

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

АГРАРНЫЕ НАУКИ
AGRARIAN SCIENCES

УДК 632.15:579.64
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-83-88>

Поступило в редакцию 10.10.2024
Received 10.10.2024

Академик В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко

Институт почвоведения и агрохимии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

**ПОТЕНЦИАЛ РИЗОБАКТЕРИЙ *AZOSPIRILLUM BRASILENSE*
ПО ДЕТОКСИКАЦИИ ГЛИФОСАТА И ДЕЙСТВИЮ
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ**

Аннотация. Показана перспективность ризобактерий *Azospirillum brasilense* коллекции Института почвоведения и агрохимии в качестве инокулянтов в условиях интенсивного применения гербицида глифосат (ГФ). Установлено, что штаммы *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' разлагают глифосат без образования аминометилфосфоновой кислоты, по безопасному пути – до саркозина (метилглицина) и неорганического фосфата. На основании количественных данных по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости рассчитана деструктивная активность азотфиксирующих ризобактерий. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность штаммов *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *Azospirillum brasilense* 1' составляет 80,9; 62,5 и 61,1 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность: 82,2; 48,5 и 47,9 % соответственно. Применение глифосат-утилизирующих ризобактерий *A. brasilense* оказывает полифункциональное антистрессовое действие на растения в широком диапазоне содержания глифосата в почве (0–50 л/га), что проявляется в стимуляции роста, развития корневой системы, увеличении ассимиляционной поверхности листьев и содержания хлорофиллов.

Ключевые слова: *Azospirillum brasilense*, глифосат, катаболизм, деструкция, детоксикация

Для цитирования. Лапа, В. В. Потенциал ризобактерий *Azospirillum brasilense* по детоксикации глифосата и действию на продуктивность растений / В. В. Лапа, Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 1. – С. 83–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-83-88>

Academician Vitaly V. Lapa, Natallia A. Mikhailovskaya, Teresa B. Barashenko

Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**POTENTIAL OF RHIZOBACTERIA *AZOSPIRILLUM BRASILENSE* IN RESPECT OF GLYPHOSATE
DETOXIFICATION AND EFFECT ON PRODUCTIVE STATUS OF PLANTS**

Abstract. Rhizosphere bacteria *Azospirillum brasilense*, saving in the collection of the Institute for Soil Science and Agrochemistry, were characterized as perspective plant inoculants in conditions of intensive application of herbicide glyphosate. Bacteria strains *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 and *A. brasilense* 1' were found to metabolized glyphosate without forming aminomethylphosphonic acid. Bacteria strains *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 and *A. brasilense* 1' are capable of glyphosate decomposition with the formation of safe chemical products – sarcosin (methylglycine) and inorganic phosphate (Pi). Destruction activities of *A. brasilense* strains were calculated on the base of accumulation of inorganic phosphate in culture liquids. Under a glyphosate concentration of 300 mg/l the destruction activities of *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 and *Azospirillum brasilense* 1' were equal to 80.9; 62.5 and 61.1 %; under a glyphosate content of 500 mg/l the destruction activities were equal to: 82.2; 48.5 and 47.9 % respectively. Application of glyphosate-utilizing bacteria as inoculants resulted in the polyfunctional anti-stress effect on plants at high diapason of glyphosate content in soil (0–50 l/ha). Anti-stress effect is manifested in a plant growth (stems and roots), an increase of assimilation square and chlorophylls content.

Keywords: *Azospirillum brasilense*, glyphosate, catabolism, destruction, detoxification

For citation. Lapa V. V., Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. Potential of rhyzobacteria *Azospirillum brasilense* in respect of glyphosate detoxification and effect on productive status of plants. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* = *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 1, pp. 83–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-83-88>

Введение. Международные научные данные свидетельствуют об актуальности проблемы детоксикации глифосата (ГФ). Установлено негативное действие ГФ и его остатков на окружающую среду и живые организмы [1–3]. На основании научной информации об экологической опасности и токсическом действии на живые организмы ВОЗ признала глифосат карциногенным для

человека [2]. Применение глифосата запрещено в Австрии, Аргентине, Бельгии, Мальте, Нидерландах, Шри-Ланке. Во многих странах сокращаются масштабы применения гербицида.

