

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ЗЕМЛЯРОБСТВА І РАСЛІНАВОДСТВА
AGRICULTURE AND PLANT CULTIVATION

УДК 632.954.024:631.461
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>

Поступила в редакцию 14.08.2023
Received 14.08.2023

Н. А. Михайловская

*Институт почвоведения и агрохимии, Национальная академия наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

**ГЛИФОСАТ И АМИНОМЕТИЛФОСФОНОВАЯ КИСЛОТА
В ПРИРОДНЫХ СРЕДАХ И ИХ МИКРОБНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ**

Аннотация. Анализ отечественной и зарубежной научной литературы свидетельствует, что глобальное применение глифосата (ГФ), обусловленное его эффективностью, невысокой стоимостью и созданием устойчивых к гербициду сортов сельскохозяйственных культур, привело к практически повсеместному присутствию остаточных количеств гербицида и его метаболита, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде: в воздухе, почвах, природных водах и в продукции растениеводства. Представлена научная информация по влиянию глифосата на окружающую среду и живые организмы. Обоснована необходимость периодической ремедиации для снижения негативных последствий многократного применения гербицида и детоксикации его остатков с применением бактериальных деструкторов, способных разлагать глифосат и АМФК до экологически безопасных соединений. Рассмотрены пути микробной трансформации глифосата. Безопасная детоксикация предполагает применение бактериальных деструкторов, разрушающих фосфоновую связь в молекуле ГФ. Несмотря на то что способность к биодegradации глифосата проявляют бактерии разных родов, коммерческие препараты для безопасной детоксикации ГФ пока не разработаны из-за высокого уровня штаммовой специфичности, связанной с различием путей катаболизма ГФ. Наиболее перспективны поиски деструкторов ГФ и АМФК среди ризосферных бактерий, предназначенных для применения в качестве инокулянтов. Сложность проблемы детоксикации ГФ и АМФК и высокий уровень штаммовой специфичности бактериальных деструкторов сдерживают разработку коммерческих препаратов для детоксикации ГФ и АМФК.

Ключевые слова: глифосат (ГФ), аминометилфосфоновая кислота (АМФК), микробная деструкция, бактериальные деструкторы ГФ и АМФК, пути катаболизма, штаммовая специфичность, детоксикация ГФ и АМФК

Для цитирования: Михайловская, Н. А. Глифосат и аминометилфосфоновая кислота в природных средах и их микробная трансформация / Н. А. Михайловская // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 114–125. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-114-125>

Natallia A. Mikhailouskaya

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

**GLIPHOSATE AND AMINOMETHYLPHOSPHONIC ACID IN THE ENVIRONMENT
AND THEIR MICROBIAL TRANSFORMATION**

Abstract. Analysis of domestic and international literature indicates that the global use of glyphosate (GP), due to its effectiveness, low price and creation of herbicide-resistant agricultural crop varieties, resulted in nearly universal presence of the rest quantities of the herbicide and its main metabolite, aminomethylphosphonic acid (AMPA) in the environment: air, soil, water and crop products. Scientific information on glyphosate influence on the environment and living organisms is presented in this paper. The necessity is substantiated for periodic remediation for reducing the negative consequences of the repeated application of herbicide and detoxification of its residual quantities with the use of destructor-bacteria, capable of decomposing glyphosate and AMPA to ecologically safe compounds. The ways for glyphosate microbial transformation are reviewed. Ecologically safe detoxification assumes the use of bacterial destructors, which are destroying the phosphonic bond in glyphosate molecule. Although the bacteria of different genera are showing capacity for GP biodegradation, commercial products for the safe detoxification of glyphosate have not yet been developed due to the high level of strain specificity

associated with the different ways of GF catabolism. The most perspective is the search for GP and AMPA destructors among rhizosphere bacteria, intended for application as inoculants. Complexity of the problem of GP and AMPA detoxification as well as the high level of strain specificity of bacterial destructors significantly restrain development of commercial preparations for GP and AMPA detoxification.

Keywords: glyphosate (GP), aminomethylphosphonic acid (AMPA), microbial destruction, destructor-bacteria of GP and AMPA, catabolism ways, strain specificity, detoxification of GP and AMP

For citation: Mikhailouskaya N. A. Glyphosate and aminomethylphosphonic acid in the environment and their microbial transformation. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya agrarnykh nauk = 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>

Введение. Глифосат (N-(фосфонометил)-глицин) входит в состав широкого круга гербицидов под разными коммерческими названиями. Этот гербицид относится к органическим фосфонатам, которые являются опасными загрязнителями. Свойства глифосата (ГФ) определяются наличием в молекуле ковалентной фосфоновой С–Р связи, устойчивой к химическим и физическим методам воздействия [1–4].

Глобальное использование глифосата обусловлено его эффективностью, невысокой стоимостью и созданием устойчивых к гербициду трансгенных сортов основных сельскохозяйственных культур. Интенсивное применение в сельскохозяйственных посевах, лесном хозяйстве, на городских территориях, в садоводстве, для очистки водоемов, а также в качестве десиканта привело к практически повсеместному присутствию остаточных количеств глифосата и его первичного метаболитического продукта, аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), в окружающей среде: в воздухе [2, 3], почвах [2, 3, 5–9], в грунтовых, дренажных и поверхностных водах, в пресных водоемах и морской воде [2, 3, 5, 9, 10–15], в продукции растениеводства [2, 3, 6, 16]. Отмечается, что в растениеводческой продукции содержание глифосата часто достигает верхнего допустимого уровня [16].

Глифосат в почвах. Глифосат может накапливаться и длительно сохраняться в почве вследствие взаимодействия с ее компонентами [2, 17]. Разложение сорбированного почвой глифосата значительно замедляется. Установлена обратная корреляция между скоростью разложения глифосата и силой его сорбции в почве. Степень сорбции гербицида в почве зависит от гранулометрического и минерального состава [17, 18], уровня кислотности [19], содержания органических веществ [20], емкости катионного обмена, состава катионов и обеспеченности фосфатами [18].

В соответствии с результатами исследований, проведенных в Хартфордширском университете (FOOTPRINT Pesticide Properties Database, 2013), типичный период полураспада глифосата в почве составляет примерно 12 дней в аэробных условиях. Однако при сильной степени сорбции компонентами почвы период полураспада глифосата может варьировать от нескольких месяцев до нескольких лет, в зависимости от типа почвы и экологических условий.

Природные микробные сообщества почвы и воды разлагают глифосат преимущественно до аминометилфосфоновой кислоты (АМФК), которая по-прежнему содержит фосфоновую С–Р связь и является опасным загрязнителем [3, 4, 21–24]. В экспериментах с радиоактивной меткой [25] установлено, что 85–99 % от исходной радиоактивности глифосата трансформировались в АМФК при инкубации в супесчаной и суглинистой почвах в течение 80 дней. К настоящему времени накоплено достаточно научной информации, подтверждающей, что АМФК разлагается значительно медленнее, чем глифосат [3, 14, 22, 23, 25]. Такие факторы, как невысокая бактериальная активность, недостаток кислорода, рН ниже нейтрального, также способствуют аккумуляции АМФК в почве и воде.

