

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.416:631.

ВЛИЯНИЕ РИЗОСФЕРНЫХ БАКТЕРИЙ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ СОЕДИНЕНИЙ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ

© 2022 г. И. О. Плеханова^{а, *}, В. О. Куликов^а, В. П. Шабаев^б

^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

^бИнститут физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
ул. Институтская, 2, Пушкино, Московская обл., 142290 Россия

*e-mail: irinaoplekhanova@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2022 г.

После доработки 15.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

Представлены результаты вегетационного опыта на гумусовом горизонте дерново-подзолистой супесчаной почвы (Albic Retisol), которая до 1990 г. загрязнялась тяжелыми металлами путем внесения осадков сточных вод, в последующие 20 лет использовалась для выращивания кормовых трав и последние 10 лет находится в залежи. В опыте изучено влияние ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* на фракционный состав соединений тяжелых металлов Cu, Zn, Cd, Ni и Pb в почве и поступление их в вегетативные органы и корневую систему растений яровой пшеницы. Под влиянием инокуляции бактериями изменилось содержание и соотношение форм соединений тяжелых металлов в почвах опыта: увеличилось содержание подвижных и связанных с органическим веществом соединений Cd, увеличилось содержание Cu, Ni, Pb и Zn, связанных с органическим веществом и соединениями железа. Отмечено уменьшение содержания Cd и Zn в вегетативной массе растений пшеницы и увеличение соотношения содержания элементов в корнях и вегетативной массе растений, что свидетельствует об увеличении устойчивости растений к токсическому действию тяжелых металлов и увеличении барьерной функции корней.

Ключевые слова: тяжелые металлы, фракции соединений, бактерии рода *Pseudomonas*, барьерные функции корней, металлы в растениях

DOI: 10.31857/S0032180X22090143

ВВЕДЕНИЕ

Изучение загрязнения почв тяжелыми металлами (ТМ) имеет продолжительную историю и является актуальной задачей в настоящее время. Особенно опасно поступление ТМ в агроценозы с органическими и минеральными удобрениями, где они могут непосредственно поступать в организм человека и животных по пищевым цепям. Одним из таких источников являются осадки сточных вод (ОСВ), дозы которых до 1990 г. не нормировались и вызвали значительное загрязнение почв сельскохозяйственного назначения [1, 9–12].

Продолжительность пребывания ТМ в почвах может достигать сотен лет, что определяется свойствами как самих элементов, так и почв, способных прочно удерживать ТМ за счет механизмов обмена, адсорбции, комплексообразования или осаждения в зависимости от значений pH, гранулометрического и минералогического состава, а также состава и содержания органического вещества [5, 10, 11]. Продолжительная аккумуля-

ция ТМ в почвах и возможность поступления их в природные воды и растения определяют необходимость развития и изучения новых методов их ремедиации [4, 19, 20, 22, 27].

В последние десятилетия широкое распространение получило применение биопрепаратов, разработанных на основе ризосферных бактерий группы Plant Growth Promoting Rhizobacteria для стимуляции роста растений. Показано, что такие биопрепараты, не только оказывают стимулирующее воздействие на многие виды сельскохозяйственных культур, но увеличивают их устойчивость к различным видам загрязнения почв, таким как тяжелые металлы, мышьяк, нефть, радионуклиды [13–15, 18, 19]. Их использование может быть эффективно для фиторемедиации загрязненных почв [6, 14, 16, 17, 19, 22, 23].

Экологические аспекты использования ризосферных бактерий особенно актуальны в настоящее время, когда антропогенное воздействие на почвы и растения привело к значительному увеличению площадей загрязненных земель и ухудшению качества растительной продукции. Одним

из источников загрязнения почв сельскохозяйственного назначения являются ОСВ [1, 11, 12, 24].