Для снижения негативных последствий многократного применения глифосата необходима периодическая ремедиация. Самыми активными деструкторами гербицида являются бактерии [2–6]. Применение бактерий-деструкторов, способных разлагать глифосат до безопасных химических продуктов, обосновано с экологических и экономических позиций.

Глифосат (N-фосфометилглицин) относится к классу опасных загрязнителей, органических фосфонатов, содержит устойчивую фосфоновую C–P связь. Способность к биodeградации глифосата проявляют бактерии разных родов [2–8], однако высокий уровень штаммовой специфичности сдерживает разработку биопрепаратов для детоксикации ГФ. Микробные сообщества почвы и воды, как правило, разлагают ГФ только до аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), при этом в молекуле глифосата разрушается C–N связь, а фосфоновая связь C–P сохраняется. АМФК сильно адсорбируется компонентами почвы, аккумулируется и медленно разлагается [2; 3].

Безопасная детоксикация глифосата предполагает применение бактериальных деструкторов, использующих глифосат как источник фосфора и способных разрушать фосфоновую C–P связь в молекуле гербицида с образованием неорганического фосфата [2; 4; 6]. Безопасную детоксикацию могут обеспечить бактерии, имеющие активные C–P лиазные ферментные системы. В пределах одного рода бактерий только отдельные штаммы имеют активные C–P лиазы. Примерно 40 % расшифрованных бактериальных геномов содержат гены, кодирующие ферменты катаболизма глифосата, однако безопасную детоксикацию обеспечивают лишь отдельные штаммы [5; 7].

Наиболее перспективны поиски деструкторов ГФ среди ризосферных бактерий, предназначенных для применения в качестве инокулянтов. В Институте почвоведения и агрохимии имеется коллекция ризосферных бактерий. Азотфиксирующие бактерии представляют особый интерес. Их применение для инокуляции индуцирует значимый гормональный эффект, активизирует азотфиксацию и растворение трехзамещенных фосфатов, обеспечивает биоконтроль корневых фитопатогенов, повышает урожайность и улучшает качество продукции [9; 10].

В результате скрининга азотфиксирующих бактерий коллекционного фонда установлено, что некоторые штаммы *A. brasilense* проявляют значимую активность в отношении деструкции глифосата [8]. Это свидетельствует о полифункциональности диазотрофов и расширяет область их практического применения.

Цель исследований – изучение потенциала азотфиксирующих ризобактерий *A. brasilense* по детоксикации глифосата и действию на продуктивный статус растений.

Материалы и методы исследований. Исследования проведены с глифосатутилизирующими ризосферными бактериями коллекционного фонда Института почвоведения и агрохимии: *A. brasilense* 2(в)3; *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1'.

Для изучения продуктов катаболизма глифосата проведены модельные эксперименты по культивированию ризобактерий *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' с глифосатом как единственным источником фосфора. В колбы Эрленмейера (объем 250 мл) вносили по 100 мл жидкой минеральной среды Дворкина–Фостера [11]. В опытные колбы вносили 600 (C₁) или 1000 (C₂) мкл гербицида Торнадо и по 2 мл инокулянта. Инкубация в термостате 7 суток при 28 °С при постоянном перемешивании (шейкер орбитальный KS–501 digital IKA WERKE (GmbH&Co.KG), 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).

Для анализа и идентификации продуктов катаболизма глифосата в бесклеточной культуральной жидкости *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' применяли метод тонкослойной хроматографии (ТСХ) [12; 13]. Использовали хроматографические пластины Сорбфил ПТСХ-АФ-Ф-УФ (Россия). Система растворителей: изопропанол : 5 %-ный водный NH₄OH в соотношении 1 : 1 (V/V). Для обнаружения аминов (глифосат и глицин) хроматограмму 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 [12; 13]. Сначала на хроматограмме проявляются первичные амины, глицин и аминометилфосфоновая кислота, позднее по времени проявляются вторичные амины, глифосат и саркозин.

