

Научная статья

УДК 632.95:631.461/.466

DOI: 10.25230/2412-608X-2024-4-200-132-140

Влияние пестицидов на почвенную микрофлору (обзор)

Сергей Анатольевич Семеренко

Надежда Анатольевна Бушнева

ФГБНУ ФНЦ ВНИИМК

350038, Россия, г. Краснодар, ул. им. Филатова, д. 17

Тел.: (861) 275-78-45

protection@vniimk.ru

Аннотация. Почва – это не только важнейший компонент экосистемы, где создаются особые условия обитания для бактерий, грибов, актиномицетов, водорослей и других микроорганизмов, составляющих почвенную микрофлору, но и средство растениеводства. Как известно, современное сельскохозяйственное производство было бы невозможно без использования химических пестицидов, которые составляют основу современной защиты растений. В настоящее время чрезмерное использование удобрений и пестицидов не только загрязняет почву, но и влияет на ее качество и снижает биоразнообразие почвенного профиля. Исследование взаимодействия пестицидов с почвенной микрофлорой необходимо в связи с важной ролью микроорганизмов в создании плодородия и детоксикации почвы от ксенобиотиков. Важной проблемой остается замена токсичных пестицидов на новые виды препаратов, которые меньше загрязняют почву и способны разлагаться под воздействием микроорганизмов.

Ключевые слова: микроорганизмы, почва, пестициды, бактерии, грибы

Для цитирования: Семеренко С.А., Бушнева Н.А. Влияние пестицидов на почвенную микрофлору (обзор) // Масличные культуры. 2024. Вып. 4 (200). С. 132–140.

Pesticide effects on soil microflora (review)

Semerenco S.A., head of the lab., leading researcher, PhD in biology

Bushneva N.A., leading researcher, PhD in agriculture

V.S. Pustovoi All-Russian Research Institute of Oil Crops

17 Filatova str., Krasnodar, 350038, Russia

Tel.: (861) 275-78-45

protection@vniimk.ru

Abstract. Soil is not only the most important component of the ecosystem, providing specific habitat conditions for bacteria, fungi, actinomycetes, algae

and other microorganisms that make up the soil microflora, but also a means of crop production. It is well known that modern agricultural production would be impossible without the use of chemical pesticides, which form the basis of modern plant protection. At present, excessive use of fertilizers and pesticides not only pollutes the soil, but also affects its quality and reduces the biodiversity of the soil profile. The study of the interaction between pesticides and soil microflora is necessary due to the important role of microorganisms in the development of fertility and detoxification of soil from xenobiotics. An important problem is the replacement of toxic pesticides with new types of preparations that are less polluting to the soil and are able to degrade under the influence of microorganisms.

Key words: microorganisms, soil, pesticides, bacteria, fungi

Получение высоких урожаев в растениеводстве требует применения пестицидов. Необходимость их использования возникает из-за существенных потерь урожая, которые по самым скромным подсчетам составляют от 24 до 46 % мирового сельскохозяйственного производства [1]. Однако при контакте с растениями пестициды могут вызвать фитотоксическую реакцию, а при попадании в почву – нарушать баланс микрофлоры, тем самым препятствуя естественному процессу распада и ферментации растительных остатков [2; 3; 4]. Основной целью создания пестицидов для растениеводства является синтез химических веществ направленного действия против развития болезней, вредителей и сорной растительности в агроценозах. По химическому составу пестициды разделяют на: неорганические соединения (препараты меди, серы, марганца, железа и др.), органические (органо-синтетические) препараты – наиболее обширная группа пестицидов из различных классов химических соединений (хлорорганические, фосфорорганические, пиретроиды и др.) и биологические. По оценкам специалистов, в мире существует более 1000 действующих веществ, на их основе производятся десятки тысяч пестицидов. [5; 1]. Значительная доля этих соединений обладает активностью широкого спектра. Вместе с тем использование пестицидов связано с вредным воздействием на окружающую среду, проявляющимся в первую очередь

на балансе биоценозов внутри экосистем. Кроме того, они влияют на микроорганизмы почвы, которые обеспечивают рост, развитие и экологическую адаптацию к стрессовым условиям растений [6; 7; 8].

Почвенные микробные сообщества являются одними из наиболее многочисленных и разнообразных биологических групп в природе. В одном грамме почвы можно обнаружить популяции бактерий, актиномицетов, грибов, архей и др. Наиболее распространенными микроорганизмами являются бактерии, которые составляют 70–90 % общей ее биомассы. Они играют важную роль в процессах почвообразования и разложения органических веществ [9; 10; 11; 12; 13].

Запас органического вещества в почве, большая часть которого находится в слое до 30 см, 400 т на 1 га. Остатки животных и растений являются основным компонентом органического вещества. Живая масса организмов на одном гектаре почвы составляет более 6 т. На соотношение отдельных систематических групп микроорганизмов влияет тип почвы, а ее различные физические и химические характеристики создают определенные условия для жизни организмов. Количество микроорганизмов наибольшее в обрабатываемой почве – 4,2 млрд/г, наименьшее – в лесных и песчаных – 1,2 млрд/г. Наиболее благоприятными для их жизни являются каштановые, сероземы и искусственно окультуренные почвы. В одном грамме таких почв численность бактерий может достигать десятков миллиардов. Напротив, бедные растительностью почвы бедны микрофлорой, тем не менее даже в песчаной почве численность бактерий может составлять 10–100 тыс. на 1 г. Наибольшая концентрация микроорганизмов наблюдается в поверхностном слое (5–15 см), где протекают биохимические процессы разложения органических веществ, обусловленные жизнедеятельностью микроорганизмов. С увеличением глубины до 20–30 см количество микроорганизмов уменьшается, а на глубине 30–40 см достигает минимума. Почвы с высокой концентрацией бактерий характеризуются повышенной биологической активностью [14]. Существует

прямая корреляция между плодородием почвы и количеством микроорганизмов в ней. Исследования показали, что на гектар малоплодородной почвы приходится 2,5–3,0 т микробной массы, в то время как на гектар высокоплодородной – до 16 т [13].