До сих пор недостаточно исследованы процессы трансформации соединений, входящих в состав ОСВ, не ясны механизмы взаимодействия ТМ, поступающих в составе ОСВ с почвенными компонентами. Недостаточно изучено значение органического вещества, от состояния которого зависит судьба связанных с ним ТМ. Мало изучено взаимодействие органического вещества с ТМ в процессе длительной трансформации. В природных условиях происходит разложение органического вещества и, как следствие, переосаждение и реадсорбция ионов металлов с одних реакционных центров на другие. Для изучения эффективности действия мелиорантов часто используют методы последовательного фракционирования, которые позволяют выявить механизмы трансформации соединений ТМ и роль различных почвенных компонентов в этом процессе, их влияние на подвижность ТМ в почвах.

Последовательная экстракция соединений ТМ показывает их распределение по связи с основными почвенными компонентами – носителями ТМ [5, 7, 10]. Таких центров концентрирования выделено немного: карбонаты, фосфаты, гумусовые вещества, (гидр)оксиды железа и марганца, глинистые минералы. Метод последовательного экстрагирования широко применяется отечественными [2, 5, 7, 8] и зарубежными исследователями [21, 26] для решения теоретических и прикладных задач почвоведения.

Цель работы – изучение влияния ризосферных бактерий на фракционный состав соединений ТМ в почвах, загрязненных в результате применения ОСВ, а также накопления их растениями пшеницы в условиях вегетационного опыта.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводили на старопашотной дерново-подзолистой супесчаной почве Балашихинского района Московской области (слой 0–20 см). Источником загрязнения почв были ОСВ Люберецкой станции аэрации, которые вносили в качестве органических удобрений до 1990 г. Изначально почвы использовали для выращивания овощных культур и кормовых трав, они отличались высоким содержанием гумуса, нейтральной реакцией среды, были высоко обеспечены основными элементами питания растений (N, P, K) [11, 12]. С 2012 г. почвы находятся в состоянии залежи.

Для изучения влияния ризосферных бактерий на фракционный состав соединений ТМ в почвах был поставлен вегетационный опыт. Из пахотного горизонта одного из полей были отобраны образцы почв с пробных площадок размером 10 м². Почвенные образцы усредняли, высушивали,

просеивали и оставляли в сосудах, наполненных 800 г почвы, увлажненной до 60% от полной влагоемкости, на прединкубацию на 10 сут при 22°C.

В почву перед посевом растений вносили азотное удобрение в виде азотнокислого аммония из расчета 100 мг N/кг почвы по 5 сосудов для каждого варианта. В контрольном варианте растения выращивали без инокуляции бактериями, в трех других при инокуляции бактериями *P. fluorescens um.* 20, *P. fluorescens um.* 21, *P. putida um.* 23. При посеве семена пшеницы сорта Злата раскладывали на почву и инокулировали водными суспензиями чистых культур бактерий в водопроводной воде из расчета 10⁸ клеток на растение и засыпали тонким слоем почвы. В варианте без инокуляции вносили аналогичное количество автоклавированных бактериальных суспензий. Влажность почвы в сосудах поддерживали на уровне 60% от полной влагоемкости. Выращивали по 10 растений яровой пшеницы до фазы трубкования в течение 28 дней.

Содержание органического вещества в образцах почв определяли общепринятыми методами, рН – потенциометрически при соотношении почва : вода 1 : 5. Для подготовки к анализу растений использовали метод сухого озоления в муфельной печи при температуре 450°C, затем золу переносили в мерные колбы и доводили до метки раствором 1 М HNO₃. Все определения проводили в пятикратной повторности. Содержание ТМ измеряли методом ИСП-ОЭС на оптико-эмиссионном спектрометре Agilent 5110 (ФР.1.29.2006.02149).

Статистическую обработку полученных данных выполняли с использованием пакета программ MS Excel 2010.