При изучении влияния пятикратного применения глифосата на скорость его минерализации в суглинистой почве С. Ланкастер с соавт. [26] показали, что константа скорости минерализации первого порядка для однократного применения больше, чем для пяти последовательных применений глифосата. Это указывает на замедление минерализации гербицида при его повторяющихся применениях.

В качестве показателя степени загрязнения почвы глифосатом обычно используют его экстрагируемую фракцию, а адсорбированный компонентами почвы ГФ не учитывается. В Институте биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г. К. Скрыбина РАН, где проводятся развер-

нутые исследования по микробной деструкции глифосата, считают, что связанная фракция гербицида, которая не извлекается при проведении щелочной экстракции, является важной характеристикой уровня загрязнения почвы. Известно, что количественное содержание связанной фракции глифосата варьирует в широких пределах и может достигать 65–76 %, в зависимости от свойств почвы, исходной концентрации ГФ и времени взаимодействия с почвой, в то время как экстрагируемая форма гербицида варьирует в пределах 24–35 % [27].

Глифосат в природных водах. Глифосат смывается дождями и попадает в поверхностные и грунтовые воды, которые являются основным источником питьевой воды [2, 3, 5, 9–11, 13, 14, 22]. При этом в природных водах обнаруживается как исходный гербицид ГФ (17,5 %), так и его основной метаболит АМФК (67,5 %). При анализе более 50 000 образцов поверхностных вод глифосат был найден в 29 % из них, аминометилфосоновая кислота была обнаружена в 50 % образцов. Глифосат химически стабилен в воде, по данным Агентства по охране окружающей среды США (US EPA), он способствует устойчивому загрязнению подземных вод [12, 15].

Основная часть ГФ, которая обнаруживается в поверхностных водах, является результатом смыва с обработанных растений, сноса при сельскохозяйственном и лесохозяйственном применении гербицида или после прямой обработки глифосатом водных источников для уничтожения водных сорняков [9]. Снижение концентрации ГФ и АМФК в природных водах происходит главным образом за счет адсорбции осадками и микробной деструкции [9]. Следует отметить, что скорость разложения глифосата в воде обычно ниже, чем в почве, так как численность глифосат-утилизирующих микроорганизмов в воде значительно меньше, чем в большинстве типов почв [12].

Влияние глифосата на почвенную микрофлору. Современная научная литература свидетельствует о негативном влиянии глифосата на микробные сообщества почвы. Под действием гербицида отмечается замедление роста, снижение численности и разнообразия культурных бактерий и грибов на загрязненных почвах при одновременной активизации роста фитопатогенных грибов [3, 22, 28–30]. Такой сдвиг в структуре микробных сообществ почвы приводит к росту болезней и снижению устойчивости растений к действию фитопатогенов. Результаты исследований, приведенные в [31], показали, что глифосат подавляет антагонистические свойства *Enterococcus* spp. при воздействии *Clostridium botulinum*.

Р. М. Заблотович, К. Н. Редди показали негативное влияние глифосата на бобово-ризобийный симбиоз, что проявляется в угнетении формирования клубеньков [32]. По данным [33], глифосат снижает ферментативную активность почв. В исследованиях М. Г. Жарикова установлено снижение дегидрогеназной активности почв [8], которая служит надежным показателем актуального уровня заселенности почвы микроорганизмами.

Негативное влияние гербицида на почвенную микрофлору и ее метаболическую активность связано, очевидно, с принципом его действия. Глифосат является ингибитором фермента 5-енолпирувилшикимат-3-фосфат синтетазы (ЕПФС), регулирующего клеточный биосинтез жизненно важных ароматических аминокислот (тирозин, фенилаланин, триптофан) у растений и ряда микроорганизмов [34].

Действие глифосата на окружающую среду и живые организмы. Методы исследований совершенствуются, и в настоящее время уже нельзя утверждать, что глобальное применение глифосата не влияет или оказывает незначительное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [22, 23]. Однако противоречия при оценке экологической опасности глифосата по-прежнему сохраняются.

Основным аргументом в пользу безопасности ГФ считалось быстрое снижение его концентрации в почве, однако сейчас установлено, что это связано с трансформацией гербицида в основной метаболит, АМФК, который сильнее адсорбируется почвой, медленнее разлагается и более опасен, чем собственно гербицид [3, 4, 21–25]. В качестве аргументов в защиту безопасности ГФ и АМФК приводятся такие факторы, как отсутствие летучести и сильная адсорбция к почвенным компонентам. Принцип действия глифосата [34] как ингибитора клеточного биосинтеза ароматических аминокислот в шикиматном пути также приводится как аргумент в пользу безопасности гербицида, на том основании, что у человека и животных этот путь биосинтеза отсутствует.

В последние десятилетия число научных публикаций, подтверждающих негативный экологический эффект и токсическое действие глифосата и аминотилфосфоновой кислоты на живые организмы, значительно возросло. В соответствии с современными научными данными глифосат рассматривается как опасный загрязнитель, приносящий хронический отдаленный вред живым организмам и окружающей среде [3, 6, 22, 23, 35–47].

К настоящему времени выявлен широкий спектр воздействий глифосата на здоровье человека. По данным [35], глифосат и его коммерческие формы оказывают цитотоксическое действие на клетки человека и вызывают их апоптоз. Установлено негативное действие на репродуктивное здоровье человека, глифосат вызывает апоптоз и некроз эмбриональных и плацентарных клеток [36, 37]. Исследования, приведенные в [38] показали, что ГФ-содержащие гербициды приводят к эндокринным нарушениям у человека. Установлено негативное действие глифосата на эритроциты крови [39]. В тканях животных и человека обнаруживаются остатки глифосата [40, 41].

Результаты научных исследований свидетельствуют о негативном влиянии глифосата и АМФК на функционирование ферментов группы Цитохром Р450 у человека и животных. Эта группа ферментов отвечает за метаболизм большинства лекарственных препаратов и других ксенобиотиков, в том числе мутагенов и канцерогенов [41, 42]. По результатам исследований, приведенным в [43], установлена повышенная распространенность онкологических заболеваний среди работников, непосредственно выполняющих обработки глифосатом.

В ряде научных исследований отмечается, что аминотилфосфоновая кислота вызывает нарушения жизненно важных процессов репарации ДНК и синтеза мРНК в растительных и животных организмах. По данным [44], АМФК вызывает повреждения ДНК у рыб. Установлено негативное действие глифосата на процессы воспроизводства у рыб, показана его токсичность для моллюсков [45, 46]. В работе [46] сообщается о летальном действии глифосата на амфибий. Установлено, что хронический контакт дождевых червей с глифосатом негативно влияет на их рост, выживаемость и репродукцию [47].

На основании накопленной информации об экологической опасности и токсическом действии глифосата на живые организмы Всемирная организация здравоохранения в 2015 г. признала глифосат карциногенным для человека [3]. Применение глифосата запрещено в Австрии, Аргентине, Бельгии, Мальте, Нидерландах, Шри-Ланке. В ряде европейских стран снижаются масштабы применения гербицида.

Микробная деструкция глифосата и АМФК. Детоксикация глифосата и аминотилфосфоновой кислоты в окружающей среде – глобальная проблема, обусловленная повсеместным присутствием этих загрязнителей в окружающей среде. По современным представлениям самыми эффективными являются микробные методы разложения глифосата и АМФК [3, 4, 21–24]. Химические и физические способы детоксикации не получили практического применения из-за высокой устойчивости ковалентной связи С–Р в молекуле глифосата. Эффективно метаболизировать глифосат способны в основном бактерии. Грибы и актиномицеты играют значительно меньшую роль.

