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 бактерий-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 биодеградации 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, бактерии-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

© Михайловская Н. А., 2024

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. Gliphosate 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

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 метаболического 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, pH 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. Скрябина РАН, где проводятся развер-

В последние десятилетия число научных публикаций, подтверждающих негативный экологический эффект и токсическое действие глифосата и аминометилфосфоновой 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 аминометилфосфоновая 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 аминометилфосфоновой 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

g_dhglZdlbjh\Z\rb_ k wlbf]_j[bpb^hf > í @ >_kljmdlhju]ebn
^b]jZfhljbpZl_evguo b]jZfiheh`bl_evguo [Zdl_jbc ohly]_gu dh^
qZs_ h[gZjm`b\Zxlky m]jZfhljbpZl_evguo [Zdl_jbc > @- Wlb nZ
]Zlv qlh kihkh[ghklv jZajmrZlv nhknhgh\mx K±J k\yav b jZaeZ]Zlv
y\ey_lky w\hexpbhgghc Kms_kl\mxl ijbjh^gu_ hj]Zgbq_kdb_ nhknh
ihg_glu de_lhd nhjfu aZiZkZgby nhknhjZ f_oZgbaf mlbebaZpbb d
[hlZg GZ wlhf hkgh\Zgbb ij_^iheZ]Z_lky [he__ rbjhdh_ jZkijhkljZg
kljmdlhjh\ hj]Zgbq_kdbo nhknhgZlh\ > @

RlZffh\Zy ki_pbnbqghklb Kihkh[ghklv d [bh^_]jZ^Zpbb]ebnhkZlZ \ ihq_
jm`_gZ m [Zdl_jbc jZ%aguFd>QhO^xhW@3VHXGRP>RQDV @$UWKUREDFWH
> @$]RVSLU>LQ@5KXJPRE>LXP @$FKURPRE@DFWHUEDF>WH@QUHXUPRE@DFWHU
2FKUREDF>WH@U^XPH^gZdh g_kfhljy gZ Zdlb\gu_ bkke_^h\Zgby \ wlh
f_jq_kdb_ ij_iZjZlu ^ey [_ahiZkghc ^_lhdkbdZpbb]ebnhkZlZ ihdZ gb

H^ghc ba ijbqbg dhlhjmx hlf_qZ_l [hevrbgkl\h bkke_^h\Zl_e_c y
rlZffh\hc ki_pbnbqghklb Kihkh[ghklv d jZajmr_gbx nhknhgh\hc K
ebrv m hl^_evguo ij_^klZ\bl_e_c kj_^b [Zdl_jbc h^gh]h jh^Z Kh\
bkke_^h\Zgby ihdZau\Zxl qlh ^Z`_ ijb gZebqbb m [Zdl_jbZevgh]h
]_gh\ dh^bjmxsbo K±J ebZam kihkh[ghklv jZajmrZlv nhknhgh\mx k
fh`_l g_ j_Zebah\u\Zlvky K_cqZk ba_klgZkrdhjhi\Zgguo [Zdl_jbZev
guo]_ghfh\ kh^_j`Zl]_gu dh^bjmxsb_ n_jf_glu dZlZ[hebafZ hj]Zgb
gZdh kihkh[ghklv mlbebabjh\Zlv =N dZd bklhqgbd nhknhjZ-mklZgh\e
eZ rlZffh\ > @

>ey beexkljZpbb rlZffh\hc ki_pbnbqghklb fh`gh ijb_klb k\hckl\Z
[Zdl_jbc 3hVHZXGRPnRZfBVHXGRVPSQDVjZaeZ]Z_l]ebnhkZl gZ kZjdha
hj]Zgbq_kdbc nhknZl@>Zff 3VHXGRPVSQ<DV± gZ Zfbghf_lbenhknhgh\m
dbkehlm :FND b]ebhd@kbeZZrlZVHXGRPVSQ6:V bf__l \ k\h_f [bh
fbq_kdhf Zjk_gZe_ nhknZlgK±aJZebkZbafmxk \ukhdhc kdhjhklvx jZaeh`_g
c h[jaZh\Zgb_f kZjdhabgZ b g_hj]Zg>bq_k@dZjdhl_nbkZeZlZu_ K±J ebZau fl
[ulv ki_pbnbqgu lhevdh \ hlghr_gbb]ebnhkZlZ ^jm]b_ ± lh-evdh \ hl
nhgh\hc dbkehlu G_h[oh^bfh bamq_gb_ iml_c dZlZ[hebafZ]ebnhkZ
rlZffZ ^_kljmdlhjZ