Фракционный состав соединений ТМ определяли путем последовательного извлечения фракций из одной навески почвы по схеме, основанной на опыте отечественных ученых [7, 10] с некоторыми изменениями, касающимися стандартизации времени экстрагирования и центрифугирования. Соединения, связанные с органическим веществом, извлекали после взаимодействия с пероксидом водорода и нагревания, затем экстрагировали с помощью CH₃COONH₄ рН 4.8, вместо 1 М азотной кислоты, которая завышает долю ТМ в этой фракции. Ранее было показано, что результаты, полученные с использованием предложенной схемы фракционирования соединений ТМ, в значительной степени согласуются с теоретическими представлениями о химических свойствах элементов и их поведении в почвах [10]. Применение реактивов, принятых в агрохимии для оценки состояния металлов в почвах, позволяет рекомендовать предложенный метод фракционирования соединений при разработке стратегий ремедиации загрязненных почв (табл. 1).

Таблица 1. Схема выделения фракций тяжелых металлов из почв

Фракция соединений ТМ	Экстрагент	Условия извлечения	Соотношение почва : раствор	Время (мин) центрифугирования при 6000 об./мин
Обменная	1 М $\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 7	1 ч на ротаторе, центрифугирование	1 : 10	20
Слабоспецифически адсорбированная	$\text{CH}_3\text{COONH}_4$, pH 4.8	1 ч на ротаторе, центрифугирование	1 : 10	20
Связанная с органическим веществом	30% H_2O_2 , 2 ч при 85°C, затем $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с pH 4.8	1 ч на ротаторе, центрифугирование	1 : 10	20
Связанная с аморфными гидр/оксидами Fe	Реактив Тамма	Встряхивание на ротаторе 1 ч	1 : 20	20
Связанная с окристаллизованными гидр/оксидами Fe	Реактив Тамма при облучении ультрафиолетом, 2 ч	Встряхивание на ротаторе 1 ч	1 : 20	20
Остаточная	$\text{HCl} + \text{HNO}_3$, соотношение 3 : 1, настаивание 12 ч, упаривание	Растворение в 1 н HNO_3 при нагревании, фильтрование	1 : 20	—

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Последние 10 лет почва находилась в условиях залежи. За это время изменились некоторые химические свойства: уменьшилось содержание органического вещества, P, K и обменных катионов, но значения pH остались высокими (табл. 2). Значительно снизился и уровень загрязнения почв по сравнению с исходным [9, 11, 12], но основные ТМ, которые были характерны для ОСВ и почв, которые были удобрены – это Zn и Cd, все еще превышают допустимый уровень содержания

(ОДК) для супесчаных почв, а содержание Cu достигает ОДК (табл. 3).

Под влиянием ризосферных бактерий изменилось содержание и соотношение форм соединений ТМ в почвах опыта. Основная часть соединений Cd в почвах, не инокулированных ризосферными бактериями, представлена обменными и подвижными – слабоспецифически сорбированными соединениями. В почвах, обработанных бактериями, увеличилось содержание подвижных и связанных с органическим веществом соединений Cd для вариантов, инокулированных

Таблица 2. Агрохимические свойства дерново-подзолистой супесчаной почвы опыта

Год	$\text{C}_{\text{орг}}$, %	$\text{pH}_{\text{водн}}$	$\text{pH}_{\text{сол}}$	P_2O_5	K_2O	Ca^{2+}	Mg^{2+}	ЕКО
				мг/100 г		смоль(экв)/кг		
1991 г.	3.2	6.9	6.7	393	152	8.3	0.9	8.7
2021 г.	1.95	7.15	6.2	98.4	44	9.97	1.94	9.2

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в дерново-подзолистой супесчаной почве через 30 лет после применения ОСВ (мг/кг)

Показатель	Cu	Zn	Cd	Ni	Pb
Подвижные соединения, 1991/2021 гг.	18/1.94	97/17.5	5.8/0.87	9/0.56	3/0.6
Валовое содержание, 1991/2021 гг.	148/33.4	285/127.4	10.0/2.24	48/12.9	40.0/18.1
ОДК валового содержания	33	55	0.5	20	32