Для решения проблемы детоксикации необходимы поиски бактериальных деструкторов, разлагающих глифосат и АМФК до экологически безопасных конечных продуктов. Такие деструкторы должны иметь в своем арсенале активные С–Р-лиазные ферментные системы, разлагающие фосфоновую связь ГФ с образованием неорганического фосфата и саркозина. Это подразумевает, что целевые объекты должны утилизировать гербицид как источник фосфора. Считается, что именно такие бактерии имеют активный С–Р-лиазный мультиферментный комплекс, расщепляющий ковалентную фосфоновую С–Р связь [3, 4, 22–24].

Исследования по изучению разложения глифосата в загрязненных почвах, водах и в промышленном активном иле были начаты авторами [48, 49]. Эти работы заложили основы изучению путей биодеградации ГФ в окружающей среде и идентификации микроорганизмов, способных метаболизировать этот гербицид.

К настоящему времени ГФ-утилизирующие бактерии выделены как из загрязненных, так и из незагрязненных почв [4, 22]. Биодеградацию глифосата могут осуществлять бактерии, ранее

не контактировавшие с этим гербицидом [4, 23, 50–55]. Деструкторы глифосата обнаружены среди грамотрицательных и грамположительных бактерий, хотя гены, кодирующие С–Р лиазы, чаще обнаруживаются у грамотрицательных бактерий [4, 55]. Эти факты позволяют предполагать, что способность разрушать фосфоновую С–Р связь и разлагать органические фосфонаты является эволюционной. Существуют природные органические фосфонаты (структурные компоненты клеток, формы запасаания фосфора), механизм утилизации которых эволюционно отработан. На этом основании предполагается более широкое распространение бактериальных деструкторов органических фосфонатов [4].

Штаммовая специфичность. Способность к биодegradации глифосата в почве и воде обнаружена у бактерий разных родов: *Bacillus* [3, 52, 56], *Pseudomonas* [57, 3, 50, 51, 54, 58], *Arthrobacter* [3], *Azospirillum* [53], *Rhizobium* [3, 53, 59], *Achromobacter* [3], *Flavobacterium* [3], *Enterobacter* [3], *Ochrobastrum* [3] и др. Однако, несмотря на активные исследования в этом направлении, коммерческие препараты для безопасной детоксикации глифосата пока нигде в мире не разработаны.

Одной из причин, которую отмечает большинство исследователей, является высокий уровень штаммовой специфичности. Способность к разрушению фосфоновой С–Р связи выявляется лишь у отдельных представителей среди бактерий одного рода. Современные генетические исследования показывают, что даже при наличии у бактериального штамма полного набора генов, кодирующих С–Р лиазу, способность разрушать фосфоновую связь в молекуле глифосата может не реализовываться. Сейчас известно, что примерно 40 % расшифрованных бактериальных геномов содержат гены, кодирующие ферменты катаболизма органических фосфонатов, однако способность утилизировать ГФ как источник фосфора установлена для ограниченного числа штаммов [3, 22, 23].

Для иллюстрации штаммовой специфичности можно привести свойства разных штаммов бактерий рода *Pseudomonas*: штамм *Pseudomonas* sp. PG2982 разлагает глифосат на саркозин и неорганический фосфат [3, 57, 60], штамм *Pseudomonas* sp. LBr – на аминотилфосфоновую кислоту (АМФК) и глиоксилат [3, 50], а штамм *Pseudomonas* sp. 4ASW имеет в своем биохимическом арсенале фосфатнезависимую С–Р лиазу с высокой скоростью разложения глифосата с образованием саркозина и неорганического фосфата [3, 58]. Бактериальные С–Р лиазы могут быть специфичны только в отношении глифосата, другие – только в отношении аминотилфосфоновой кислоты. Необходимо изучение путей катаболизма глифосата для каждого отдельного штамма-деструктора.

Штаммовая специфичность связана с различием путей катаболизма (разложения) глифосата у разных бактериальных деструкторов. В настоящее время наиболее активно обсуждаются два основных пути ферментативной трансформации глифосата. Природные микробные сообщества почвы и воды трансформируют глифосат преимущественно до АМФК и глиоксилата [3, 4, 21–23, 61]. Ключевой фермент, катализирующий разрыв С–N связи в молекуле ГФ с образованием АМФК, – глифосатоксидоредуктаза. Этот путь катаболизма наиболее распространен: *Achromobacter* sp. LW9, *Agrobacterium radiobacter* SW9, *Arthrobacter atrocyaneus* ATCC 13752, *Flavobacterium* sp. GDI [3] и др.

Другой путь катаболизма глифосата осуществляется при участии сложных ферментных С–Р-лиазных систем, которые разрушают С–Р связь с образованием саркозина и неорганического фосфата [3, 22–24, 60–63]. Следует отметить, что оба пути требуют обеспеченности кислородом, анаэробные условия могут практически остановить разложение глифосата [4].

Способность бактерий потреблять глифосат в качестве единственного источника фосфора [3, 4, 22–24] коррелирует с наличием у них С–Р-лиазной активности. К ним относятся *Bacillus* sp. [3, 52, 56], *Pseudomonas* sp. 4ASW [3, 58], *Pseudomonas* sp. PG2982 [3, 57], *Achromobacter* sp. МРК 7А [3], *Agrobacterium radiobacter* [3] и другие.

Бактерии, метаболизирующие глифосат как источник азота или углерода, встречаются значительно реже. В литературе описан мутантный штамм *Arthrobacter* sp. GLP-1/Nit [3, 22], использующий глифосат в качестве источника азота, а также штамм *Achromobacter* sp. LW9 [3, 22], способный утилизировать глифосат как источник углерода.

Некоторые штаммы бактерий способны метаболизировать глифосат двумя путями, как за счет действия глифосатоксидоредуктазы, так и за счет С–Р-лиазной активности. К ним относятся *Bacillus cereus* [3, 52, 56] и *Ochrobactrum anthropi* GPR3 [3, 22, 23].

Научная информация по функционированию сложных С–Р-лиазных ферментных систем появилась относительно недавно в работах [61–63]. Высказываются предположения, что существуют и другие возможности биологической деградации и детоксикации глифосата, отличные от известных в настоящее время путей его катаболизма. Эти вопросы пока остаются недостаточно исследованными.

Анализ литературных данных показывает, что в естественных условиях могут проявляться и действовать разные факторы: экспрессия С–Р-лиазного оперона; подавление экспрессии С–Р-лиазного оперона в присутствии фонового ортофосфата; независимость скорости утилизации глифосата от концентрации неорганического фосфата; сохранение или потеря деструктивной активности штамма бактерий при интродукции в почву и т. д. Во всех развитых странах исследования по этим вопросам находятся в начальной стадии. Много нерешенных теоретических и практических вопросов [22–24]. Некоторые штаммы, показавшие высокую активность *in vitro*, в полевых условиях оказались неэффективными [22, 23]. Это свидетельствует о необходимости тщательного изучения свойств каждого отдельного штамма, способного утилизировать глифосат.

