

ИЗУЧЕНИЕ ДЕЙСТВИЯ АНТИБАКТЕРИАЛЬНЫХ ПРЕПАРАТОВ, ОТНОСЯЩИХСЯ К ГРУППЕ ФТОРХИНОЛОНОВ НА РИЗОСФЕРУ И ФИЛЛОСФЕРУ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОРГАНИЗМОВ

STUDY OF THE EFFECT OF ANTIBACTERIAL DRUGS BELONGING TO THE GROUP OF FLUOROQUINOLONES ON THE RHIZOSPHERE AND PHYLLOSPHERE OF PLANT ORGANISMS

I. Montana

Summary. The article examines the effect of antibacterial drugs belonging to the group of fluoroquinolones on the rhizosphere and phyllosphere of plant organisms. Fluoroquinolones enter the soil with manure and sewage sludge, where they accumulate and have an adverse effect on the microbiota. The spread of various types of antibiotics, and especially ciprofloxacin, leads to the emergence of antibiotic-resistant bacteria and genes, which causes a decrease in the effectiveness of antibiotics as agents for the treatment of human and animal diseases and affects the microbiota of higher plants. It has been shown that plants not only directly affect the transport of antibiotics in the soil, absorbing and accumulating them, but also depend on antibiotics themselves, which affect the microorganisms of the rhizosphere and phyllosphere, enzymes and root secretions, causing the migration of antibiotics. The antibiotic ciprofloxacin, significantly altering the mechanisms of photosynthesis and respiration, causes toxic effects in plants. It is noted that when a soil solution with fluoroquinolones is absorbed, they are easily absorbed and quickly accumulate first in the roots of plants, and then transferred to the aboveground part of the plant, where they accumulate. Moreover, woody plants have a better ability to absorb antibiotics, because they have a higher absorption potential. Fluoroquinolones can cause resistance in soil microorganisms, inhibit cellular protein synthesis, and subsequently affect cell proliferation. Ciprofloxacin inhibits the formation of tRNA, which blocks the process of protein synthesis. In addition, antibiotics can alter the structure of the microbial community of the rhizosphere and phyllosphere by interfering with the energy metabolism of microorganisms and the metabolic system.

Keywords: antibacterial drugs, fluoroquinolones, plant rhizosphere, plant phyllosphere, ciprofloxacin, antibiotic-resistant bacteria and genes, microbiota of higher plants.

Монтина Ирина Михайловна

Кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования, «Омский государственный педагогический университет»
imontina@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается влияние антибактериальных препаратов, относящихся к группе фторхинолонов на ризосферу и филлосферу растительных организмов. Фторхинолоны попадают в почву с навозом и осадками сточных вод, где они накапливаются и оказывают неблагоприятное воздействие на микробиоту. Распространение разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина ведет к появлению антибиотико-резистентных бактерий и генов, что вызывает снижение эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных и влияет на микробиоту высших растений. Показано, что растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы и филлосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений. Отмечается, что при всасывании почвенного раствора с фторхинолонами, они легко всасываются и быстро накапливаются сначала в корнях растений, а затем переносятся к надземной части растения, где накапливаются. Причем древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов, подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы и филлосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ.

Ключевые слова: антибактериальные препараты, фторхинолоны, ризосфера растений, филлосфера растений, ципрофлоксацин, антибиотикорезистентные бактерии и гены, микробиота высших растений.

Производство различных видов антибиотиков с каждым годом увеличивается. Связано это с их широким применением как в медицине, так в сельском хозяйстве, где особенно много их применяют в животноводстве. Однако только 10–30 % этих антибиоти-

ков усваиваются животными, а остальное количество попадает в экосистемы через экскременты, что приводит к значительному загрязнению почвы и воды [1,2]. Сегодня остатки антибиотиков различных групп, включая сульфаниламиды, макролиды, фторхинолоны и тетра-

циклины, обнаруживаются в различных средах в концентрациях, варьирующихся от наногرامмов до микрограммов на литр или килограмм [3,4].

Сегодня, одной из самых важных групп антибактериальных средств, используемых в медицине и ветеринарии, являются фторхинолоны (ФХ). Эти препараты попадают в почву из-за растущей практики внесения навоза и осадка сточных вод на сельскохозяйственные поля, где они могут накапливаться и оказывать неблагоприятное воздействие на микробиоту. Остаточные концентрации фторхинолонов в почве варьируются от нескольких мкг до г/кг⁻¹ и соответствуют концентрациям пестицидов [5].