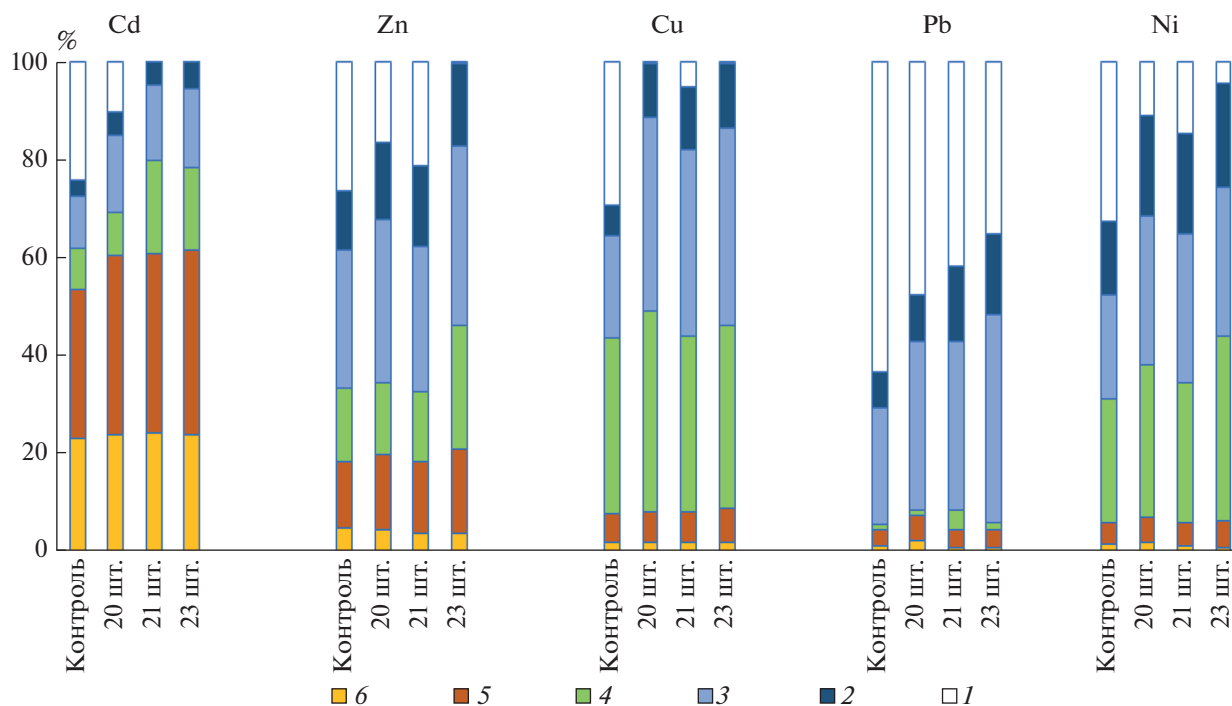


Рис. 1. Влияние ризосферных бактерий на фракционный состав соединений Cu, Zn, Cd, Ni и Pb в дерново-подзолистых супесчаных почвах, % от валового содержания. Обозначение фракций: 1 – остаточная; 2 – связанная с окристаллизованными соединениями Fe; 3 – связанная с аморфными соединениями Fe; 4 – связанная с органическим веществом; 5 – специфически адсорбированная; 6 – обменная.

бактериями *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23. Также отмечено увеличение содержания Zn, связанного с органическим веществом и соединениями Fe в почве, инокулированной бактериями *P. putida* 23 (рис. 1).

Для Cu и Ni установлено значительное увеличение содержания соединений этих элементов во фракции, связанной с органическим веществом и соединениями Fe при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 20, *P. putida* 23 и, в меньшей степени, бактериями *P. Fluorescens* 21.

Значительная часть соединений Pb связана с оксидами и гидроксидами Fe, а также удерживается в остаточной фракции, что особенно характерно для контрольных вариантов почвы, без применения ризосферных бактерий. Часто Pb рассматривают как оргонофил, но его доля во фракции, связанной с органическим веществом, мала. Вероятно, после разрушения органического вещества перекисью водорода, происходит вторичное поглощение Pb железистой фракцией [3, 5, 10, 21]. Соединения Fe являются важнейшей сорбционной системой в почвах и благодаря высокому содержанию в почвах и способности к образованию полимолекулярных пленок на поверхности глинистых минералов взаимодействуют с ионами металлов путем вытеснения ионов H^+ , входящих в ОН-группы. Значительная часть со-

единений Cu, Ni и Pb удерживается именно в этой фракции. Таким образом, представленный метод фракционирования позволяет выявить особенности каждого элемента в распределении по группам соединений.