Для снижения негативных последствий многократного применения глифосата необходима периодическая ремедиация. Внесение бактерий-деструкторов может быть эффективным приемом биодеградации ГФ и АМФК и защиты окружающей среды. Биологическая ремедиация подразумевает трансформацию загрязнителя до экологически безопасных химических соединений. Ремедиация с применением эффективных бактерий-деструкторов приемлема в экологическом отношении и не требует высоких экономических затрат.

Разработка способов микробной детоксикации глифосата является приоритетной задачей. Наиболее актуальны поиски деструкторов глифосата среди полезных ризосферных бактерий, традиционно применяемых в качестве микробных инокулянтов. Целесообразно уделять основное внимание зональным ризобактериям, приспособленным к местным экологическим условиям. В этом отношении значительный интерес для скрининга представляют зональные коллекции ризосферных бактерий.

Исследовательская коллекция Института почвоведения и агрохимии НАН Беларуси, в которой сохраняются калиймобилизующие *Bacillus* spp., фосфатрастворяющие *Pseudomonas* spp., а также азотфиксирующие бактерии двух родов – *Rhizobium* и *Azospirillum*, является перспективным объектом для скрининга. Как показал анализ научной литературы, среди представителей этих родов ризобактерий обнаружено наибольшее число деструкторов глифосата [3, 51–54]. Коллекционные ризобактерии имеют богатый метаболический потенциал: индуцируют гормональный эффект [64–66], активизируют ассоциативную и симбиотическую азотфиксацию [32, 66], способствуют потреблению разных по степени подвижности форм почвенного калия [67], повышают растворимость трехзамещенных фосфатов [64] и проявляют антагонистическую активность по отношению к корневым фитопатогенам [68]. С учетом метаболического потенциала *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Rhizobium* sp. и *Azospirillum* sp. актуально изучение их взаимодействия с глифосатом.

Проведен поэтапный скрининг сохраняемых в исследовательской коллекции ризобактерий путем их культивирования на твердых и жидких питательных средах, содержащих глифосат как единственный источник углерода, азота или фосфора. Результаты скрининга показали, что коллекционные ризобактерии метаболизуют глифосат только как источник фосфора [51–54]. Это делает их перспективными целевыми объектами для решения проблемы детоксикации гербицида и ремедиации, так как способность утилизировать глифосат как источник фосфора коррелирует с наличием С–Р-лиазной активности у ризосферных бактерий.

По результатам скрининга исследовательской коллекции отобраны перспективные штаммы *Bacillus* spp., *Pseudomonas* spp., *Rhizobium* sp. и *Azospirillum* sp. [51–54] с целью изучения процессов биодеградации глифосата, анализа и идентификации продуктов его катаболизма, а также количественной оценки деструктивной активности перечисленных ризосферных бактерий. Это

позволит отобрать эффективные зональные штаммы, способные обеспечить безопасную детоксикацию глифосата в окружающей среде. Следует отметить, что исследования по вопросам детоксикации глифосата в настоящее время значительно активизировались, однако коммерческие микробные препараты все еще не разработаны.

Заключение. Анализ отечественной и зарубежной научной литературы свидетельствует, что в современных условиях при интенсивном применении глифосатсодержащих гербицидов в растениеводстве, лесном хозяйстве, на территориях городов, в садоводстве, для очистки водоемов, а также в качестве десикантов необходима периодическая ремедиация для снижения негативных последствий многократного применения этого гербицида, восстановления биологической активности почв и получения экологической продукции. Актуальны поиски эффективных бактерий-деструкторов для детоксикации остаточных количеств глифосата и аминотетрафосфоновой кислоты. Микробная детоксикация глифосата и аминотетрафосфоновой кислоты экологически и экономически обоснована и может стать эффективным элементом биотехнологии защиты окружающей среды. Наиболее перспективны поиски деструкторов ГФ и АМФК среди представителей ризосферных бактерий, предназначенных для использования в качестве инокулянтов. Сложность проблемы детоксикации ГФ и АМФК и высокий уровень штаммовой специфичности бактериальных деструкторов сдерживает разработку коммерческих препаратов для биодеградации и детоксикации глифосата.

Список использованных источников

1. Duke, S. O. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide / S. O. Duke, S. B. Powles // *Pest Manag. Sci.* – 2008. – Vol. 64, № 4. – P. 319–325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
2. Carlisle, S. M. Glyphosate in the environment / S. M. Carlisle, J. T. Trevors // *Water, Air Soil Pollut.* – 1988. – Vol. 39. – P. 409–420. <https://doi.org/10.1007/BF00279485>
3. Recent advances in glyphosate biodegradation / H. Zhan [et al.] // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2018. – Vol. 102, № 12. – P. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>
4. Кононова, С. В. Фосфонаты и их деградация микроорганизмами / С. В. Кононова, М. А. Несмеянова // *Биохимия.* – 2002. – Т. 67, вып. 2. – С. 220–233.
5. Borggaard, O. K. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review / O. K. Borggaard, A. L. Gimsing // *Pest Manag. Sci.* – 2008. – Vol. 64, № 4. – P. 441–456. <https://doi.org/10.1002/ps.1512>
6. Bai, S. H. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination / S. H. Bai, S. M. Ogbourne // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2016. – Vol. 23, № 19. – P. 18988–19001. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7425-3>
7. Occurrence of glyphosate and AMPA in an agricultural watershed from the southeastern region of Argentina / L. Lupi [et al.] // *Sci. Total Environ.* – 2015. – Vol. 536. – P. 687–694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.090>
8. Жариков, М. Г. Эколого-токсикологическая оценка многолетнего применения глифосата на дерново-подзолистой почве и биоремедиация загрязненных территорий: дис. ... канд. биол. наук: 03.02.08 / М. Г. Жариков. – М., 2012. – 118 л.
9. Vereecken, H. Mobility and leaching of glyphosate: a review / H. Vereecken // *Pest Manag. Sci.* – 2005. – Vol. 61, № 12. – P. 1139–1151. <https://doi.org/10.1002/ps.1122>
10. Glyphosate persistence in seawater / P. Mercurio [et al.] // *Mar. Pollut. Bull.* – 2014. – Vol. 85, № 2. – P. 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.021>
11. Annett, R. Impact of glyphosate and glyphosate-based herbicides on the freshwater environment / R. Annett, H. R. Habibi, A. Hontela // *J. Appl. Toxicol.* – 2014. – Vol. 34, № 5. – P. 458–479. <https://doi.org/10.1002/jat.2997>
12. Grandcoin, A. AminoMethylPhosphonic acid (AMPA) in nature waters: its sources, behavior and environmental fate / A. Grandcoin, S. Piel, E. Baures // *Water Res.* – 2017. – Vol. 117. – P. 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.055>
13. Relevance of urban glyphosate use for surface water quality / I. Hanke [et al.] // *Chemosphere.* – 2010. – Vol. 81, № 3. – P. 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.06.067>
14. Transfer of glyphosate and its degrade AMPA to surface waters through urban sewerage systems / F. Botta [et al.] // *Chemosphere.* – 2009. – Vol. 77, № 1. – P. 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.05.008>
15. Glyphosate and AMPA in Drinking-water: background doc. for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality / World Health Organization. – Geneva: WHO, 2005. – 10 p.
16. Шувалова, Н. Е. Биотехнологические аспекты определения токсичности пестицидов на клеточных и организменных тест-системах: дис. ... канд. биол. наук: 1.5.6 / Н. Е. Шувалова. – Тверь, 2021. – 137 л.
17. Glass, R. L. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals / R. L. Glass // *J. Agric. Food Chem.* – 1987. – Vol. 35, № 4. – P. 497–500. <https://doi.org/10.1021/jf00076a013>
18. Gimsing, A. L. Competitive adsorption and desorption of glyphosate and phosphate on clay silicates and oxides / A. L. Gimsing, O. K. Borggaard // *Clay Minerals.* – 2002. – Vol. 37, № 3. – P. 509–515. <https://doi.org/10.1180/0009855023730049>