Одним из наиболее широко используемых в мире фторхинолоновых антибиотиков является ципрофлоксацин. Он широко применяется в терапии человека и в животноводстве [6]. Последствиями распространения разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина в почве уделяется большое внимание, т.к. отмечается появление антибиотикорезистентных бактерий и генов [7], так называемым резистом [8], что ведет к снижению эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных. Особенно серьезную озабоченность в последние годы вызывает негативное действие антибиотиков не столько на природные микробиомы, сколько на представителей других трофических уровней в экосистеме, и в первую очередь, на высшие растения [9, 10].

Антибиотики, получаемые химическим путем из метаболитов растений, животных или микроорганизмов, особенно бактерий, становятся все более распространенными в системах почва-микроорганизм-растение, причем и в домашних условиях, и в быту, создавая значительную угрозу для окружающей среды и здоровья человека [11].

Попадая в почву, все антибиотики, независимо от их строения, подвергаются процессам адсорбции, миграции и разложения и это имеет решающее значение для экологического равновесия. Воздействие антибиотиков на окружающую среду зависит от связывания с почвой, адсорбционных свойств и скорости разложения, которые, в свою очередь, зависят от влажности, кислотности, структуры и температуры почвы [12]. Однако всесторонние исследования факторов, вызывающих деградацию антибиотиков остаются ограниченными [13].

Способность растений поглощать, переносить и разлагать антибиотики является очень одним из самых важных направлений изучения снижения уровня антибиотиков в окружающей среде. Растительные организмы являются первичными продуцентами органической материи и преднамеренно или непреднамеренно подвергаются воздействию химических токсикантов и в

дальнейшем служат звеном их передачи по пищевым цепочкам. Все растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков [14]. Микроорганизмы ризосферы существенно влияют на динамику антибиотиков, а также изменяют характеристики почвы и разнообразие микроорганизмов, что влияет на поведение антибиотиков в системах почва-микроорганизм-растение [15], что особенно важно в системе ризосферы растений.

Влияние антибиотиков на растения в почвенно-растительных системах проявляется не только в опосредованном воздействии через микроорганизмы ризосферы, но и также во влиянии на филлосферу, которое может выражаться в прямом подавлении роста растений. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений [16]. Известное водное растение ряска *Lemna minor* L. способно поглощать ципрофлоксацин, что сказывается на изменении окислительной активности ряски [17]. При этом наблюдается 50%-ное подавление ростовых тестфункций ряски, которые, однако, различаются в разных условиях. Исследования *L. minor* в течение 7 суток показали, что токсичной концентрацией ципрофлоксацина может быть концентрация от 0,203 мг/л [18] до 3,75 мг/л [17].

Так, при воздействии сульфонамида наблюдалось угнетение проростков у растений чечевицы (*Lens culinaris*), риса (*Oryza sativa*) и капусты (*Brassica campestris*) [19].

Поглощение растениями антибиотиков существенно влияет на физические, химические и биологические реакции препаратов, попадающих в почву, что приводит к их полному поглощению и преобразованию в растительном организме. Однако это поглощение значительно зависит от вида растений и часто является определяющим фактором [20].

На эффективность усвоения растениями антибиотиков в значительной степени влияют такие факторы, как количество и длина листьев, а также характеристики корней. Учеными было выявлено, что окситетрациклин (безрецептурный препарат) накапливается в большей степени в проводящей системе, чем в листьях, что связано с видоспецифичностью усвоения [21]. Однако исследования показывают, что большинство антибиотиков обладают более высокой концентрацией в корнях, а не в листьях и стеблях, но при этом корневая система действует как канал для переноса в надземный орган и ткани растений различных классов антибиотиков. Следовательно, чем более развита корневая система у растения, тем активнее идет всех транспорт веществ и,

в том числе антибиотиков. Например, в плодах томатов и других видов видах пасленовых, накапливается больше антибиотиков, чем в листовых овощах. Связано это с более развитой корневой системой пасленовых. Было обнаружено, что коэффициент накопления антибиотиков, показатель, используемый для сравнения способности различных овощей накапливать антибиотики из почвы, колеблется от 6,20 до 8,44 для пасленовых и от 1,47 до 1,58 для листовых овощей [22].