В составе почвенной микрофлоры можно выделить следующие группы бактерий:

1. Бактерии-аммонификаторы, вызывающие гниение трупов животных, остатков растений, разложение мочевины с образованием аммиака и других продуктов: аэробные бактерии – *Bacillus subtilis*, *Bacillus mesentericus*, *Serratia marcescens*; бактерии рода *Proteus*; грибы рода *Aspergillus*, *Mucor*, *Penicillium*; анаэробы – *Clostridium sporogenes*, *Clostridium putrificum*; уробактерии – *Urobacillus pasteurii*, *Sarcina urea*, расщепляющие мочевину;

2. Нитрифицирующие бактерии: *Nitrobacter* (превращают азотистую кислоту в нитраты) и *Nitrosomonas* (окисляют аммиак до азотистой кислоты, образуя нитриты);

3. Азотфиксирующие бактерии: усваивают из воздуха свободный кислород и в процессе своей жизнедеятельности из молекулярного азота синтезируют белки и другие органические соединения азота, используемые растениями;

4. Бактерии, участвующие в круговороте серы, железа, фосфора и других элементов – серобактерии (окисляют сероводород до серной кислоты), железобактерии (окисляют соединения железа до гидрата окиси железа), фосфорные (способствуют образованию легко растворимых соединений фосфора) и т.д.;

5. Бактерии, расщепляющие клетчатку, вызывающие брожение (молочнокислые, спиртовые, маслянокислые, уксусные, протионовые и др.) [15].

Область почвы, которая непосредственно контактирует с корнями растений называется ризосфера. Она представляет основную экологическую нишу для ризобактерий, где формируются оптимальные условия для их жизни. Ризосферные микроорганизмы необходимы для поддержания жизнеспособности растений. Они способствуют усвоению и переработке питательных веществ, обеспечивают за-

щиту растений от патогенов, абиотических стрессов, таких как засуха, оказывают влияние на разложение пестицидов и тяжелых металлов, а также способствуют улучшению структуры почвы [13; 16; 17; 18; 19]. Состав и деятельность почвенных микроорганизмов активно влияют на процессы, проходящие в ризосфере, что сказывается на реализации урожайности растений. Концентрация бактерий, микромицетов и других микроорганизмов значительно выше в ризосфере, чем в свободной от корней почве. Она определяется отношением ризосфера/почва (R/S), которое рассчитывают для различных видов, родов и семейств обитателей прикорневого слоя почвы. Индекс R/S показывает, насколько больше количество определенной группы микроорганизмов вокруг корней одного растения, чем в почве. Для бактерий эта цифра варьирует от 10 до 100 [20]. Микрофлора ризосферы включает в себя грамотрицательные бактерии родов *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Agrobacterium*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Pseudomonas*, *Xantomonas* и других, грамположительные бактерии рода *Bacillus*, актинобактерии родов *Nocardia*, *Micromonospora*, *Streptomyces* и других, микроскопические грибы родов *Penicillium*, *Gliocladium*, *Talaromyces*, *Humi cola* и других [21].

Впервые о ризосфере узнали в 1904 г. благодаря немецкому ученому Лоренцо Гильтнеру. Он заметил, что прикорневая зона некоторых травянистых растений содержит много микроорганизмов. Ученый предположил, что это связано с работой корней растений. Гильтнер ввел понятие «ризосфера» (от греч. «rhiza» – корень, «sphaira» – сфера), чтобы описать область вокруг корней растений. Таким образом, это та часть почвы, которая расположена рядом с корнями растения и содержит микроорганизмы [23].

Почвенные микроорганизмы активно участвуют в процессах минерализации органического вещества, образования гумуса, перемещения питательных веществ. От их деятельности во многом зависит плодородие почвы [23; 18; 22]. В тоже время они чувствительны к изменениям, вызванным использованием пестицидов в

сельском хозяйстве. Сложность и многообразие взаимоотношений различных микроорганизмов между собой и с растением, а также с другими компонентами агробиоценоза определяют фитосанитарное состояние почвы и ее стабильность как системы в целом [24].

Применение различных средств для защиты растений, таких как гербициды, инсектициды и фунгициды, приводит не только к загрязнению почвы, но и сокращает разнообразие живых организмов в ней, а также снижает количество бактерий, разлагающих органические вещества. В результате происходит изменение соотношения видов микроорганизмов в почве, что, в свою очередь, ухудшает её плодородие [7; 6; 25; 2; 26].

Характер и степень влияния пестицидов на почвенную микрофлору различны и зависят от действующего вещества, нормы расхода препарата, длительности его сохранения в почве, видового состава микроорганизмов, гранулометрического состава почвы, ее температуры, влажности и других факторов [27]. При изучении действия пестицидов на почвенную микробиоту проводят анализ изменений численности и видового состава микроорганизмов из различных таксономических групп, оценивают влияние пестицидов на основные процессы, осуществляемые микроорганизмами в почве. Помимо этого, определяют изменения в составе и организации микроорганизмов, происходящие под их действием [28].