Деструктивную активность ризобактерий оценивали по накоплению неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ. Концентрацию Pi определяли колориметрическим методом по J. P. Murphy, J. P. Riley [14]. 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 (OD_{710}) 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 КЖ рассчитывали деструктивную активность ризобактерий.

Для оценки влияния глифосата на продуктивный статус растений в модельном эксперименте выращивали тест-культуру, горох посевной *Pisum sativum* L. сорт Миллениум, в сосудах (\varnothing 9 см, h = 11 см, 500 г почвы) в дерново-подзолистой супесчаной почве (pH–5,6; гумус – 1,98 %; P_2O_5 – 148–150 мг/кг; K_2O – 172–176 мг/кг) с широким диапазоном содержания глифосата: C_0 (без ГФ); C_1 (2,30 мг ГФ/кг); C_2 (7,70 мг ГФ/кг) и C_3 (38,50 мг ГФ/кг). Концентрации C_1 и C_2 соответствуют полевым нормам внесения гербицида: 3 и 10 л/га. Концентрация C_3 соответствует пятикратному превышению максимальной нормы 50 л/га при пересчете на слой 0–5 см пахотного горизонта. Перед посевом проводили поверхностную стерилизацию (10 %-ный раствор H_2O_2 , 30 мин) и инокуляцию семян ризобактериями (титры: $(8,5–9,0)10^7$ КОЕ/мл). Длительность эксперимента – 2,5 месяца, повторность – четырехкратная. Содержание хлорофиллов в листьях определяли по методу Г. С. Посыпанова [15]. По окончании эксперимента определены сырая и сухая масса корней растений.

Результаты и их обсуждение. Вопрос о том, какой химический элемент из молекулы глифосата используют ризобактерии имеет первостепенное значение, так как безопасную детоксикацию глифосата могут обеспечить только штаммы-деструкторы, использующие этот гербицид как источник фосфора. Такие штаммы бактерий имеют активный C–P лиазный комплекс, расщепляющий фосфоновую C–P связь [4–7] с образованием неорганического фосфата (Pi). Результаты скрининга показали, что коллекционные штаммы *Azospirillum brasilense* эффективно метаболизируют глифосат как источник фосфора, что делает их перспективными целевыми объектами для детоксикации этого гербицида.

Сложность идентификации глифосата в смесях обусловлена его химическими свойствами. Молекула глифосата содержит фрагмент фосфоновой кислоты, фрагмент карбоновой кислоты и аминокгруппу. Глифосат проявляет химические свойства трех классов химических соединений, что значительно усложняет выбор методов его идентификации. В настоящее время основные методы идентификации глифосата: хроматография (жидкостная, газовая, ионная), сочетание хроматографии с масс-спектрометрией и ТСХ. 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 [12; 13]. Основным критерием в методе ТСХ является коэффициент хроматографической подвижности Rf. Для идентификации индивидуальных веществ используют стандарты, коэффициент хроматографической подвижности которых известен.

Анализ результатов хроматографии бесклеточных КЖ штаммов *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' 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 у исследованных штаммов является безопасный саркозин (метилглицин) ($R_f = 0,54 \pm 0,022$). Среди продуктов катаболизма аминометилфосфоновая кислота ($R_f = 0,25 \pm 0,01$) не обнаружена (табл. 1).

В настоящее время обсуждаются два основных пути микробной деградации глифосата в почве. При разрыве фосфоновой C–P связи в молекуле глифосата продуктами его разложения являются саркозин (метилглицин) и неорганический фосфат. По второму пути при разрыве связи C–N продуктами разложения являются аминометилфосфоновая кислота (в которой сохраняется фосфоновая связь) и глиоксилат [4–7].

При бактериальной деструкции глифосата по фосфоновой C–P связи в культуральной жидкости регистрируется неорганический фосфор (Pi), по накоплению которого можно количественно оценивать и сравнивать деструктивную активность штаммов ГФ-утилизирующих бактерий [4].