На усвоение антибиотиков корнями растений значительно влияет молекулярная масса препарата. Антибиотики, растворенные в почвенной воде, активно всасываются растениями. В соответствии с особенностями всасывания антибиотики можно разделить на три класса: 1) антибиотики с высокой липофильностью, которые в основном адсорбируются липидами корней и, как правило, не транспортируются в растение, оставаясь в ризосфере; 2) антибиотики блокируются за пределами корней растений и не попадают в ризосферу; 3) антибиотики попадают в растение при всасывании через корневую систему и переносятся по проводящей системе по растению, попадая в стебли, листья и плоды и накапливаясь там [23].

Исследования показали, что при всасывании почвенного раствора с начальной концентрацией фторхинолонов в воде 1 000 мкг/л, они легко всасываются и быстро накапливаются в корнях растения *Eichhornia crassipes* в концентрации 1 645,2 мкг/г. Но растение обладает способностью переносить антибиотики от корней к надземной части растения, причем средний коэффициент биоконцентрации в листьях равен 0,34 [24].

После длительного орошения томатов водами, содержащими антибиотики, обнаружено, что коэффициент биоконцентрации варьировался от 0,178 до 6,441 [25].

Антибиотики с низкой молекулярной массой проявляют более высокую подвижность в различных тканях растения, чем антибиотики высокой молекулярной массы. Тетрациклин и хлорамфеникол накапливают больше всего в плодах, за ними следуют стебли и листья, с наименьшим распределением в корнях [25]. Высокая концентрация макролидов препятствует их усвоению многими растениями. Липофильные антибиотики эритромицин, рокситромицин и азитромицин поглощаются корнями в следовых количествах. Концентрация гемифлоксацина более высокая в наружном слое корнеплодов (8,5 мкг/кг), чем во внутреннем (2,8 мкг/кг) [27].

Древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Это было подтверждено с помощью количественного анализа на примере исследований *Rhizophora stylosa* Griff. и *Avicennia marina* (Forssk.). Эти

растения накапливают 366,6 мкг/кг и 1 306,3 мкг/кг фторхинолонов соответственно за счет поглощения корнями. Прямое поглощение древесными растениями из ризосферы является основным фактором, препятствующим миграции и трансформации антибиотиков. Например, было обнаружено, что содержание фторхинолонов в ризосфере *Aegiceras corniculatum* (L.) Blanco и *Kandelia candel* (L.) Druce примерно в два раза превышает содержание их в почве без ризосферы. Таким образом, ризосфера способствовала миграции антибиотиков к корням древесных растений для поглощения и разложения.

Было установлено, что по отношению к общей массе антибиотиков, накопленных в растениях (1,66 мг), содержание антибиотиков в различных частях персика (*Amygdalus persica* L.) значительно отличается. Процент накопления антибиотиков следующий: корни — 0,031 % > стебель — 0,021 % > листья — 0,013 % > плоды — 0,007 % [28].

Многие молекулы антибиотиков состоят из неполярного ядра в сочетании с полярными функциональными группами. Многие антибиотики являются амфифильными или амфотерными и легко ионизируются. Однако физико-химические свойства соединений из разных структурных классов сильно различаются. Воздействие на почвенные организмы может быть самым разным, хотя все антибиотики обладают высокой биологической активностью. Отсутствие воздействия может быть отчасти связано с отсутствием подходящих методов тестирования. Тем не менее, часто наблюдаются эффекты, связанные с дозой и сроком хранения в почве. Особенно это связано с почвенными микроорганизмами, т.к. это может привести к значительному изменению микробного сообщества.

Из-за антибиотического эффекта фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов. Кроме того, применение таких антибиотиков в основном приводит к образованию резистентных микроорганизмов в организме, который лечат этими препаратами. В дальнейшем эти резистентные микроорганизмы попадают непосредственно в почву с зараженными экскрементами. Если патогены уже резистентны или приобретают в результате переноса генов резистентность от комменсальных микроорганизмов, то люди и животные подвергаются риску заражения инфекциями, которые невозможно вылечить с помощью любых известных препаратов. Многие сохраняют свои свойства даже при длительном нахождении в биосистемах [14].