RlZffh\Zy ki_pbnbkqyahZkgZ k jZaebqb_f iml_c dZlZ[hebafZ jZaeh`
m jZaguo [Zdl_jbZevguo ^_kljmdlhjh\ < gZklhys__ \j_fy gZb[he__
hkgh\guo imlb n_jf_glZlb\ghc ljZgknhjfZpbb]ebnhkZlZ ljbjh^gu_ f
ihq\u b \h^u ljZgknhjfbjmxl]ebnhkZl ij_bfms_kl_ggh ^h :FND b]ebl
@ Dexq_\hc n_jf_gl dZlZebabjNmxkyabjZafhue_k±me_ =N k h[jZah\
:FND ±]ebnhkZlhdkb^hj_^mdlZaZ Wlhl imlv dZlZ[hebafZ $aFkZUgRZPbR[he__
EDFWHU $JUREDFWDHGULRXPDF$WHWKURDEVDFWHUDQCHXV)ODYREDFWH
ULXVPS', > @ b ^j

>jm]hc imlv dZlZ[hebafZ]ebnhkZlZ hkms_kl\ey_lky ijb mqZklbb
K±JebZaguo kbkl_f dhlhju_ jZajmrZxl K±J k\yav k h[jZah\Zgb_f kZjd
nhknZlZ > ±@ Ke_^m_l hlf_lblv qlh h[Z imlb lj_[mxl h[_ki_q_ggh
ZgZwjh[gu_ mkeh\by fh]ml ijZdlbq_kdb hklZgh\blv jZaeh`_gb_]ebn

Kihkh[ghklv [Zdl_jbc ihlj_[eylv]ebnhkZl \ dZq_kl_ _^bgkl_ggl
jZ > ± @ dhjj_ebjm_l k gZebqbZ_agmcgZbdlK±gJhklb D %bDFhLQghkylk
OXWS> 3V@HXGRPVSQ6:V > @VHXGRPVSQDV > @FKURPREDF
WHVSD3.7A > @JUREDFWDHGULRXPD@WHUjm]b_

;Zdl_jbb f_lZ[hebabjmxsb_]ebnhkZl dZd bklhqgbd ZahlZ beb m
qbl_evgh j_`_ < ebl_jZlmj_ hibkZg$fUWZkgURVESDF3WDHtU > - @ bk
ihevamxsbc]ebnhkZl \ dZq_kl_ bklhqgbd$ZFkZaRPZRVESDFZWH_UrlZ@ff
kihkh[guc mlbebabjh\Zlv bjkbhmqhkbZdmZe_jh^Z

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 аминометилфосфоновой кислоты. Микробная детоксикация глифосата и аминометилфосфоновой 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. Шуш-кова. – Пущино, 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. Биодеградация 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 ^{14}C-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

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

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

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

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 supression of cytochrom 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 / D P S V V L O O L V T X R L G H / D R. B. Bringolf [et al.] // Environ. Toxico. 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 3 V H X G R 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 3 V H X G R 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

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

54. Скрининг фосфатрастворяющих ризобактерий 3 V H X G R sp. 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, % D F L O O X V sp. from soil / X V 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 3 V H X G R sp. 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

58. Dick, R. E. Control of glyphosate uptake and metabolism in 3 V H X G R sp. / 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

59. Degradation of the herbicide glyphosate by members of the family 5 K L] R E L / D. F. Hallas [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 3 V H X G R P R Q D G [H L U 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. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2006. – № 3. – С. 41–46.

68. Михайловская, Н. А. Антагонистическая активность ризобактерий *A* E U D V L Q H F R O L Q F R Q G L Q V. по отношению к фитопатогенным микромицетам pp.) X V D U L X P Н Т Q D. / 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. 3 H V W 0 D Q D J H P 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. : D W H U $ L U Q G 1988, vol. 39, no. 4, pp. 409–420. https://doi.org/10.1007/BF00279485

3. Zhan H., Feng Y., Fan X., Chen S. Recent advances in glyphosate biodegradation. $ S S O L H G 0 L F U R E L R O R J \ % L R W H F 2018, vol. 102, no. 12, pp. 5033–5043. https://doi.org/10.1007/s00253-018-9035-0

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. Zablotowicz 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

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. Séralini 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

38. Gasnier C., Dumont C., Benachour N., Clair E., Chagnon M.-C., Séralini 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 supression 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. Glyphosat-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., Pogirnitskaya 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 agrokhimiya* [Soil Science and Agrochemistry], 2021, no. 2 (67), pp. 35–48 (in Russian).

52. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnitskaya T. V., Dyusova 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

53. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnitskaya T. V., Dyusova S. V. Screening the capability of nitrogen fixing bacteria to metabolise herbicide glyphosate as a sourse 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

54. Mikhailouskaya N. A., Barashenko T. B., Pogirnitskaya T. V., Dyusova S. V. Screening of phosporus solubilizing rhizospfere bacteria *Pseudomonas* spp. growth activity cultural in dependence on glyphosate content in liquid Dworkin-Foster medium. *Pochvovedenie i agrokhimiya* [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

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

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. Mikhailouskaya N. A., Bogdevitch I. M., Mikanova O., Tarasiuk E. G., Barashenko T. B., Duysova S. V., Pogirnitskaya 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. Mikhailouskaya 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. Mikhailouskaya – 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