Т а б л и ц а 1. Хроматографическая подвижность продуктов катаболизма глифосата

T a b l e 1. Chromatographic motility of glyphosate catabolism products

Продукт катаболизма Catabolism product	Rf (хроматографическая подвижность) Rf (chromatographic motility)
Глицин	0,64 ± 0,025
Саркозин	0,54 ± 0,022
Глифосат	0,33 ± 0,010
Аминометилфосоновая кислота	0,25 ± 0,010

П р и м е ч а н и е: элюент : изопропанол : 5 %-ный водный NH₄OH (1 : 1, V/V).

N o t e: eluent: isopropanol : 5 % aqueous NH₄OH (1 : 1, V/V).

Для определения деструктивной активности ризобактерий по накоплению неорганического фосфата (Pi) проведены *in vitro* эксперименты с культивированием азотфиксирующих бактерий *A. brasilense* в жидкой среде Дворкина–Фостера с разным содержанием глифосата в качестве источника фосфора: C₁ – 0,3 мг ГФ/мл и C₂ – 0,5 мг ГФ/мл. По истечении 7 суток в бесклеточной культуральной жидкости определяли содержание неорганического фосфата колориметрическим методом J. P. Murphy, J. P. Riley [14]. По показателям оптической плотности (OD₇₁₀) рассчитано содержание неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ азотфиксирующих ризобактерий *A. brasilense* (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Содержание неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной КЖ ризосферных бактерий *A. brasilense*T a b l e 2. Inorganic phosphate content in cell-free culture liquid of rhizosphere bacteria *A. brasilense*

Штамм Strain	C _{ГФ} , мг/л C _{GU} , mg/l	Содержание неорганического фосфата (Pi), мг/л Inorganic phosphate (Pi) content, mg/l
<i>A. brasilense</i> 2(в)3	300	33,9
	500	57,3
<i>A. brasilense</i> Дп1	300	26,2
	500	33,8
<i>A. brasilense</i> 1'	300	25,6
	500	33,5

П р и м е ч а н и е: НСР₀₅ фактор А (штамм) – 1,7; фактор В (C_{ГФ}) – 1,4; фактор АВ – 2,4.

N o t e: НСР₀₅ factor A (strain) – 1.7; factor B (C_{GU}) – 1.4; factor AB – 2.4.

На основании количественных данных по содержанию неорганического фосфата (Pi) в бесклеточной культуральной жидкости, с учетом химического состава глифосата (изопропиламинная соль C₃H₈NO₅P) рассчитаны показатели деструктивной активности трех штаммов азотфиксирующих ризобактерий. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *Azospirillum brasilense* 1' составила 80,9; 62,5 и 61,1 % соответственно. При концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность трех указанных штаммов азотфиксирующих ризобактерий составила: 82,2; 48,5 и 47,9 % соответственно (табл. 3).

В серии модельных экспериментов с искусственно созданными уровнями содержания глифосата в дерново-подзолистой супесчаной почве (0–50 л/га) установлено стрессовое действие гербицида на растения, которое проявлялось в замедлении линейного роста, снижении биомассы надземной части и корней. Экспериментально установлено негативное действие почвенного глифосата на показатели активности фотосинтеза – площадь листовой поверхности и содержание обеих форм хлорофилла в листьях тест-культуры.

Применение ГФ-утилизирующих ризобактерий бактерий *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' для инокуляции семян оказывало полифункциональное антистрессовое действие в широком диапазоне концентраций глифосата в почве от 0 до 50 л/га. Установлена стимуляция ростовых процессов и активизация фотосинтеза: увеличение корневой (3–21 %) и надземной (4–22 %) массы гороха, увеличение площади листовой поверхности (4–23 %) и повышение содержания хлорофилла в листьях (4–29 %) (табл. 4).

