-утилизирующих ризобактерий *Bacillus* при исходной концентрации глифосата 500 мг/л

T a b l e 3. Destructive activity of glyphosate-utilizing bacteria *Bacillus* under initial glyphosate concentration 500 mg/l

Показатель Index	<i>Bacillus</i> К-32	<i>Bacillus</i> К-54	<i>Bacillus</i> К-62	<i>Bacillus</i> К-65	<i>Bacillus</i> К-81	<i>Bacillus</i> Кт
Накопление Pi за 7 дней инкубации, мг/л (PO ₄ ⁻³)	28,4	27,0	28,0	29,5	40,8	33,6
Разложилось глифосата, мг/л	203,2	193,2	200,4	211,1	292,0	240,5
Деструктивная активность, %	40,6	38,6	40,1	42,2	58,4	48,1

Заключение. Установлена способность ризосферных слизеобразующих бактерий *Bacillus* исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии метаболизировать гербицид глифосат без образования аминотетрафосфоновой кислоты, что свидетельствует об их перспективности в качестве инокулянтов, в особенности в условиях интенсивного применения гербицида глифосат. В модельных *in vitro* экспериментах по культивированию ризобактерий *Bacillus* с глифосатом (источник фосфора) идентифицированы продукты катаболизма гербицида. Методом тонкослойной хроматографии установлено, что исследованные штаммы разлагают глифосат по безопасному пути с образованием метилглицина (саркозина) и неорганического фосфата. Деструктивная активность слизеобразующих бацилл рассчитана по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность шести штаммов *Bacillus* К-32, К-54, К-62, К-65, К-81 и Кт составила: 50,6; 43,9; 48,4; 46,3; 65,4 и 64,4 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность составила: 40,6; 38,6; 40,1; 42,2; 58,4 и 48,1 % соответственно.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan, Y. Feng, X. Fan, S. Chen // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 102. – P. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
2. Carlisle, S. M. Glyphosate in the environment / S. M. Carlisle, J. T. Trevors // *Water, Air and Soil Pollution*. – 1988. – Vol. 39. – P. 409–420. <https://doi.org/10.1007/bf00279485>
3. Chaufan, G. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: Differences with its active ingredient / G. Chaufan, I. Coalova, M. Molina // *International Journal of Toxicology*. – 2014. – Vol. 33, N 1. – P. 29–38. <https://doi.org/10.1177/1091581813517906>
4. Михайловская, Н. А. Глифосат и аминометилфосфоновая кислота в природных средах и их микробная трансформация / Н. А. Михайловская // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 114–125. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>
5. Kamat, S. S. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria / S. S. Kamat, F. M. Raushel // *Current Opinion in Chemical Biology*. – 2013. – Vol. 17, N 4. – P. 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.06.006>
6. Биодegradация фосфорорганических загрязнителей почвенными бактериями: биохимические аспекты и нерешенные проблемы / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, Д. О. Эпиктетов [и др.] // *Биотехнология*. – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 126–135. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
7. Михайловская, Н. А. Количественная оценка активности калиймобилизирующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи // *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук*. – 2006. – № 3. – С. 41–46.
8. Лапа, В. В. Эффективность бактериального удобрения калиплант на дерново-подзолистой супесчаной почве с разной обеспеченностью калием / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Агрохимия*. – 2016. – № 6. – С. 29–38.
9. Активность фосфатмобилизации у ризобактерий / Н. А. Михайловская, О. Миканова, Т. Б. Барашенко, Т. В. Барашенко // *Почвоведение и агрохимия*. – 2007. – № 1 (38). – С. 225–231.
10. Михайловская, Н. А. Антагонистическая активность ризобактерий *A. brasilense* и *B. circulans* по отношению к фитопатогенным микромицетам рр. *Fusarium* и *Alternaria* / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Почвоведение и агрохимия*. – 2019. – № 1 (62). – С. 234–244.
11. Mikhailouskaya, N. K-mobilizing bacteria and their effect on wheat yield / N. Mikhailouskaya, A. Tchernysh // *Agronomijas vestis (Latvian Journal of Agronomy)*. – 2005. – Vol. 8. – P. 147–150.
12. Скрининг способности калиймобилизирующих ризобактерий метаболизировать гербицид глифосат / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко, Т. В. Погирицкая, С. В. Дюсова // *Почвоведение и агрохимия*. – 2022. – № 1 (68). – С. 200–212. [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-200-212](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-200-212)
13. Зеленкова, Н. Ф. Определение глифосата и продуктов его биодegradации хроматографическими методами / Н. Ф. Зеленкова, Н. Г. Винокурова // *Журнал аналитической химии*. – 2008. – Т. 63, № 9. – С. 958–961.
14. Ragab, M. T. H. Thin-layer chromatographic detection of glyphosate herbicide (N-phosphonomethyl glycine) and its aminomethyl phosphonic acid metabolite / M. T. H. Ragab // *Chemosphere*. – 1978. – Vol. 7, N 2. – P. 143–153. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(78\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90041-3)
15. Murphy, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters / J. Murphy, J. P. Riley // *Analytica Chimica Acta*. – 1962. – Vol. 27. – P. 31–36. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5)