После обработки почв ризосферными бактериями доля Pb в железистой фракции и связанной с органическим веществом увеличилась в большей степени для вариантов, инокулированных бактериями *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23.

Анализ растений показал сокращение поступления Cd в надземную часть растений пшеницы в вариантах, инокулированных ризосферными бактериями. Наибольший эффект уменьшения содержания Cd в вегетативной массе растений пшеницы был отмечен при инокуляции *P. fluorescens* 21 и, в меньшей степени, *P. putida* 23 (рис. 2).

Содержание Cd в корнях пшеницы было практически одинаковым во всех вариантах опыта, но следует отметить, в корнях его было больше, чем в вегетативной массе в 9 раз в не инокулированных бактериями вариантах. Максимальное значение этого соотношения наблюдали при инокуляции растений бактериями *P. fluorescens* 21, при этом содержание Cd в корнях было больше, чем в вегетативной части в 18 раз, а при инокуляции и *P. putida* 23 – в 12 раз. Такое распределение Cd в растениях пшеницы свидетельствует о значи-

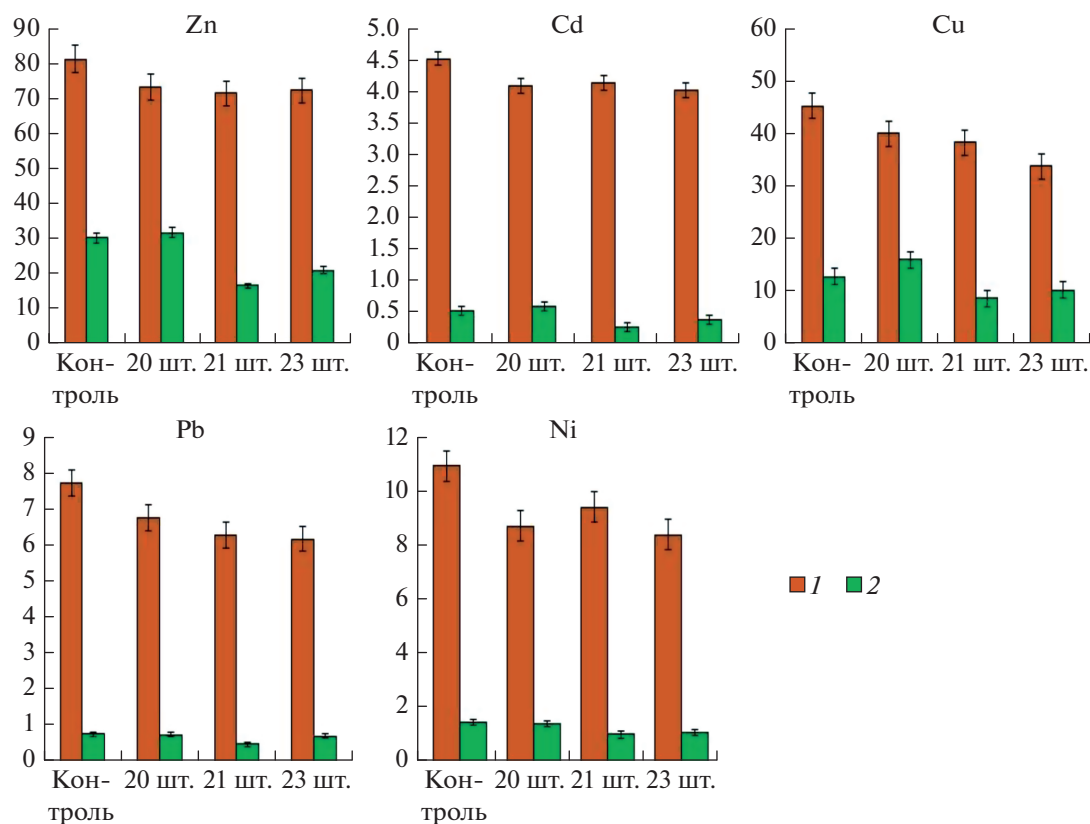


Рис. 2. Влияние ризосферных бактерий на содержание (мг/кг) Cd, Zn, Cu, Ni и Pb в корнях (1) и в вегетативной части (2) растений пшеницы.

тельной барьерной функции корневой системы при поглощении этого токсичного элемента. Надо отметить, что бактерии значительно увеличили это соотношение, а, следовательно и барьерную функцию корней.

Содержание Zn в вегетативной массе растений пшеницы также уменьшилось практически в 2 раза при инокуляции *P. fluorescens* 21 и на 30% в варианте с *P. putida* 23 по сравнению с контролем. Инокуляция бактериями *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 вызвала уменьшение содержания Zn в корнях растений в среднем на 10%. Соотношение содержания Zn в надземной части и корнях растений пшеницы на контроле и в варианте с *P. fluorescens* 20 равно 1 : 3, при инокуляции *P. fluorescens* 21 – 1 : 5, а при инокуляции *P. putida* 23 – 1 : 4. Возможно, барьерные функции растений по отношению к биологически необходимому элементу – Zn выражены слабее.