Исследования показали, что даже при выдержке биоккультуры с антибиотиками на открытом воздухе в течение года, в ней были обнаружены достаточно высокие концентрации ципрофлоксацина, энрофлоксацина и те-

трациклина, что показывает ограниченную эффективность удаления антибиотиков во время выдержки и, следовательно, на медленное разложение антибиотиков в таких условиях. В ходе различных исследований было установлено, что ципрофлоксацин, основной метаболит энрофлоксацина, и тетрациклины хорошо адсорбируются почвой и длительно сохраняются в ней, и в даже в очень низких концентрациях способны подавлять активность естественных микроорганизмов. Скорость деградации таких препаратов значительно варьируется и зависит от различных факторов, таких как температура, структура, содержание органического углерода и активность микроорганизмов [5].

Различные органы растений, могут усваивать разные виды антибиотиков. Поэтому растения с хорошо развитыми корнями и надземной частью обладают большим коэффициентом накопления антибиотиков. Особенно важны в этом процессе корни. Однако в зоне корневых систем растений находится огромное количество ризосферных микроорганизмов, а также ферментов, влияющих на антибиотики. Антибиотики вызывают изменения в микробном сообществе ризосферы и филлосферы, а также связанных с ними ферментами [29].

Взаимодействие между ферментами ризосферы и антибиотиками может идти в нескольких различных направлениях. Антибиотики могут подвергаться биоаккумуляции, биосорбции, биodeградации или биотрансформации под действием почвенных и ризосферных микроорганизмов, которые обладают способностью поглощать, использовать и преобразовывать антибиотики в почвенной среде. Исследования показали, что виды, способные участвовать в миграции и трансформации антибиотиков, представлены в основном актиномицетами. Однако все ризосферные и филлосферные микроорганизмы, независимо от их количества важны для роста и развития растений [30].

Антибиотики значительно влияют на рост и метаболизм микроорганизмов и структуру микрофлоры. Антибиотики могут снижать активность микроорганизмов за счет нескольких механизмов, включая нарушение функции белков, ингибирование синтеза нуклеиновых кислот, изменение внутренней микрофлоры, а также нарушение энергетического метаболизма микроорганизмов и системы обмена веществ [31].

Существуют некоторые микроорганизмы ризосферы, которые адаптируются к антибиотическому стрессу, что позволяет им стать доминирующими штаммами, участвующими в разложении антибиотиков и стимулирующими рост определенных групп микроорганизмов. Кроме того, антибиотики могут воздействовать на ферменты растений или микроорганизмов, что приводит к усилению или ингибированию определенных ферментатив-

ных реакций, происходящих в зоне корневой системы. Ризосферные микроорганизмы являются высокочувствительными к антибиотикам, даже в низких концентрациях. Некоторые антибиотики подавляют структуру и функцию клеточной стенки и клеточной мембраны ризосферных микроорганизмов. Некоторые антибиотики вредят ризосферным микроорганизмам, препятствуя синтезу и экспрессии нуклеиновых кислот и белков [31].

Как правило, наиболее чувствительными являются микроорганизмы, подобные патогенам, против которых созданы антибиотики. Антибиотики широкого спектра действия (например, тетрациклины, фторхинолоны) могут подавлять очень широкий спектр природных бактерий. Это вызывает снижение микробного разнообразия и нарушает равномерность распределения видов микроорганизмов. Краткосрочные исследования часто обнаруживают снижение количества грамположительных бактерий (если антибиотик является β -лактамом или макролидом) или грамотрицательных (для хинолонов) по сравнению с необработанными контрольными образцами [32]. Популяции грибов, особенно плесневых, могут резко увеличиваться, в условиях, когда под действием антибиотиков идет подавление их бактериальных конкурентов. Исследования показали, что в обработанной антибиотиками почве, наблюдается активный рост грибной биомассы. Связано это с тем, что снижается количество бактерий, которые обычно сдерживают рост грибов [33].

Фторхинолоны могут подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Стрептомицин и безрецептурные препараты влияют на синтез белка, нарушая функцию рибосом. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ. Обнаружено, что высокие концентрации антибиотиков приводят к снижению активности микроорганизмов, неспособности микроорганизмов адаптироваться к стрессу, вызванному антибиотиками, и снижению биомассы и разнообразия. Антибиотики могут вызывать изменение качества ризосферных экссудатов или приводить к нестабильности их состава [34].