Однако пестициды оказывают неравномерное воздействие на разных членов природных микробных сообществ в почве [27]. К действию инсектицидов, которые широко используются для борьбы с вредителями растений и переносчиками болезней человека и скота, почвенные микроорганизмы имеют различную чувствительность. Независимо от способа применения, а также от того используются ли инсектициды в сельском хозяйстве или в здравоохранении, они никогда не остаются на месте применения и в конечном итоге попадают в почву [29; 30]. Чувствительность отдельных групп микроорганизмов к инсектицидам растет в ряду: бактерии, актиномицеты, грибы. Нитри-

фицирующие и некоторые аэробные бактерии, разлагающие целлюлозу, более чувствительны к инсектицидам, чем азотобактер. Поэтому длительное и систематическое применение инсектицидов может вызвать накопление в почве целлюлозы растительных остатков [27].

При изучении влияния неоникотиноидного инсектицида тиаметоксама на состав и метаболическую функцию почвенного бактериального сообщества исследователи Wu Ch. с соавторами (2021) установили, что «обработка тиаметоксамом значительно повлияла на численность почвенных бактерий, снизила микробное разнообразие и изменила структуру бактериального сообщества, но вскоре изучаемые показатели вернулись в стабильное состояние. Были обнаружены некоторые бактерии ризосферы, способствующие росту растений, включая *Actinobacteria*, их популяции сократились, в то время как популяции бактерий, разрушающие загрязняющие вещества, включая *Firmicutes* увеличились. Обработка тиаметоксамом незначительно способствовала или ингибировала множественные метаболические процессы» [30].

Фосфорорганический инсектицид с действующим веществом диазинон (600 г/л) оказывал негативное влияние только при самой высокой норме расхода, снижая численность бактерий даже через 28 суток после применения. В нормах 7,0 и 35,0 мг/кг препарат увеличивал численность азотфиксирующих бактерий примерно на 20 % по сравнению с контролем. При применении самых низких норм расхода не было обнаружено влияния инсектицида на почвенные микроорганизмы [27].

Некоторые инсектициды воздействуют на гидролизующие мочевину организмы, гетеротрофные азотфиксаторы, нитрификаторы, гетеротрофные бактерии и грибы. Обработка перитроидом на основе циперметрин (250 г/л) приводила к снижению активности дегидрогеназы в почве на 32,8 % и количества нитрифицирующих бактерий на 74 %, неоникотиноидом тиаметоксамом (350 г/л) – к снижению активности фосфатазы на 6,5 % и количества нитрифицирующих бактерий на 58,1 % [27].

В исследованиях Gundi V.A. с соавторами (2007) определено, что «инсектициды на основе органофосфатов (монокротозос, 100 г/л и хиналфос, 150 г/л) и пиретроида (циперметрин, 250 г/л) имели тенденцию повышать активность ферментов целлюлазы и амилазы. Так, комбинации монокротозоса (100 г/л) с циперметрином (250 г/л) продемонстрировали синергический и антагонистический эффект на оба фермента почвенной активности – арилсульфатазу и β -гликозидазу, что показывает влияние пестицидов на S-минерализацию почв и общий окислительный потенциал микроорганизмов» [31].

При изучении микробной диградации фипронила (800 г/кг) Zhu G., Wu H., Guo J. and Kimaro F.M.E. (2004) определили, что «нестерильная суглинистая почва имела жизнеспособные микроорганизмы на протяжении всего эксперимента. Фипронил не оказывал неблагоприятного воздействия на микроорганизмы, как только они адаптировались к присутствию пестицида в суглинистой почве» [32].

Фунгициды много лет используются для борьбы с различными патогенами растений и являются биотоксичными веществами, которые не только влияют на биохимические и физиологические реакции фитопатогенов, но и на популяции микроорганизмов в почве [27]. Так, ученый Cui Sh. с коллегами (2005) изучал безопасность фунгицида на основе тебуконазола (60 г/л). Они определяли влияние его различных концентраций на популяцию почвенных микроорганизмов и их дыхание. Результаты исследований показали, что «спустя сутки после применения фунгицида в низких концентрациях (1,0 мг/кг, 0,5 мг/кг), увеличивалось количество бактерий на 49,5 и 20,9 %, грибов 13,3 и 178,4, а актиномицетов 19,4 и 81,9 %, соответственно. Через 8 суток рост бактерий и грибов сильно стимулировался, тогда как актиномицеты возвращались к нормальному уровню спустя 4 суток после обработки фунгицидом» [33].

Ученные Waćmaga M., Wyszowska J., Bogowik A. и Kucharski J. (2022) установили, что «тебуконазол стимулирует пролиферацию органотрофных бактерий и

грибов, а также активность почвенных ферментов, ответственных за метаболизм фосфора, серы и углерода. Все проанализированные образцы почвы были в основном заселены бактериями из филума *Proteobacteria*, *Actinobacteria*, *Firmicutes*, *Gemmatimonadetes*, *Acidobacteria*, *Planctomycetes* и *Chloroflexi*. Бактерии из родов *Kaistobacter*, *Arthrobacter* и *Streptomyces* преобладали в почвах, загрязненных тебуконазолом, тогда как бактерии из рода *Gemmata* были инактивированы этим препаратом» [34].

В исследовании действия гербицидов на почвенную микрофлору, проведенном Zsolt S. с соавторами (2007) было установлено, что «через 6 и 12 недель после применения препаратов Аценита (ацетохлор, 800 г/л), Фронтъера (диметенамид-П, 720 г/л), Мерлина (изоксафлютол, 750 г/л) и Винга (диметенамид-Р, 212,5 г/л; пендиметалин, 250 г/л) наблюдалось увеличение количества аэробных целлюлозоразрушающих бактерий» [35]. Вместе с тем в опытах Gigliotti С. с соавторами (1998) с гербицидом на основе бензолфулон-метил выявлено, что «пестицид практически не влиял на развитие аэробных и анаэробных азотфиксаторов, нитрификаторов и активность «дыхания» почвы и только целлюлолитические микроорганизмы значительно уменьшались в количестве» [36].