Т а б л и ц а 3. Деструктивная активность ГФ-утилизирующих ризобактерий *A. brasilense* при исходной концентрации глифосата 300 и 500 мг/л

T a b l e 3. Destructive activity of glyphosate-utilizing bacteria *A. brasilense* under initial glyphosate concentration 300 and 500 mg/l

Показатель Index	<i>A. brasilense</i> 2(в)3		<i>A. brasilense</i> Дп1		<i>A. brasilense</i> 1'	
	300 мг/л	500 мг/л	300 мг/л	500 мг/л	300 мг/л	500 мг/л
Накопление неорганического фосфата (Pi) за 7 дней инкубации, мг/л	33,9	57,4	26,2	33,9	25,6	33,5
Разложение глифосата, мг/л	242,6	410,8	187,5	242,6	183,2	239,7
Деструктивная активность, %	80,9	82,2	62,5	48,5	61,1	47,9

Т а б л и ц а 4. Антистрессовое действие ризобактерий *A. brasilense* на показатели роста и активности фотосинтеза гороха Миллениум в зависимости от содержания ГФ в почве

T a b l e 5. Anti-stress effect of *A. brasilense* on growth and photosynthesis activity of peas Millennium in dependence from glyphosate content in soil

Штамм Strain	Сухая масса корней Dry mass of roots		Сухая масса надземной части Dry mass of aboveground part		Площадь листовой поверхности Leaf surface area		Содержание хлорофилла (a + b) Chlorophyll content (a + b)	
	C ₀	C ₁ -C ₃	C ₀	C ₁ -C ₃	C ₀	C ₁ -C ₃	C ₀	C ₁ -C ₃
	% к контролю без инокуляции							
<i>A. brasilense</i> 2(в)3	14	11–21	22	10–22	10	10–16	4	4–29
<i>A. brasilense</i> Дп1	3	6–17	9	4–17	4	12–23	8	7–8

П р и м е ч а н и е: C₀ – без ГФ; C₁ – 3 л ГФ/га; C₂ – 10 л ГФ/га; C₃ – 50 л ГФ/га.

N o t e: C₀ – without GPh; C₁ – 3.0 l GPh/ha; C₂ – 10 l GPh/ha; C₃ – 50 l GPh/ha.

З а к л ю ч е н и е. Установлена полифункциональность ризосферных бактерий *Azospirillum brasilense* исследовательской коллекции Института почвоведения и агрохимии, которая свидетельствует об их перспективности в качестве инокулянтов, в особенности в условиях интенсивного применения гербицида глифосат. В модельных *in vitro* экспериментах по культивированию ризобактерий *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' с глифосатом (источник фосфора) идентифицированы продукты катаболизма гербицида. Методом тонкослойной хроматографии (ТСХ) установлено, что исследованные штаммы разлагают глифосат по безопасному пути с образованием саркозина (метилглицина) и неорганического фосфата. На основании количественных данных по накоплению неорганического фосфата (Pi) в культуральной жидкости рассчитана деструктивная активность азотфиксирующих ризобактерий. При концентрации глифосата 300 мг/л деструктивная активность *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *Azospirillum brasilense* 1' составила 80,9; 62,5 и 61,1 %; при концентрации глифосата 500 мг/л деструктивная активность составила 82,2; 48,5 и 47,9 % соответственно.

Применение ГФ-утилизирующих ризобактерий *A. brasilense* 2(в)3, *A. brasilense* Дп1 и *A. brasilense* 1' оказывает полифункциональное антистрессовое действие на растение в широком диапазоне содержания глифосата в почве (0–50 л/га), которое проявляется в стимуляции роста, развитии корневой системы, увеличении ассимиляционной поверхности листьев и содержания хлорофиллов.

Список использованных источников

1. 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>
2. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan, Ya. Feng, X. Fan, S. Chen // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2018. – Vol. 102. – P. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
3. Михайловская, Н. А. Глифосат и аминотетрафосфоновая кислота в природных средах и их микробная трансформация / Н.А. Михайловская // Весці 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>
4. 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>
5. Микробная деградация гербицида глифосата (обзор) / А. В. Свиридов, Т. В. Шушкова, И. Т. Ермакова [и др.] // Прикладная биохимия и микробиология. – 2015. – Т. 51, № 2. – С. 183–190. <https://doi.org/10.7868/S0555109915020221>
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.