19. Glyphosate sorption in soils of different pH and phosphorus content / H. de Jonge [et al.] // *Soil Sci.* – 2001. – Vol. 166, № 4. – P. 230–238. <https://doi.org/10.1097/00010694-200104000-00002>
20. The influence of organic matter on sorption and fate of glyphosate in soil – comparing different soils and humic substances / C. N. Albers [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2009. – Vol. 157, № 10. – P. 2865–2870. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.004>
21. Шушкова, Т. В. Биодеструкция глифосата почвенными бактериями: дис. ... канд. биол. наук: 03.01.06 / Т. В. Шушкова. – Пушино, 2010. – 128 л.
22. Микробная деградация гербицида глифосата (обзор) / А. В. Свиридов [и др.] // *Приклад. биохимия и микробиология.* – 2015. – Т. 51, вып. 2. – С. 183–190. <https://doi.org/10.7868/S0555109915020221>
23. Биодegradация фосфорорганических загрязнителей почвенными бактериями: биохимические аспекты и нерешенные проблемы / А. В. Свиридов [и др.] // *Биотехнология.* – 2020. – Т. 36, № 4. – С. 126–135. <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
24. Ермакова, И. Т. Микробная деструкция органофосфонатов почвенными бактериями / И. Т. Ермакова, Т. В. Шушкова, А. А. Леонтьевский // *Микробиология.* – 2008. – Т. 77, № 5. – С. 689–695.
25. Al-Rajab, A. J. Degradation of ¹⁴C-glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in three agricultural soils / A. J. Al-Rajab, M. Schiavon // *J. Environ. Sci.* – 2010. – Vol. 22, № 9. – P. 1374–1380. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(09\)60264-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(09)60264-3)
26. Effects of repeated glyphosate applications on soil microbial community composition and the mineralization of glyphosate / S. H. Lancaster [et al.] // *Pest Manag. Sci.* – 2010. – Vol. 66, № 1. – P. 59–64. <https://doi.org/10.1002/ps.1831>
27. Сорбция глифосата и его микробная деградация в почвенных суспензиях / Т. В. Шушкова [и др.] // *Приклад. биохимия и микробиология.* – 2009. – Т. 45, № 6. – С. 664–669.
28. Ratcliff, A. W. Changes in microbial community structure following herbicide (glyphosate) additions to forests soils / A. W. Ratcliff, M. D. Busse, C. J. Shestak // *Appl. Soil Ecol.* – 2006. – Vol. 34, № 2–3. – P. 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.03.002>
29. Glyphosate toxicity and the effects of long term vegetation control on soil microbial communities / M. Busse [et al.] // *Soil Biol. Biochem.* – 2001. – Vol. 33, № 12–13. – P. 1777–1789. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00103-1)
30. Железова, А. Д. Изменение функциональных и структурных характеристик прокариотного сообщества почв под воздействием гербицида глифосата: автореф. дис. ... канд. биол. наук: 03.02.03 / А. Д. Железова. – М., 2018. – 20 с.
31. Glyphosate suppresses the antagonistic effect of *Enterococcus* spp. on *Clostridium botulinum* / M. Krüger [et al.] // *Anaerobe.* – 2013. – Vol. 20. – P. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2013.01.005>
32. Zablotowicz, R. M. Impact of glyphosate on *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview / R. M. Zablotowicz, K. N. Reddy // *J. Environ. Qual.* – 2004. – Vol. 33, № 3. – P. 825–831. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0825>
33. Sannino, F. Pesticide influence on soil enzymatic activities / F. Sannino, L. Gianfreda // *Chemosphere.* – 2001. – Vol. 45, № 4–5. – P. 417–445. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(01\)00045-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00045-5)
34. Haslam, E. The shikimate pathway: biosynthesis of natural products series / E. Haslam. – London: Butterworths, 1974. – 316 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04212-0>
35. Chaufan, G. Glyphosate commercial formulation causes cytotoxicity, oxidative effects, and apoptosis on human cells: differences with its active ingredient / G. Chaufan, I. Coalova, M. de Molina // *Int. J. Toxicol.* – 2014. – Vol. 33, № 1. – P. 29–38. <https://doi.org/10.1177/1091581813517906>
36. Benachour, N. Glyphosate formulations induce apoptosis and necrosis in human umbilical, embryonic, and placental cells / N. Benachour, G. Séralini // *Chem. Res. Toxicol.* – 2009. – Vol. 22, № 1. – P. 97–105. <https://doi.org/10.1021/tx800218n>
37. Séralini, G. Differential Effects of Glyphosate and Roundup on Human Placental Cells and Aromatase / G. Séralini, S. Moslemi // *Molecular and Cellular Endocrinology.* – 2018. – Vol. 178 (1–2). – P. 117–131. [https://doi.org/10.1016/S0303-7207\(01\)00433-6](https://doi.org/10.1016/S0303-7207(01)00433-6)
38. Glyphosate-based herbicides are toxic and endocrine disruptors in human cell lines / C. Gasnier [et al.] // *Toxicology.* – 2009. – Vol. 262, № 3. – P. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.06.006>
39. Kwiatkowska, M. The effect of metabolites and impurities of glyphosate on human erythrocytes (*in vitro*) / M. Kwiatkowska, B. Huras, B. Bukowska // *Pestic. Biochem. Physiol.* – 2014. – Vol. 109. – P. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.01.003>
40. Detection of glyphosate residues in animals and humans / M. Krüger [et al.] // *J. Environ. Anal. Toxicol.* – 2014. – Vol. 4, № 2. – Art. 210. <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000210>
41. Samsel, A. Glyphosate suppression of cytochrome P450 enzymes and amino acid biosynthesis by the gut microbiome: pathways to modern diseases / A. Samsel, S. Seneff // *Entropy.* – 2013. – Vol. 15, № 4. – P. 1416–1463. <https://doi.org/10.3390/e15041416>
42. Glyphosate is an inhibitor of plant cytochrome P450: functional expression of *Thlaspi arvensae* cytochrome P45071B1/reductase fusion protein in *Escherichia coli* / D. C. Lamb [et al.] // *Biochem. Biophys. Res. Commun.* – 1998. – Vol. 244, № 1. – P. 110–114. <https://doi.org/10.1006/bbrc.1997.7988>
43. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the Agricultural Health Study / A. J. De Roos [et al.] // *Environ. Health Perspect.* – 2005. – Vol. 113, № 1. – P. 49–54. <https://doi.org/10.1289/ehp.7340>
44. DNA and chromosomal damage induced in fish (*Anguilla anguilla* L.) by aminomethylphosphonic acid (AMPA) – the major environmental breakdown product of glyphosate / S. Guilherme [et al.] // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2014. – Vol. 21, № 14. – P. 8730–8739. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2803-1>