Донкова Р. (1997) в опыте по изучению биологической активности гербицида, содержащего хлоросульфурон (25 г/кг) в рекомендуемых и 10-кратных повышенных дозах, на трех различных типах почвы установила, что «наблюдаются лишь кратковременные изменения в общей биологической активности (определяемой по объему выделяемого CO₂), а также в нитрифицирующей активности и активности ферментов инвертазы и дегидрогеназы. Наибольшее воздействие эти изменения оказали на аллювиально-луговую почву, в то время как на выщелоченной смолнице их влияние оказалось менее заметным» [37].

По данным Ismail B.S., Goh K.M. и Kader J. (1999), «гербицид, содержащий метсульфурон-метил (600 г/кг), применяемый в концентрациях от 0,05 до 2,00 мг/кг

на глинистой почве, способствовал сокращению количества бактериальных популяций в течение первых суток. Затем происходило восстановление исходных уровней численности этих микроорганизмов и в дальнейшем наблюдался рост численности бактерий в сравнении с контролем. В то же время после применения метсульфурон-метила резко увеличилось количество толерантных грибов на фоне значительного снижения количества актиномицетов. Активность пероксидазы водорода и полифенолоксидазы в почвенных образцах после внесения гербицида была заметно ниже, чем в контроле» [38].

Ratcliff A.W., Busse M.D., Shestak C.J. (2006) считают, что «внесение гербицида на основе глифосата (540 г/л) в рекомендуемой полевой норме в суглинок и лесную песчаную почву приводило к небольшим изменениям в структуре микробного сообщества. Напротив, высокая концентрация глифосата (превышение полевой нормы в 100 раз) существенно изменяла бактериальное сообщество в обеих почвах. Происходило увеличение общего количества бактерий с 1 % от общей популяции до 25 % при высокой концентрации к 7 суткам после внесения, что указывает на обогащение бактерий-генералистов. Состав сообщества в обеих почвах сместился от грибного доминирования к равному соотношению бактерий и грибов» [39].

Пестициды оказывают существенное воздействие на жизнедеятельность как отдельных микроорганизмов, так и микробных сообществ почвы. Их влияние во многом определяется химической структурой и спецификой состава почвенной микробиоты. Существует различная чувствительность микроорганизмов к пестицидам: некоторые виды показывают высокую восприимчивость, в то время как другие обладают значительной устойчивостью. Тем не менее токсическое воздействие пестицидов, как правило, является обратимым [40].

Микроорганизмы участвуют в преобразовании и разложении пестицидов, используя их как источники питания и энергии. Это зачастую приводит к изме-

нению состава микробного сообщества, способствует увеличению численности тех видов, которые способны разлагать синтетические удобрения и пестициды, а также влияет на общее состояние почвы. Бактерии, способные трансформировать или разлагать пестициды, превосходят бактерии, стимулирующие рост растений [41]. Они могут метаболизировать даже самые стойкие пестициды либо за счет использования в качестве источников энергии, либо за счет совместного метаболизма с другими субстратами, поддерживающими рост микробов [42; 43]. В трансформации и детоксикации пестицидов участвуют беспоровые бактерии из родов *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Mycobacterium*; актиномицеты рода *Nocardia*; виды низших грибов, относящиеся к родам *Fusarium*, *Aspergillus*, *Penicillium* [45].

Эффективное разложение средств защиты растений в почве требует создания идеальных условий для выработки ферментов, которые необходимы для катализа процессов преобразования пестицидов и осуществления ферментативных реакций их переработки, а также присутствие специфических микроорганизмов, способных разлагать химические соединения пестицидов. Вместе с тем доля микроорганизмов участвующих в разложении пестицидов может варьироваться от 10 до 70 %. При нарушении любого из этих условий деградация пестицидов в почве невозможна [32; 45].

В целях определения наиболее подходящих для тестирования микроорганизмов и организмов-индикаторов можно использовать скрининговые методы, такие как тесты на чувствительность, устойчивые бактерии и биологические индикаторы. Процесс поиска и выделения чистых культур микроорганизмов, которые способны эффективно разлагать разнообразные химические соединения, играет ключевую роль в разработке стратегий биоремедиации, направленных на очищение почвы от остатков пестицидов. Данный этап необходим для того, чтобы понять механизмы взаимодействия бактерий и загрязняющих веществ и помочь найти оптимальные пути восстановления

экосистем. Сравнение разных видов микроорганизмов позволяет создать более эффективные методы очистки от пестицидов. В конечном итоге, правильный выбор микроорганизмов и их использование в биоремедиационных мероприятиях позволяют значительно улучшить экологическую ситуацию в загрязненных территориях [46; 43].

Таким образом благодаря микроорганизмам, находящимся в почве и в том числе ризосфере, растения сохраняют свою жизнеспособность, поглощают и перерабатывают питательные вещества, а также защищают себя от патогенов и абиотических стрессов. Процессы, протекающие в ризосфере, оказывают влияние на реализацию потенциала растений и в значительной степени зависят от состава и активности микробиоты. Микробные сообщества в экосистемах являются наиболее уязвимыми элементами по отношению к изменениям в окружающей среде, которые могут быть вызваны различными аспектами сельскохозяйственной деятельности, включая применение пестицидов. Это приводит к изменению состава микробного сообщества, что способствует увеличению численности видов, способных разлагать пестициды. Характер влияния средств защиты растений во многом определяется их химическим составом, дозировкой, устойчивостью в окружающей среде и почвенной микробиотой. Существуют определённые виды микроорганизмов, которые демонстрируют большую чувствительность и выраженную толерантность к пестицидам. Они занимают ведущее место в процессе преобразования и разложения пестицидов, применяя их в качестве источников углерода, азота, фосфора и энергии. Поэтому выявление бактерий, микромицетов и иных микроорганизмов, обладающих способностью разлагать средства защиты растений в почве, является важным этапом в ее защите от загрязнения, вызванного пестицидами.