Таким образом, человечество сегодня применяет в медицине и ветеринарии огромное количество антибактериальных средств, и среди них наиболее используемые фторхинолоны. Эти препараты попадают в почву на сельскохозяйственные поля с навозом и осадками сточных вод, где они накапливаются и оказывают неблагоприятное воздействие на микробиоту. Распространение разных видов антибиотиков и особенно ципрофлоксацина ведет к появлению антибиотикорезистентных

бактерий и генов, что вызывает снижению эффективности антибиотиков как средств для лечения болезней человека и животных и влияет на микробиоту высших растений. Воздействие антибиотиков на окружающую среду зависит от связывания с почвой, адсорбционных свойств и скорости разложения, которые, в свою очередь, зависят от влажности, кислотности, структуры и температуры почвы. Растения способны поглощать, переносить и разлагать антибиотики является очень одним из самых важных направлений изучения снижения уровня антибиотиков в окружающей среде. Однако все растения не только напрямую влияют на транспорт антибиотиков в почве, поглощая их и накапливая, но и сами зависят от антибиотиков, которые влияют на микроорганизмы ризосферы и филлосферы, ферменты и корневые выделения, вызывая миграцию антибиотиков. Микроорганизмы ризосферы существенно влияют на динамику антибиотиков, а также изменяют характеристики почвы и разнообразие микроорганизмов, что влияет на поведение антибиотиков в системах почва-микроорганизм-растение. Антибиотик ципрофлоксацин, значительно изменяя механизмы фотосинтеза и дыхания, вызывает токсические эффекты у растений. На усвоение антибиотиков корнями растений значительно влияет молекулярная масса препарата. Антибиотики, растворенные в почвенной воде, активно всасываются растениями. Исследования показали, что при всасывании почвенно-

го раствора с фторхинолонами, они легко всасываются и быстро накапливаются сначала в корнях растений, а затем переносятся к надземной части растения, где накапливаются. Причем древесные растения обладают лучшей способностью поглощать антибиотики, т.к. имеют более высокий потенциал поглощения. Фторхинолоны могут вызывать резистентность у почвенных микроорганизмов. Антибиотики значительно влияют на рост и метаболизм микроорганизмов и структуру микрофлоры. Антибиотики могут снижать активность микроорганизмов за счет нескольких механизмов, включая нарушение функции белков, ингибирование синтеза нуклеиновых кислот, изменение внутренней микрофлоры, а также нарушение энергетического метаболизма микроорганизмов и системы обмена веществ. Фторхинолоны могут подавлять синтез клеточного белка и впоследствии влиять на пролиферацию клеток. Ципрофлоксацин ингибирует образование тРНК, которая блокирует процесс синтеза белка. Кроме того, антибиотики могут изменять структуру микробного сообщества ризосферы и филлосферы, вмешиваясь в энергетический метаболизм микроорганизмов и систему обмена веществ. Обнаружено, что высокие концентрации антибиотиков приводят к снижению активности микроорганизмов, неспособности микроорганизмов адаптироваться к стрессу, вызванному антибиотиками, и снижению биомассы и разнообразия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Massé D.I., Cata Saady N.M., Gilbert Y. (2014): Potential of biological processes to eliminate antibiotics in livestock manure: an overview. *Animals*, 4: 146–163