45. Acute and chronic toxicity of glyphosate compounds to glochidia and juveniles of *Lampsilis siliquoidea* (unionidae) / R. B. Bringolf [et al.] // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2007. – Vol. 26, № 10. – P. 2094–2100. <https://doi.org/10.1897/06-519R1.1>
46. Relyea, R. A. The lethal impact of Roundup on aquatic and terrestrial amphibians / R. A. Relyea // *Ecol. Appl.* – 2005. – Vol. 15, № 4. – P. 1118–1124. <https://doi.org/10.1890/04-1291>
47. Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations / M. Gaupp-Berghausen [et al.] // *Sci. Rep.* – 2015. – Vol. 5. – Art. 12886. <https://doi.org/10.1038/srep12886>
48. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water / M. L. Ruepple [et al.] // *J. Agric. Food. Chem.* – 1977. – Vol. 25, № 3. – P. 517–528. <https://doi.org/10.1021/jf60211a018>
49. Balthazor, T. M. Glyphosat-degrading microorganisms from industrial activated sludge / T. M. Balthazor, L. E. Hallas // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1986. – Vol. 51, № 2. – P. 432–434. <https://doi.org/10.1128/aem.51.2.432-434.1986>
50. Metabolism of glyphosate in *Pseudomonas* sp. strain Lbr / G. S. Jacob [et al.] // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1988. – Vol. 54, № 12. – P. 2953–2958. <https://doi.org/10.1128/aem.54.12.2953-2958.1988>
51. Скрининг зональных изолятов *Pseudomonas* sp. по устойчивости к глифосату и его утилизации как источника углерода и фосфора / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2021. – № 2 (67). – С. 35–48.
52. Скрининг способности калиймобилизующих ризобактерий метаболизировать гербицид глифосат / Н. А. Михайловская [и др.] // *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)
53. Скрининг азотфиксирующих бактерий по способности метаболизировать гербицид глифосат как источник фосфора / Н. А. Михайловская [и др.] // *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)
54. Скрининг фосфатрастворяющих ризобактерий *Pseudomonas* spp. по активности культурального роста в зависимости от содержания глифосата в жидкой среде Дворкина-Фостера / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2023. – № 1 (70). – С. 136–148.
55. Quinn, J. P. Carbon-phosphorus bond cleavage by Gram-positive and Gram-negative soil bacteria / J. P. Quinn, J. M. Peden, R. E. Dick // *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 1989. – Vol. 31, № 3. – P. 283–287. <https://doi.org/10.1007/BF00258410>
56. Isolation, identification and characterization of a glyphosate-degrading bacterium, *Bacillus cereus* CB4, from soil / J. Fan [et al.] // *J. Gen. Appl. Microbiol.* – 2012. – Vol. 58, N 4. – P. 263–271. <https://doi.org/10.2323/jgam.58.263>
57. Kishore, G. M. Degradation of glyphosate by *Pseudomonas* sp. PG2982 via a sarcosine intermediate / G. M. Kishore, G. S. Jacob // *J. Biol. Chem.* – 1987. – Vol. 262, № 25. – P. 12164–12168. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)45331-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)45331-8)
58. Dick, R. E. Control of glyphosate uptake and metabolism in *Pseudomonas* sp. 4ASW / R. E. Dick, J. P. Quinn // *FEMS Microbiol. Lett.* – 1995. – Vol. 134, № 2–3. – P. 177–182. [https://doi.org/10.1016/0378-1097\(95\)00400-9](https://doi.org/10.1016/0378-1097(95)00400-9)
59. Degradation of the herbicide glyphosate by members of the family *Rhizobiaceae* / C. M. Liu [et al.] // *Appl. Environ. Microbiol.* – 1991. – Vol. 57, № 6. – P. 1799–1800. <https://doi.org/10.1128/aem.57.6.1799-1804.1991>
60. Li, H. Degradation and isotope source tracking of glyphosate and aminomethylphosphonic acid / H. Li, S. R. Joshi, D. P. Jaisi // *J. Agric. Food. Chem.* – 2016. – Vol. 64, № 3. – P. 529–538. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04838>
61. Kamat, S. S. The enzymatic conversion of phosphonates to phosphate by bacteria / S. S. Kamat, F. M. Raushel // *Curr. Opin. Chem. Biol.* – 2013. – Vol. 17, № 4. – P. 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.06.006>
62. 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 // *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* – 2014. – Vol. 78, № 1. – P. 176–197. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00040-13>
63. White, A. K. Two C–P lyase operons in *Pseudomonas stutzeri* and their roles in the oxidation of phosphonates, phosphate, and hypophosphite / A. K. White, W. W. Metcalf // *J. Bacteriol.* – 2004. – Vol. 186, № 14. – P. 4730–4739. <https://doi.org/10.1128/JB.186.14.4730-4739.2004>
64. Активность фосфатмобилизации у ризобактерий / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2007. – № 1 (38). – С. 225–231.
65. Влияние фосфатмобилизующих бактерий на ростовые процессы, урожайность и фитопатологическое состояние посевов зерновых культур на дерново-подзолистых супесчаных почвах / Н. А. Михайловская [и др.] // *Почвоведение и агрохимия.* – 2012. – № 1 (48). – С. 136–149.
66. Михайловская, Н. А. Азоспириллы и их влияние на злаковые культуры (обзор литературы) / Н. А. Михайловская // *Почвоведение и агрохимия.* – 2015. – № 2 (55). – С. 167–181.
67. Михайловская, Н. А. Количественная оценка активности калиймобилизующих бактерий и их эффективность на посевах озимой ржи / Н. А. Михайловская // *Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук.* – 2006. – № 3. – С. 41–46.
68. Михайловская, Н. А. Антагонистическая активность ризобактерий *A. brasilense* и *B. circulans* по отношению к фитопатогенным микромицетам pp. *Fusarium* и *Alternaria* / Н. А. Михайловская, Т. Б. Барашенко // *Почвоведение и агрохимия.* – 2019. – № 1 (62). – С. 234–244.