7. Hove-Jensen, B. Utilization of glyphosate as phosphate source: biochemistry and genetics of bacterial carbon-phosphorus lyase / B. Hove-Jensen, D. L. Zechel, B. Jochimsen // *Microbiology and Molecular Biology Reviews*. – 2014. – Vol. 78, N 1. – P. 176–197. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00040-13>
8. Скрининг азотфиксирующих бактерий по способности метаболизировать гербицид глифосат как источник фосфора / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко, Т. В. Погирницкая, С. В. Дюсова // *Почвоведение и агрохимия*. – 2022. – № 2 (69). – С. 110–120. [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-2\(69\)-110-120](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-2(69)-110-120)
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. Азоспириллы и их влияние на злаковые культуры (обзор литературы) / Н. А. Михайловская // *Почвоведение и агрохимия*. – 2015. – № 2(55). – С. 167–181.
11. Dworkin, M. Experiments with some microorganisms which utilize ethane and hydrogen / M. Dworkin, J. W. Foster // *Journal of Bacteriology*. – 1958. – Vol. 75, N 5. – P. 592–603. <https://doi.org/10.1128/jb.75.5.592-603.1958>
12. Зеленкова, Н. Ф. Определение глифосата и продуктов его биотрансформации хроматографическими методами / Н. Ф. Зеленкова, Н. Г. Винокурова // *Журнал аналитической химии*. – 2008. – Т. 63, № 9. – С. 958–961.
13. 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)
14. Murphy, J. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters / J. P. 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)
15. Посыпанов, Г. С. Методы изучения биологической фиксации азота воздуха: справочное пособие / Г. С. Посыпанов. – М., 1991. – 300 с.

Referenses

1. 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>
2. 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>
3. Mikhailovskaya 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>
4. 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>
5. Sviridov A. V., Shushkova T. V., Ermakova I. T., Ivanova E. V., Epiktetov D. O., Leontievsky A. A. Microbial degradation of glyphosate herbicides (Review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2015, vol. 51, no. 2, pp. 188–195. <https://doi.org/10.1134/s0003683815020209>
6. Sviridov A. V., Shushkova T. V., Epiktetov D. O., Tarlachkov S. V., Ermakova I. T., Leontievskii A. A. Biodegradation of organo-phosphorus pollutants by soil bacteria: biochemical aspects and unsolved problems. *Biotechnology*, 2020, vol. 36, no. 4, pp. 126–135 (in Russian). <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
7. Hove-Jensen B., Zechel D. L., Jochimsen B. Utilization of glyphosate as phosphate source: biochemistry and genetics of bacterial carbon-phosphorus lyase. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2014, vol. 78, no. 1, pp. 176–197. <https://doi.org/10.1128/mmbr.00040-13>
8. Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dyusova S. V. Screening the capability of nitrogen fixing bacteria to metabolise herbicide glyphosate as a source of phosphorus. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2022, no. 2 (69), pp. 110–120 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-2\(69\)-110-120](https://doi.org/10.47612/0130-8475-2022-2(69)-110-120)
9. Mikhailovskaya N. A., Mikanova O., Barashenko T. B., Barashenko T. V. Phosphate mobilization activity in rhizobacteria. *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2007, no. 1 (38), pp. 225–231 (in Russian).
10. Mikhailovskaya N. A. *Azospirillum* spp. and their influence on grain crops (review). *Pochvovedenie i agrokhimiya = Soil Science and Agrochemistry*, 2015, no. 2 (55), pp. 167–181 (in Russian).
11. Dworkin M., Foster J. W. Experiments with some microorganisms which utilize ethane and hydrogen. *Journal of Bacteriology*, 1958, vol. 75, no. 5, pp. 592–603. <https://doi.org/10.1128/jb.75.5.592-603.1958>
12. 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>
13. 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)
14. 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)
15. Posypanov G. S. *Methods for the investigation of biological fixation of nitrogen from air*. Moscow, 1991. 300 p. (in Russian).

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.

Барашенко Тереса Брониславовна – 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 Vitaliy 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.

Barashenko Teresa B. – 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.