References

1. Zhan H., Feng Y., Fan X., Chen S. Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, pp. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
2. Carlisle S. M., Trevors J. T. Glyphosate in the environment. *Water, Air and Soil Pollution*, 1988, vol. 39, pp. 409–420. <https://doi.org/10.1007/bf00279485>
3. Chaufan G., Coalova I., Molina M. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: Differences with its active ingredient. *International Journal of Toxicology*, 2014, vol. 33, no. 1, pp. 29–38. <https://doi.org/10.1177/1091581813517906>
4. Mikhailouskaya N. A. Glyphosate and aminomethylphosphonic acid in the environment and their microbial transformation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 114–125 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>
5. Kamat S. S., Raushel F. M. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2013, vol. 17, no. 4, pp. 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.06.006>
6. Sviridov A. V., Shushkova T. V., Epiktetov D. O., Tarlachkov S. V., Ermakova I. T., Leontievskii A. A. Biodegradation of organophosphorus pollutants by soil bacteria: biochemical aspects and unsolved problems. *Biotechnology*, 2020, vol. 36, no. 4, pp. 126–135. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
7. Mikhailovskaya N. A. Quantitative estimation of potassium-mobilizing bacteria activity and their efficiency for winter rye cultivation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2006, no. 3, pp. 41–46 (in Russian).

8. Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. The effectiveness of bacterial fertilizer kaliplant on soddy-podzolic sandy loam soil with different sufficiency of moving potassium. *Agrokhimiya = Agrochemistry*, 2016, no. 6, pp. 29–38 (in Russian).
9. Mikhailovskaya N. A., Mikanova O., Barashenko T. B., Barashenko T. V. Activity of phosphate mobilization by rhizobacteria. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2007, no. 1 (38), pp. 225–231 (in Russian).
10. Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. Antagonistic activity of rhizobacteria *A. brasilense* and *B. circulans* in respect of phytopathological micromycets *Fusarium* and *Alternaria*. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2019, no. 1 (62), pp. 234–244 (in Russian).
11. Mikhailouskaya N., Tchernysh A. K-mobilizing bacteria and their effect on wheat yield. *Agronomijas vestis = Latvian Journal of Agronomy*, 2005, vol. 8, pp. 147–150.
12. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dusova S. V. Screening the capability of potassium mobilizing rhizobacteria to metabolise herbicide glyphosate. *Pochvovedenie i Agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 1 (68), pp. 200–212 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1\(68\)-200-212](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-1(68)-200-212)
13. Zelenkova N. F., Vinokurova N. G. Determination of glyphosate and its biodegradation products by chromatographic methods. *Journal of Analytical Chemistry*, 2008, vol. 63, no. 9, pp. 871–874. <https://doi.org/10.1134/s106193480809013x>
14. Ragab M. T. H. Thin-layer chromatographic detection of glyphosate herbicide (N-phosphonomethyl glycine) and its aminomethyl phosphonic acid metabolite. *Chemosphere*, 1978, vol. 7, no. 2, pp. 143–153. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(78\)90041-3](https://doi.org/10.1016/0045-6535(78)90041-3)
15. Murphy J., Riley J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 1962, vol. 27, pp. 31–36. [https://doi.org/10.1016/s0003-2670\(00\)88444-5](https://doi.org/10.1016/s0003-2670(00)88444-5)

Информация об авторах

Лана Виталий Витальевич – академик, д-р с.-х. наук, профессор, гл. науч. сотрудник. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Михайловская Наталья Алексеевна – канд. с.-х. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Погирницкая Татьяна Викторовна – мл. науч. сотрудник. Институт почвоведения и агрохимии НАН Беларуси (ул. Казинца, 90, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Information about the authors

Lapa Vitaly V. – Academician, D. Sc. (Agrarian), Professor, Chief Researcher. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Mikhailovskaya Natalia A. – Ph. D. (Agrarian), Associate Professor, Head of the Laboratory. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.

Pahirnikskaya Tatsiana V. – Junior Researcher. Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bionf1@yandex.ru.