2. Ngigi A.N., Ok Y.S., Thiele-Bruhn S. (2019): Biochar-mediated sorption of antibiotics in pig manure. *Journal of Hazardous Materials*, 364: 663–670
3. Cheng J.H., Zhang H.J., Wang W., Zhang Y.Y., Chen Y.Z. (2011): Changes in preferential flow path distribution and its affecting factors in southwest China. *Soil Science*, 176: 652–660.
4. Zhao X.D., Qiao Q.Q., Qin X.R., Li X.J., Li Y.T. (2023): Characteristics of antibiotics contamination in soil of China in recent fifteen years and the bioremediation technology: a review. *Environmental Science*, 44: 4059–4076.
5. Picó Y., Andreu V. Fluoroquinolones in soil—risks and challenges. *Anal Bioanal Chem* 387, 1287–1299 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00216-006-0843-1>
6. Antonelli R., Malpass G.R.P., da Silva M.G.C., Vieira M.G.A. Adsorption of ciprofloxacin onto thermally modified bentonite clay: experimental design, characterization, and adsorbent regeneration // *J. Environ. Chem. Eng.* — 2020. — V. 8. — P. 104553. doi: 10.1016/j.jece.2020.104553.
7. Zhang M., Zuo J., Yu X., Shi X., Chen L., Li Z. Quantification of multi-antibiotic resistant opportunistic pathogenic bacteria in bioaerosols in and around a pharmaceutical wastewater treatment plant // *J. Environ. Sci.* — 2018. — V. 72. — P. 53–63. DOI: 10.1016/j.jes.2017.12.011.
8. Кожевин П.А., Виноградова К.А., Булгакова В.Г. Почвенная антибиотическая резистомы // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение.* — 2013. — № 2. — С. 3–10.
9. Тимофеева С.С., Гудилова О.С. Антибиотики в окружающей среде: состояние и проблемы // *XXI век, Техносферная безопасность.* — 2021. — Т. 6. — № 3. — С. 251–265.
10. Стимулирующий фитоэффект Fe_3O_4 -активированного угля при комбинированном загрязнении почвы антибиотиком ципрофлоксацином и медью / А.А. Дзержанов, Г.С.К. Самбрано, А.Д. Батаков [и др.] // *Проблемы агрохимии и экологии.* — 2023. — № 4. — С. 27–35. — DOI 10.26178/AE.2023.49.37.006. — EDN YUODSI.
11. Liu B.Y., Liu W.Q., Nie X.P., Guan C., Yang Y.F., Wang Z.H., Liao W. (2011): Growth response and toxic effects of three antibiotics on *Selenastrum capricornutum* evaluated by photosynthetic rate and chlorophyll biosynthesis. *Journal of Environmental Sciences*, 23: 1558–1563
12. Wang J.H., Wang L.J., Zhu L.S., Wang J., Xing B.S. (2022): Antibiotic resistance in agricultural soils: source, fate, mechanism, and attenuation strategy. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 52: 847–889.
13. Zhang Y. (2022): Impacts of Long-term Application of Manure on the Accumulation and Migration of Antibiotic Resistance Genes in Purple Soils with Different pH. Chongqing, Southwest University.
14. Chen J.Y., Liu D.Y., Zhao Y., Sun X.H. (2021): Research progress on the synergistic effects between plant active ingredients and antibiotics to reduce drug resistance of bacteria. *Natural Product Research and Development*, 33: 1063–1071.