Список литературы

1. Агроэкология: учеб. для вузов по агр. специальностям / Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В. [и др.]. – М.: Колос, 2000. – 536 с.

2. Иванцова Е.А. Влияние пестицидов на микрофлору почвы и полезную биоту // Вестник Волгоградского гос-ного ун-та. Серия 11. Естественные науки. – 2013. – № 1. – С. 35–40.
3. Ижевский С.С. Негативные последствия применения пестицидов // Защита и карантин растений. – 2006. – № 5. – С. 16–19.
4. Новикова Л.В. Эффективность химических и биологических препаратов против болезней ярового ячменя в Кемеровской области: дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.11. – Кемерово, 2005. – 159 с.
5. Gevaio B., Semple K.T., Jones K.C. Bound pesticide residues in soils: a review // Environ. Pollut. – 2000. – Vol. 108. – P. 3–14.
6. Bunemann E.K., Schwenke G.D., Zwieter L. Impact of agricultural inputs on soil organisms: a review // J. Soil Res. – 2006. – Vol. 44. – P. 379–406.
7. Bromilow R.H., Evans A.A., Nicholls P.H., Todd A.D., Briggs G.G. The effect on soil fertility of repeated applications of pesticides over 20 years // Pest Sci. – 1996. – Vol. 48. – P. 63–72.
8. Arora S., Arora S., Divya S., Sehgal M., Srivastava D. S., and Singh A. Pesticides use and its effect on soil bacterial and fungal populations, microbial biomass carbon and enzymatic activity // Research communications. – 2019. – Vol. 116. – Is. 4. – P. 643.
9. Громова В.С., Пчеленок О.А., Шушпанов А.Г. Изучение влияния современных видов пестицидов на биологическую активность почвы // Экология ЦЧО РФ. – 2012. – № 2 (29). – С. 128–130.
10. Pepper I.L., Gentry T.J. Environmental Microbiology. Third Edition. – San Diego, CA: Academic Press, 2015. – P. 59–88.
11. Islam W., Noman A., Naveed, H., Huang, Z., Chen H.Y. H. Role of environmental factors in shaping the soil microbiome // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2020. – Vol. 27 (33). – P. 41225–41247.
12. Sokol N.W., Slessarev E., Marschmann G.L., Nicolas A., Blazewicz S.J., and Brodie E.L. Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry // Nat. Rev. Microbiol. – 2020. – Vol. 20. – P. 415–430.
13. Андронов Е.Е., Иванова Е.А., Першина Е.В., Орлова, О.В., Круглов Ю.В., Белимов А.А., Тихонович И.А. Анализ показателей почвенного микробиома в процессах, связанных с почвообразованием, трансформацией органического вещества и тонкой регуляцией вегетационных процессов // Бюл. Почвенного института им. В.В. Докучаева. – 2015. – Вып. 80. – С. 83–94.
14. Литусов Н.В., Сергеев А.Г., Григорьева Ю.В., Ишутнинова В.Г. Микрофлора окружающей среды и тела человека: учеб. пособие. – Екатеринбург, 2008. – 28 с.
15. Литусов Н.В. Общая микробиология: иллюстрированное учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УГМУ, 2015. – 516 с.
16. Турусов В.И., Чеве́рдин Ю.И., Титова Т.В., Беспалов В.А., Сапрыкин С.В., Гармашова Л.В., Чеве́рдин А.Ю. Взаимосвязь микробиологических параметров и физических свойств черноземных почв // Агрехимия. – 2017. – № 11. – С. 3–12.
17. Семенов М.В., Манучарова Н.А., Краснов Г.С., Никитин Д.А., Степанов А.Л. Биомасса и таксономическая структура микробных сообществ в почвах правобережья р. Оки // Почвоведение. – 2019. – № 8. – С. 974–985.
18. Шапошников А.И., Белимов А.А., Кравченко Л.В., Виванко Д.М. Взаимодействие ризосферных бактерий с растениями: механизмы образования и факторы эффективности ассоциативных симбиозов // Сельскохозяйственная биология. – 2011. – № 3. – С. 16–22.
19. Бушнев А.С., Курилова Д.А., Котлярова И.А. О ризосфере полевых культур и факторах, влияющих на динамику ее микробиоты (обзор) // Масличные культуры. – 2023. – № 4 (196). – С. 97–109.
20. Beneduzi A., Ambrosini A., Passaglia L.M.P. Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents // Genet. Mol. Biol. – 2012. – Vol. 35. – Is. 4. – P. 1044–1051.
21. Bulgarelli D., Schlaeppli K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. Structure and function of bacterial microbiota of plants // Annu. Rev. Plant Biol. – 2013. – Vol. 64. – P. 807–838.
22. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.Л., Зенова Г.М. Биология почв. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. – 445 с.
23. Круглов Ю.В. Микробиологические аспекты экологизации земледелия // Труды Всесоюз. науч.-исслед. ин-та с.-х. микробиологии. – 1990. – Т. 60. – С. 5–9.
24. Тышкевич Г.Л. Охрана окружающей среды при интенсивном ведении сельского хозяйства. – Кишинев: Штица, 1987. – 242 с.
25. Strickland M.S., Rousk J., Considering fungal : bacterial dominance in soils – methods, controls, and ecosystem implications // Soil Biol. Biochem. – 2010. – Vol. 42. – P. 1385–1395.
26. Круглов Ю.В. Микрофлора почвы и пестициды. – М.: Агропромиздат, 1991. – 128 с.
27. Johnsen, K., Jacobsen C.S., Torsvik V., and Sørensen J. Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils – a review // Biol. Fertil. Soils. – 2001. – Vol. 33. – P. 443–453.
28. Бызов Б.А., Гузев В.С., Паников Н.С. [др.]. Микробиологические аспекты загрязнения почв. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – С. 86–128.
29. Vedler E., Heinaru E., Jutkina J., Viggor S., Koressaar T., Remm M., Heinaru A. Limnobacter spp. as newly detected phenol-degraders among Baltic Sea surface water bacteria characterized by comparative analysis of catabolic genes // System. Appl. Microbiol. – 2013. – Vol. 36. – Is. 8. – P. 525–532.
30. Wu Ch., Wang Zh., Ma Y., Luo J., Gao X., Ning J., Mei X., She D. Influence of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam on soil bacterial community composition and metabolic function // J. of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 405. – Art. No. 124275.
31. Gundi V.A., Viswanath B., Chandra M.S., Kumar V.N., Reddy B.R. Activities of cellulose and amylase in soils as influenced by insecticide interactions // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2007. – Vol. 68. – P. 278–285.
32. Zhu G., Wu H., Guo J., Kimaro F.M.E. Microbial degradation of fipronil in clay loam soil // Water Air Soil Pollut. – 2004. – Vol. 153. – P. 35–44.
33. Cui Sh., Wang K., Hong Y., Gui Q., Fan K. Effect of tebuconazole on the population of soil micro-