Содержание Cu в корнях растений было максимальным на почвах без инокуляции бактериями. При инокуляции бактериями его содержание в корнях уменьшилось по сравнению с контролем на 10% при инокуляции *P. fluorescens* 20, а вегетативная часть растений содержала Cu на 10% больше. При инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21

и *P. putida* 23 содержание Cu в корнях уменьшалось на 15 и 20% соответственно, а в вегетативной части уменьшилось на 40 и 30% соответственно. В результате изменилось соотношение содержания элемента в корнях и вегетативной массе растения – на контроле оно составляло 3,6, а при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21 – 5 (рис. 2). Следует отметить, что для Cu преобладание накопления в корнях было менее значительным и отмечалось только с бактериями *P. fluorescens* 21.

Содержание Pb и в корнях, и в вегетативной части растений уменьшалось во всех вариантах опыта, инокулированных ризосферными бактериями, на 10–15%. Соотношение содержания Pb в корнях и вегетативной массе растений было равно 10 на контроле и в варианте с *P. fluorescens* 20, и *P. putida* 23, а при инокуляции *P. fluorescens* 21 равнялось 14. Содержание Pb в исследованных почвах невысокое и ПДК Pb в биомассе растений не превышено, кроме того, этот элемент наиболее прочно удерживается в почве.

Содержание Ni в исследованной почве невысокое и ПДК в вегетативной массе пшеницы не превышено. При инокуляции растений ризосферными бактериями содержание этого элемента в корнях уменьшилось на 15–20%. В вегетатив-

ной части растений при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23 содержание Ni уменьшилось на 30%, а при инокуляции *P. fluorescens* 20 практически не изменилось.

Таким образом, для всех вариантов опыта наибольшее уменьшение содержания ТМ в вегетативной части растений вызывали бактерии *P. fluorescens* 21 – наименьшее – *P. fluorescens* 20, а бактерии *P. putida* 23 занимают промежуточное положение по активности уменьшения содержания ТМ в вегетативной массе пшеницы (рис. 2).

Наиболее существенным результатом было уменьшение содержания Cd и Zn в вегетативной массе растений пшеницы при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21 и *P. putida* 23, поскольку почвы характеризовались повышенным содержанием этих элементов, относящихся к первому классу опасности (табл. 2).