References

1. Duke S. O., Powles S. B. Glyphosate: a-once-in-a century herbicide. *Pest Management Science*, 2008, vol. 64, no. 4, pp. 319–325. <https://doi.org/10.1002/ps.1518>
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. Zhan H., Feng Y., Fan X., Chen S. Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, vol. 102, no. 12, pp. 5033–5043. <https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0>

4. Kononova S. V., Nesmeyanova M. A. Phosphonates and their degradation by microorganisms. *Biokhimiya* [Biochemistry], 2002, vol. 67, no. 2, pp. 220–233 (in Russian).
5. Borggaard O. K., Gimsing A. L. Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: a review. *Pest Management Science*, 2008, vol. 64, no. 4, pp. 441–456. <https://doi.org/10.1002/ps.1512>
6. Bai S. H., Ogbourne S. M. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, vol. 23, no. 19, pp. 18988–19001. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7425-3>
7. Lupi L., Miglioranza K. S. B., Aparicio V. C., Marino D., Bedmar F., Wunderlin D. A. Occurrence of glyphosate and AMPA in an agricultural watershed from the southeastern region of Argentina. *Science of the Total Environment*, 2015, vol. 536, pp. 687–694. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.090>
8. Zharikov M. G. *Ecological and toxicological assessment of long-term use of glyphosate on sod-podzolic soil and bioremediation of contaminated areas*. Moscow, 2012. 118 p. (in Russian).
9. Vereecken H. Mobility and leaching of glyphosate: a review. *Pest Management Science*, 2005, vol. 61, no. 12, pp. 1139–1151. <https://doi.org/10.1002/ps.1122>
10. Mercurio P., Flores F., Mueller J. F., Carter S., Negri A. P. Glyphosate persistence in seawater. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, vol. 85, no. 2, pp. 385–390. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.01.021>
11. Annett R., Habibi H. R., Hontela A. Impact of glyphosate and glyphosate-based herbicides on the freshwater environment. *Journal of Applied Toxicology*, 2014, vol. 34, no. 5, pp. 458–479. <https://doi.org/10.1002/jat.2997>
12. Grandcoin A., Piel S., Baures E. AminoMethylPhosphonic acid (AMPA) in nature waters: its sources, behavior and environmental fate. *Water Research*, 2017, vol. 117, pp. 187–197. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.055>
13. Hanke I., Wittmer I., Bischofberger S., Stamm C., Singer H. Relevance of urban glyphosate use for surface water quality. *Chemosphere*, 2010, vol. 81, no. 3, pp. 422–429. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.06.067>
14. Botta F., Lavison G., Couturier G., Alliot F., Moreau-Guigon E., Fauchon N., Guery B., Chevreuil M., Blanchoud H. Transfer of glyphosate and its degrade AMPA to surface waters through urban sewerage systems. *Chemosphere*, 2009, vol. 77, no. 1, pp. 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.05.008>
15. *Glyphosate and AMPA in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva, World Health Organization, 2005. 10 p.
16. Shuvalova N. E. *Biotechnological aspects of pesticide toxicity determination on cellular and organismal test systems*. Tver, 2021. 137 p. (in Russian).
17. Glass R. L. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1987, vol. 35, no. 4, pp. 497–500. <https://doi.org/10.1021/jf00076a013>
18. Gimsing A. L., Borggaard O. K. Competitive adsorption and desorption of glyphosate and phosphate on clay silicates and oxides. *Clay Minerals*, 2002, vol. 37, no. 3, pp. 509–515. <https://doi.org/10.1180/0009855023730049>
19. Jonge H. de, Jonge L. W. de, Jacobsen O. H., Yamaguchi T., Moldrup P. Glyphosate sorption in soils of different pH and phosphorus content. *Soil Science*, 2001, vol. 166, no. 4, pp. 230–238. <https://doi.org/10.1097/00010694-200104000-00002>
20. Albers C. N., Banta G. T., Hansen P. E., Jacobsen O. S. The influence of organic matter on sorption and fate of glyphosate in soil – comparing different soils and humic substances. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, no. 10, pp. 2865–2870. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.04.004>
21. Shushkova T. V. *Biodegradation of glyphosate by soil bacteria*. Pushchino, 2010. 128 p. (in Russian).
22. 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>
23. 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. *Biotekhnologiya = Biotechnology*, 2020, vol. 36, no. 4, pp. 126–135 (in Russian). <https://doi.org/10.21519/0234-2758-2020-36-4-126-135>
24. Ermakova I. T., Shushkova T. V., Leontievskii A. A. Microbial degradation of organophosphonates by soil bacteria. *Microbiology*, 2008, vol. 77, no. 5, pp. 615–620. <https://doi.org/10.1134/s0026261708050160>
25. Al-Rajab A. J., Schiavon M. Degradation of ¹⁴C-glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in three agricultural soils. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, vol. 22, no. 9, pp. 1374–1380. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(09\)60264-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(09)60264-3)
26. Lancaster S. H., Hollister E. B., Senseman S. A., Gentry T. J. Effects of repeated glyphosate applications on soil microbial community composition and the mineralization of glyphosate. *Pest Management Science*, 2010, vol. 66, no. 1, pp. 59–64. <https://doi.org/10.1002/ps.1831>
27. Shushkova T. V., Ermakova I. T., Leontievsky A. A., Vasilieva G. K. Sorption and microbial degradation of glyphosate in soil suspensions. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2009, vol. 45, no. 6, pp. 599–603. <https://doi.org/10.1134/s0003683809060040>
28. Ratcliff A. W., Busse M. D., Shestak C. J. Changes in microbial community structure following herbicide (glyphosate) additions to forests soils. *Applied Soil Ecology*, 2006, vol. 34, no. 2–3, pp. 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2006.03.002>
29. Busse M., Ratcliff A. W., Shestak C. J., Powers R. F. Glyphosate toxicity and the effects of long term vegetation control on soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, vol. 33, no. 12–13, pp. 1777–1789. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00103-1](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00103-1)
30. Zhelezova A. D. *Changes in the functional and structural characteristics of the prokaryotic community of soils under the influence of the herbicide glyphosate*. Moscow, 2018. 20 p. (in Russian).