15. Xiao Z.F., Han R.X., Su J.Q., Zhu Z., Zhao Y., Chen Q.L., Zhao J.Y., Li G., Zhu Y.G. (2023): Application of earthworm and silicon can alleviate antibiotic resistance in soil-Chinese cabbage system with ARGs contamination. *Environmental Pollution*, 319: 120900
16. Gomes M.P., Gonçalves C.A., de Brito J.C.M., Souza A.M., da Silva Cruz F.V., Bicalho E.M., Figueredo C.C., Garcia Q.S. Ciprofloxacin induces oxidative stress in duckweed (*Lemna minor* L.): Implications for energy metabolism and antibiotic uptake ability // *J. Hazard. Mater.* — 2017. — V. 328. — P. 140–149. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.01.005
17. Nunes B., Veiga V., Frankenbach S., Serôdio J., Pinto G. Evaluation of physiological changes induced by the fluoroquinolone antibiotic ciprofloxacin in the freshwater macrophyte species *Lemna minor* and *Lemna gibba* // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* — 2019. — P. 103242. doi: 10.1016/j.etap.2019.103242.
18. Robinson A.A., Belden J.B., Lydy M.J. Toxicity of fluoroquinolone antibiotics to aquatic organisms // *Environ. Toxicol. Chem.* — 2005. — V. 24. — P. 423–430. doi: 10.1897/04-210r.1
11. Cheong M.S., Seo K.H., Chohra H., Yoon Y.E., Choe H., Kantharaj V., Lee Y.B. Influence of sulfonamide contamination derived from veterinary antibiotics on plant growth and development // *Antibiotics*. — 2020. — V. 9, No. 8. — P. 456. doi:10.3390/antibiotics9080456.
19. Cheong M.S., Seo K.H., Chohra H., Yoon Y.E., Choe H., Kantharaj V., Lee Y.B. Influence of sulfonamide contamination derived from veterinary antibiotics on plant growth and development // *Antibiotics*. — 2020. — V. 9, No. 8. — P. 456. doi:10.3390/antibiotics9080456.
20. Tadić Đ., Bleda Hernandez M.J., Cerqueira F., Matamoros V., Piña B., Bayona J.M. (2021): Occurrence and human health risk assessment of antibiotics and their metabolites in vegetables grown in field-scale agricultural systems. *Journal of Hazardous Materials*, 401: 123424.
21. Matamoros V., Escolà Casas M., Mansilla S., Tadić Đ., Cañameras N., Carazo N., Portugal J., Piña B., Díez S., Bayona J.M. (2022): Occurrence of antibiotics in lettuce (*Lactuca sativa* L.) and radish (*Raphanus sativus* L.) following organic soil fertilisation under plot-scale conditions: crop and human health implications. *Journal of Hazardous Materials*, 436: 129044.
22. Hu J.Z., Zhang X., Wang Y.Q., Xu J.M., Lu H.B., Ye C.B., Liu X.H., Chen Z.B., Lu S.Y. (2022): Responses of plants and rhizosphere microorganisms in constructed wetlands under sulfamethoxazole stress. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 12: 1474–1483.
23. Boonsaner M., Hawker D.W. (2010): Accumulation of oxytetracycline and norfloxacin from saline soil by soybeans. *Science of the Total Environment*, 408: 1731–1737
24. Yan Y., Pengmao Y.Z., Xu X.G., Zhang L.M., Wang G.X., Qiu J., Chen L.A. (2020): Migration of antibiotic ciprofloxacin during phytoremediation of contaminated water and identification of transformation products. *Aquatic Toxicology (Amsterdam, Netherlands)*, 219: 105374.
25. Christou A., Karaolia P., Hapeshi E.H., Michael C., Fatta-Kassinos D. (2017): Long-term wastewater irrigation of vegetables in real agricultural systems: concentration of pharmaceuticals in soil, uptake and bioaccumulation in tomato fruits and human health risk assessment. *Water Research*, 109: 24–34.
26. Pan M., Chu L.M. (2017): Transfer of antibiotics from wastewater or animal manure to soil and edible crops. *Environmental Pollution*, 231: 829–83.
27. Boxall A.B.A., Johnson P., Smith E.J., Sinclair C.J., Stutt E., Levy L.S. (2006): Uptake of veterinary medicines from soils into plants. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54: 2288–2297.
28. Zhao F., Chen L., Yen H., Sun L., Li S., Li M., Feng Q., Yang L. (2020): Multimedia mass balance approach to characterizing the transport potential of antibiotics in soil-plant systems following manure application. *Journal of Hazardous Materials*, 393: 1223636
29. Kumar A., Dubey A. (2020): Rhizosphere microbiome: engineering bacterial competitiveness for enhancing crop production. *Journal of Advanced Research*, 24: 337–352.
30. Zhan F.D., Lu Y.G., Guan G.J., Tang Y.J., Zhang Y.C., Huang J.G. (2005): Community structure of microorganisms and their dynamics in the rhizosphere of fluecured tobacco. *Acta Pedologica Sinica*, 3: 488–494.
31. Zhang B., Chen L., Jin S., Guo Q.Z., Hou J. (2022): The influence of plants on the migration and transformation of nitrogen in plant-soil systems: a review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22: 4084–4102.
32. Chuikov Yu.S., Chuikova L.Yu., Mustakova M.R. Geoeological Features of the Territory and Communal Services (Astrakhan) // *Astrakhan Bulletin of Environmental Education*. 2023. № 1 (73). Pp. 106–125.
33. Чуйков Ю.С. Антибиотики и их роль в природных и антропогенных экосистемах / Ю.С. Чуйков, Л.Ю. Чуйкова // Астраханский вестник экологического образования. — 2025. — № 2(86). — С. 82–106. — DOI 10.36698/2304–5957-2025-2-82-106. — EDN MPNFFH.
34. Liu X.W., Fang F., Li L.L., Deng C.X., Hu S.H., Yu Z.M. (2022): Preliminary study on antibiotic resistance genes and bacterial communities on two types of micro-plastics under sulfamethoxazole stress. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 17: 200–210.

© Монтин Ирина Михайловна (imontina@mail.ru)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»