organisms and their respiration // *Acta Scientiae Circumstantiae*. – 2005. – Vol. 24. – P. 865–869.

34. *Baćmaga M., Wyszowska J., Borowik A., Kucharski J.* Effects of tebuconazole application on soil microbiota and enzymes // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27. – No. 21. – P. 7501.

35. *Zsolt S., Katai J., Nagy P.T., Zsuposne A.O.* The effect of different herbicides on some factors of carbon cycle in a chernozem // *Bul. Univ. Agr. Sci. and Vet. Med.* – 2007. – V. 63. – P. 340.

36. *Gigliotti C., Allievi L., Salardi C., Ferrari F., Farini A.* Microbial ecotoxicity and persistence in soil of the herbicide bensulfuron-methyl // *J. Environ. Sci. and Health*. – 1998. – Vol. 33. – No. 4. – P. 381–398.

37. *Донкова Р.* Биологична активност на почвата при употреба на хлорсулфурон // *Селскостопанска наука*. – 1997. – Т. 35. – № 2–3. – С. 48–50.

38. *Ismail B.S., Goh K.M., Kader J.* Effects of metsulfuron-methyl on microbial biomass and population in soils // *J. Environ. Sci. and Health*. – 1996. – V. 31. – No. 5. – P. 987–999.

39. *Ratcliff A.W., Busse M.D., Shestak C.J.* Changes in microbial community structure following herbicide additions to forest soils // *Appl. Soil Ecol.* – 2006. – Vol. 34. – P. 114–124.

40. *Домрачева Л.И., Ашихмина Т.Я., Кондакова Л.В., Березин Г.И.* Реакция почвенной микробиоты на действие пестицидов (обзор) // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2012. – № 3. – С. 4–18.

41. *Wang M., Cernava T.* Overhauling the assessment of agrochemical-driven interferences with microbial communities for improved global ecosystem integrity // *Environ. Sci. Ecotech.* – 2020. – Vol. 4. – Art. No. 10006.

42. *Добровольский Г.В., Гришина Л.А.* Охрана почв. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – 224 с.

43. *Ашихмина Т.Я., Колупаев А.В., Широких А.А.* Биотрансформация пестицидов в наземных экосистемах (обзор литературы) // *Теоретическая и прикладная экология*. – 2010. – № 2. – С. 4–12.

44. *Ponneelan K.T.P.B., Subramanian C., Suchitra R., Canech K.C.* Studies on the pesticide (Lindane) utilizing in the paddy field // *J. Ecotoxicol. Environ. Monit.* – 2006. – Vol. 16. – No. 3. – P. 211–214.

45. *Головлева Л.А., Финкельштейн Э.И., Перцова Р.Н.* Роль микроорганизмов в разложении пестицидов в окружающей среде // *Результаты научных исследований в практику сельского хозяйства*. – М.: Наука, 1982. – С. 64–73.

46. *Биоиндикаторы и биотестсистемы в оценке окружающей среды техногенных территорий / Под ред. Т.Я. Ашихминой, Н.М. Алалыкиной.* – Киров: О-Краткое, 2008. – 336 с.

References

1. *Agroekologiya: ucheb. dlya vuzov po agron. spetsial'nostyam / Chernikov V.A., Aleksakhin R.M., Golubev A.V. [i dr.].* – М.: Kolos, 2000. – 536 с.

2. *Ivantsova E.A.* Vliyaniye pestitsidov na mikrofloru pochvy i poleznuyu biotu // *Vestnik Volgogradskogo gos-nogo un-ta. Seriya 11. Estestvennye nauki*. – 2013. – № 1. – С. 35–40.