31. Krüger M., Shehata A. A., Schrödl W., Rodloff A. Glyphosate suppresses the antagonistic effect of *Enterococcus* spp. on *Clostridium botulinum*. *Anaerobe*, 2013, vol. 20, pp. 74–78. <https://doi.org/10.1016/j.anaerobe.2013.01.005>
32. Zablutowicz R. M., Reddy K. N. Impact of glyphosate on *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. *Journal of Environmental Quality*, 2004, vol. 33, no. 3, pp. 825–831. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0825>
33. Sannino F., Gianfreda L. Pesticide influence on soil enzymatic activities. *Chemosphere*, 2001, vol. 45, no. 4–5, pp. 417–445. [https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(01\)00045-5](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(01)00045-5)
34. Haslam E. *The shikimate pathway: biosynthesis of natural products series*. London, Butterworths, 1974. 316 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-04212-0>
35. Chaufan G., Coalova I., Molina M. de. 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>
36. Benachour N., Seralini G. Glyphosate formulations induce apoptosis and necrosis in human umbilical, embryonic, and placental cells. *Chemical Research in Toxicology*, 2009, vol. 22, no. 1, pp. P. 97–105. <https://doi.org/10.1021/tx800218n>
37. Seralini G., Moslemi S. Differential Effects of Glyphosate and Roundup on Human Placental Cells and Aromatase. *Molecular and Cellular Endocrinology*, 2018, vol. 178, no. 1–2, pp. 117–131. [https://doi.org/10.1016/S0303-7207\(01\)00433-6](https://doi.org/10.1016/S0303-7207(01)00433-6)
38. Gasnier C., Dumont C., Benachour N., Clair E., Chagnon M.-C., Seralini G.-E. Glyphosate-based herbicides are toxic and endocrine disruptors in human cell lines. *Toxicology*, 2009, vol. 262, no. 3, pp. 184–191. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.06.006>
39. Kwiatkowska M., Huras B., Bukowska B. The effect of metabolites and impurities of glyphosate on human erythrocytes (*in vitro*). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2014, vol. 109, pp. 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.01.003>
40. Krüger M., Schledorn P., Schrödl W., Hoppe H.-W., Lutz W., Shehata A. A. Detection of glyphosate residues in animals and humans. *Journal of Environmental & Analytical Toxicology*, 2014, vol. 4, no. 2, art. 210. <https://doi.org/10.4172/2161-0525.1000210>
41. Samsel A., Seneff S. Glyphosate suppression of cytochrom P450 enzymes and amino acid biosynthesis by the gut microbiome: pathways to modern diseases. *Entropy*, 2013, vol. 15, no. 4, pp. 1416–1463. <https://doi.org/10.3390/e15041416>
42. Lamb D. C., Kelly D. E., Hanley S. Z., Mehmood Z., Kelly S. L. Glyphosate is an inhibitor of plant cytochrome P450: functional expression of *Thlaspi arvensae* cytochrome P45071B1/reductase fusion protein in *Escherichia coli*. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1998, vol. 244, no. 1, pp. 110–114. <https://doi.org/10.1006/bbrc.1997.7988>
43. De Roos A. J., Blair A., Rusiecki J. A., Hoppin J. A., Svec M., Dosemeci M., Sandler D. P., Alavanja M. C. Cancer incidence among glyphosate-exposed pesticide applicators in the Agricultural Health Study. *Environmental Health Perspectives*, 2005, vol. 113, no. 1, pp. 49–54. <https://doi.org/10.1289/ehp.7340>
44. Guilherme S., Santos M. A., Gaivão I., Pacheco M. DNA and chromosomal damage induced in fish (*Anguilla anguilla* L.) by aminomethylphosphonic acid (AMPA) – the major environmental breakdown product of glyphosate. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, vol. 21, no. 14, pp. 8730–8739. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2803-1>
45. Bringolf R. B., Cope W. G., Mosher S., Barnhart M. C., Shea D. Acute and chronic toxicity of glyphosate compounds to glochidia and juveniles of *Lampsilis siliquoidea* (unionidae). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, vol. 26, no. 10, pp. 2094–2100. <https://doi.org/10.1897/06-519R1.1>
46. Relyea R. A. The lethal impact of Roundup on aquatic and terrestrial amphibians. *Ecological Applications*, 2005, vol. 15, no. 4, pp. 1118–1124. <https://doi.org/10.1890/04-1291>
47. Gaupp-Berghausen M., Hofer M., Rewald B., Zaller J. G. Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, art. 12886. <https://doi.org/10.1038/srep12886>
48. Ruepple M. L., Brightwell B. B., Schaefer J., Marvel J. T. Metabolism and degradation of glyphosate in soil and water. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1977, vol. 25, no. 3, pp. 517–528. <https://doi.org/10.1021/jf60211a018>
49. Balthazor T. M., Hallas L. E. Glyphosate-degrading microorganisms from industrial activated sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, 1986, vol. 51, no. 2, pp. 432–434. <https://doi.org/10.1128/aem.51.2.432-434.1986>
50. Jacob G. S., Garbow J. R., Hallas L. E., Kimack N. M., Kishore G. M., Schaefer J. Metabolism of glyphosate in *Pseudomonas* sp. strain Lbr. *Applied and Environmental Microbiology*, 1988, vol. 54, no. 12, pp. 2953–2958. <https://doi.org/10.1128/aem.54.12.2953-2958.1988>
51. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dyusova S. V. Screening of zonal isolates *Pseudomonas* sp. tolerance to glyphosate and its utilization as a source of carbon and phosphorus. *Pochvovedenie i agrokimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2021, no. 2 (67), pp. 35–48 (in Russian).
52. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dyusova S. V. Screening the capability of potassium mobilizing rhizobacteria to metabolise herbicide glyphosate. *Pochvovedenie i agrokimiya* [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)
53. Mikhailouskaya 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 agrokimiya* [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)
54. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnikskaya T. V., Dyusova S. V. Screening of phosphorus solubilizing rhizosphere bacteria *Pseudomonas* spp. growth activity cultural in dependence on glyphosate content in liquid Dworkin-Foster medium. *Pochvovedenie i agrokimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2023, no. 1 (70), pp. 136–148 (in Russian).

55. Quinn J. P., Peden J. M., Dick R. E. Carbon-phosphorus bond cleavage by Gram-positive and Gram-negative soil bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1989, vol. 31, no. 3, pp. 283–287. <https://doi.org/10.1007/BF00258410>
56. Fan J., Yang G., Zhao H., Shi G., Geng Y., Hou T., Tao K. Isolation, identification and characterization of a glyphosate-degrading bacterium, *Bacillus cereus* CB4, from soil. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 2012, vol. 58, no. 4, pp. 263–271. <https://doi.org/10.2323/jgam.58.263>
57. Kishore G. M., Jacob G. S. Degradation of glyphosate by *Pseudomonas* sp. PG2982 via a sarcosine intermediate. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, vol. 262, no. 25, pp. 12164–12168. [https://doi.org/10.1016/s0021-9258\(18\)45331-8](https://doi.org/10.1016/s0021-9258(18)45331-8)
58. Dick R. E., Quinn J. P. Control of glyphosate uptake and metabolism in *Pseudomonas* sp. 4ASW. *FEMS Microbiology Letters*, 1995, vol. 134, no. 2–3, pp. 177–182. [https://doi.org/10.1016/0378-1097\(95\)00400-9](https://doi.org/10.1016/0378-1097(95)00400-9)
59. Liu C.-M., McLean P. A., Sookdeo C. C., Cannon F. C. Degradation of the herbicide glyphosate by members of the family *Rhizobiaceae*. *Applied and Environmental Microbiology*, 1991, vol. 57, no. 6, pp. 1799–1804. <https://doi.org/10.1128/aem.57.6.1799-1804.1991>
60. Li H., Joshi S. R., Jaisi D. P. Degradation and isotope source tracking of glyphosate and aminomethylphosphonic acid. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, vol. 64, no. 3, pp. 529–538. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b04838>
61. 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>
62. 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>
63. White A. K., Metcalf W. W. Two C–P lyase operons in *Pseudomonas stutzeri* and their roles in the oxidation of phosphonates, phosphate, and hypophosphite. *Journal of Bacteriology*, 2004, vol. 186, no. 14, pp. 4730–4739. <https://doi.org/10.1128/JB.186.14.4730-4739.2004>
64. 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).
65. Mikhailovskaya N. A., Bogdevitch I. M., Mikanova O., Tarasiuk E. G., Barashenko T. B., Duysova S. V., Pogirnit-skaya T. V. Influence of phosphorus-mobilizing bacteria on growth, yield and phytopathology state of cereal crop growings on luvisol loamy sand soils. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2012, no. 1 (48), pp. 136–149 (in Russian).
66. Mikhailovskaya N. A. Azospirillum spp. and their influence on grain crop (review). *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2015, no. 2 (55), pp. 167–181 (in Russian).
67. Mikhailovskaya N. A. Quantitative estimation of the K-mobilizing bacteria activity and application for winter rye growing. *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).
68. Mikhailovskaya N. A., Barashenko T. B. Antagonistic activity of rhizobacteria *A. brasilense* и *B. circulans* in respect of pathogenic fungi *Fusarium* и *Alternaria* spp. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2019, no. 1 (62), pp. 234–244 (in Russian).

Информация об авторе

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

Information about the author

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