3. *Izhevskiy S.S.* Negativnye posledstviya primeneniya pestitsidov // *Zashchita i karantin rasteniy*. – 2006. – № 5. – С. 16–19.

4. *Novikova L.V.* Effektivnost' khimicheskikh i biologicheskikh preparatov protiv bolezney yarovogo yachmenya v Kemerovskoy oblasti: dis. ... kand. s.-kh. nauk: 06.01.11. – Kemerovo, 2005. – 159 s.

5. *Gevao B., Semple K.T., Jones K.C.* Bound pesticide residues in soils: a review // *Environ. Pollut.* – 2000. – Vol. 108. – P. 3–14.

6. *Bunemann E.K., Schwenke G.D., Zwieten L.* Impact of agricultural inputs on soil organisms: a review // *J. Soil Res.* – 2006. – Vol. 44. – P. 379–406.

7. *Bromilow R.H., Evans A.A., Nicholls P.H., Todd A.D., Briggs G.G.* The effect on soil fertility of repeated applications of pesticides over 20 years // *Pest Sci.* – 1996. – Vol. 48. – P. 63–72.

8. *Arora S., Arora S., Divya S., Sehgal M., Srivastava D. S., and Singh A.* Pesticides use and its effect on soil bacterial and fungal populations, microbial biomass carbon and enzymatic activity // *Research communications*. – 2019. – Vol. 116. – Is. 4. – P. 643.

9. *Gromova V.S., Pchelenok O.A., Shushpanov A.G.* Izuchenie vliyaniya sovremennykh vidov pestitsidov na biologicheskuyu aktivnost' pochvy // *Ekologiya TsChORF*. – 2012. – № 2 (29). – S. 128–130.

10. *Pepper I.L., Gentry T.J.* *Environmental Microbiology*. Third Edition. – San Diego, CA: Academic Press, 2015. – P. 59–88.

11. *Islam W., Noman A., Naveed, H., Huang, Z., Chen H.Y. H.* Role of environmental factors in shaping the soil microbiome // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2020. – Vol. 27 (33). – P. 41225–41247.

12. *Sokol N.W., Slessarev E., Marschmann G.L., Nicolas A., Blazewicz S.J., and Brodie E.L.* Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry // *Nat. Rev. Microbiol.* – 2020. – Vol. 20. – P. 415–430.

13. *Andronov E.E., Ivanova E.A., Pershina E.V., Orlova, O.V., Kruglov Yu.V., Belimov A.A., Tikhonovich I.A.* Analiz pokazateley pochvennogo mikrobioma v protsessakh, svyazannykh s pochvoobrazovaniem, transformatsiyey organicheskogo veshchestva i tonkoj regulyatsiyey vegetatsionnykh protsessov // *Byul. Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva*. – 2015. – Vyp. 80. – S. 83–94.

14. *Litusov N.V., Sergeev A.G., Grigor'eva Yu.V., Ishutinova V.G.* Mikroflora okruzhayushchey sredy i tela cheloveka: ucheb. posobie. – Ekaterinburg, 2008. – 28 s.

15. *Litusov N.V.* Obshchaya mikrobiologiya: illyustrirovannoe ucheb. posobie. – Ekaterinburg: Izd-vo UGMU, 2015. – 516 s.

16. *Turusov V.I., Cheverdin Yu.I., Titova T.V., Bespalov V.A., Saprykin S.V., Garmashova L.V., Cheverdin A.Yu.* Vzaimosvyaz' mikrobiologicheskikh parametrov i fizicheskikh svoystv chemozemnykh pochv // *Agrokhimiya*. – 2017. – № 11. – S. 3–12.

17. *Semenov M.V., Manucharova N.A., Krasnov G.S., Nikitin D.A., Stepanov A.L.* Biomassa i taksonomicheskaya struktura mikrobnnykh soobshchestv v pochvakh pravoberezh'ya r. Oki // *Pochvovedenie*. – 2019. – № 8. – S. 974–985.

18. *Shaposhnikov A.I., Belimov A.A., Kravchenko L.V., Vivanko D.M.* Vzaimodeystvie rizosfernykh bakteriy s rasteniyami: mekhanizmy obrazovaniya i faktory effektivnosti assotsiativnykh simbiozov // *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. – 2011. – № 3. – S. 16–22.

19. Bushnev A.S., Kurilova D.A., Kotlyarova I.A. O rizosfere polevykh kul'tur i faktorakh, vliyayushchikh na dinamiku ee mikrobioty (obzor) // Maslichnye kul'tury. – 2023. – № 4 (196). – S. 97–109.
20. Beneduzi A., Ambrosini A., Passaglia L.M.P. Plant-growth-promoting rhizobacteria (PGPR): their potential as antagonists and biocontrol agents // Genet. Mol. Biol. – 2012. – Vol. 35. – Is. 4. – P. 1044–1051.
21. Bulgarelli D., Schlaeppi K., Spaepen S., Ver Loren van Themaat E., Schulze-Lefert P. Structure and function of bacterial microbiota of plants // Annu. Rev. Plant Biol. – 2013. – Vol. 64. – P. 807–838.
22. Zvyagintsev D.G., Bab'eva I.L., Zenova G.M. Biologiya pochv. – M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 2005. – 445 s.
23. Kruglov Yu.V. Mikrobiologicheskie aspekty ekologizatsii zemledeliya // Trudy Vsesoyuz. nauch.-issled. in-tas.-kh. mikrobiologii. – 1990. – T. 60. – S. 5–9.
24. Tyshkevich G.L. Okhrana okruzhayushchey sredy pri intensivnom vedenii sel'skogo khozyaystva. – Kishinev: Shtiitsa, 1987. – 242 s.
25. Strickland M.S., Roush J., Considering fungal : bacterial dominance in soils – methods, controls, and ecosystem implications // Soil Biol. Biochem. – 2010. – Vol. 42. – P. 1385–1395.
26. Kruglov Yu.V. Mikroflora pochvy i pestitsidy. – M.: Agropromizdat, 1991. – 128 s.
27. Johnsen, K., Jacobsen C.S., Torsvik V., and Sorensen J. Pesticide effects on bacterial diversity in agricultural soils – a review // Biol. Fertil. Soils. – 2001. – Vol. 33. – P. 443–453.
28. Byzov B.A., Guzev V.S., Panikov N.S. [dr.]. Mikrobiologicheskie aspekty zagryazneniya pochv. – M.: Izd-vo MGU, 1989. – S. 86–128.
29. Vedler E., Heinaru E., Jutkina J., Viggor S., Koressaar T., Remm M., Heinaru A. Limnobacter spp. as newly detected phenol-degraders among Baltic Sea surface water bacteria characterized by comparative analysis of catabolic genes // System. Appl. Microbiol. – 2013. – Vol. 36. – Is. 8. – P. 525–532.
30. Wu Ch., Wang Zh., Ma Y., Luo J., Gao X., Ning J., Mei X., She D. Influence of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam on soil bacterial community composition and metabolic function // J. of Hazardous Materials. – 2021. – Vol. 405. – Art. No. 124275.
31. Gundi V.A., Viswanath B., Chandra M.S., Kumar V.N., Reddy B.R. Activities of cellulose and amylase in soils as influenced by insecticide interactions // Ecotoxicol. Environ. Saf. – 2007. – Vol. 68. – P. 278–285.
32. Zhu G., Wu H., Guo J., Kimaro F.M.E. Microbial degradation of fipronil in clay loam soil // Water Air Soil Pollut. – 2004. – Vol. 153. – P. 35–44.
33. Cui Sh., Wang K., Hong Y., Gui Q., Fan K. Effect of tebuconazole on the population of soil microorganisms and their respiration // Acta Scientiae Circumstantiae. – 2005. – Vol. 24. – P. 865–869.
34. Baćmaga M., Wyszowska J., Borowik A., Ku-charski J. Effects of tebuconazole application on soil microbiota and enzymes // Molecules. – 2022. – Vol. 27. – No. 21. – P. 7501.
35. Zsolt S., Katai J., Nagy P.T., Zsuposne A.O. The effect of different herbicides on some factors of carbon cycle in a chernozem // Bu. Univ. Agr. Sci. and Vet. Med. – 2007. – V. 63. – P. 340.
36. Gigliotti C., Allievi L., Salardi C., Ferrari F., Farini A. Microbial ecotoxicity and persistence in soil of the herbicide bensulfuron-methyl // J. Environ. Sci. and Health. – 1998. – Vol. 33. – No. 4. – P. 381–398.
37. Donkova R. Biologichna aktivnost na pochvata pri upotreba na khlorosulfuron // Selskostopyu nauka. – 1997. – T. 35. – № 2–3. – S. 48–50.
38. Ismail B.S., Goh K.M., Kader J. Effects of metsulfuron-methyl on microbial biomass and population in soils // J. Environ. Sci. and Health. – 1996. – V. 31. – No. 5. – P. 987–999.
39. Ratcliff A.W., Busse M.D., Shestak C.J. Changes in microbial community structure following herbicide additions to forest soils // Appl. Soil Ecol. – 2006. – Vol. 34. – P. 114–124.
40. Domracheva L.I., Ashikhmina T.Ya., Kondakova L.V., Berezin G.I. Reaktsiya pochvennoy mikrobioty na deystvie pestitsidov (obzor) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2012. – № 3. – S. 4–18.
41. Wang M., Cemava T. Overhauling the assessment of agrochemical-driven interferences with microbial communities for improved global ecosystem integrity // Environ. Sci. Ecotech. – 2020. – Vol. 4. – Art. No. 10006.
42. Dobrovolskiy G.V., Grishina L.A. Okhrana pochv. – M.: Izd-vo MGU, 1985. – 224 s.
43. Ashikhmina T.Ya., Kolupaev A.V., Shirokikh A.A. Biotransformatsiya pestitsidov v nazemnykh ekosistemakh (obzor literatury) // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. – 2010. – № 2. – S. 4–12.
44. Ponneelan K.T.P.B., Subramanian C., Suchitra R., Canech K.C. Studies on the pesticide (Lindane) utilizing in the paddy field // J. Ecotoxicol. Environ. Monit. – 2006. – Vol. 16. – No. 3. – P. 211–214.
45. Golovleva L.A., Finkel'shteyn E.I., Pertsova R.N. Rol' mikroorganizmov v razlozhenii pestitsidov v okruzhayushchey srede // Rezul'taty nauchnykh issledovaniy v praktiku sel'skogo khozyaystva. – M.: Nauka, 1982. – S. 64–73.
46. Bioindikatory i biotestsistemy v otsenke okruzhayushchey sredy tekhnogennykh territoriy / Pod red. T.Ya. Ashikhminoy, N.M. Alalykinoy. – Kirov: O-Kratkoe, 2008. – 336 s.

Сведения об авторах

С.А. Семеренко, зав. лаб., вед. науч. сотр., канд. биол. наук

Н.А. Бушнева, вед. науч. сотр., канд. с.-х. наук

Получено/Received

24.09.2024

Получено после рецензии/Manuscript peer-reviewed

30.09.2024

Получено после доработки/Manuscript revised

04.10.2024

Принято/Accepted

31.10.2024

Manuscript on-line

25.12.2024