Результаты вегетационного опыта показали, что под влиянием ризосферных бактерий изменилось содержание и соотношение форм соединений ТМ в почве. Для Cd произошло увеличение доли наиболее подвижных обменных, слабо специфически адсорбированных и связанных с органическим веществом соединений. Несмотря на то, что эти фракции считаются доступными для растений, содержание Cd в надземной части растений пшеницы уменьшилось почти в 2 раза при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21. Возможно, уменьшение поступления Cd в растения вызвано связыванием ТМ в почве бактериальными экзометаболитами – сидерофорами в относительно стабильные органические соединения [18, 25], а также это может быть вызвано увеличением связывания металла в корнях инокулированных бактериями растений.

Для Cu и Ni преобладание этих элементов в корнях было менее значительным и отмечалось только в вариантах с бактериями *P. fluorescens* 21. Вероятно, для этих элементов ведущим механизмом, вызывающим уменьшение поступления ТМ в растениях, является образование прочных комплексных соединений с органическим веществом экзометаболитов бактерий, а также с оксидами и гидроксидами железа. Содержание этих элементов в исследованных почвах не является критическим, поэтому барьерные функции корней в отношении этих металлов выражены слабее, а их накопление в растениях не превышало ПДК.

Проведенные исследования показали, что применение исследованных стимулирующих рост растений ризосферных бактерий способствовало уменьшению поступления ТМ в растения (на примере яровой пшеницы) при их выращивании на почве, загрязненной ТМ. Положительное действие бактерий обусловлено усилением как растительных, так и почвенных механизмов, участвующих

во взаимодействии ТМ в системе почва–растение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях вегетационного эксперимента при выращивании растений яровой пшеницы на дерново-подзолистой почве, загрязненной в результате применения ОСВ, при внесении ризосферных бактерий рода *Pseudomonas* отмечено увеличение содержания слабоспецифически адсорбированных и связанных с органическим веществом соединений Cd, но значительное уменьшение содержания этого элемента в растениях пшеницы.

Отмечено увеличение содержания соединений Zn, Cu и Ni во фракциях, связанных с органическим веществом и соединениями железа, а также уменьшение накопления этих элементов в вегетативной части растений пшеницы. Для Pb отмечено значительное увеличение содержания во фракциях, связанных с оксидами и гидроксидами железа.

При внесении бактерий уменьшилось содержание Cd в надземной части растений пшеницы при инокуляции бактериями *P. fluorescens* 21 в 2 раза и для вариантов с *P. putida* 23 в 1.5 раза. Содержание Zn также уменьшилось в надземной части растений для вариантов с внесением бактерий *P. fluorescens* 21 в 1.8 раза, *P. putida* 23 в 1.4 раза.

При внесении бактерий изменилось соотношение элементов в корневой системе и надземной части растений. Максимальную разницу наблюдали для наиболее токсичного элемента – Cd, превышение содержания которого в корнях растений пшеницы над содержанием в надземной части растений составляло 1 : 9 без обработки бактериями и 1 : 18 – при инокуляции *P. fluorescens* 21 и 1 : 12 при инокуляции *P. putida* 23. Это свидетельствует об усилении барьерных функций корневой системы к загрязнению почв. Для Cu и Ni преобладание этих элементов в корнях было менее значительным.

Таким образом, соотношение содержания элементов в корнях и надземной части растений свидетельствует об усилении барьерной функции корневой системы растений и их устойчивости к загрязнению почв.

Применение ризосферных бактерий может быть рекомендовано для фиторемедиации загрязненных почв.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено частично при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”, а также в рамках государственного зада-

ния Министерства науки и высшего образования Российской Федерации “Почвенные ин-формационные системы и оптимизация использования почвенных ресурсов” (номер ЦИТИС: 121040800147-0).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большева Т.Н., Лопатина Е.А.* Поведение кадмия и свинца в почвах после прекращения регулярного использования осадка сточных вод // Проблемы агрохимии и экологии. 2011. № 1. С. 33–37.
2. *Водяницкий Ю.Н.* Роль почвенных компонентов в закреплении техногенных As, Zn и Pb в почвах // Агрохимия. 2008. № 1. С. 83–91.
3. *Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.* Загрязнение почв тяжелыми металлами. М., 2012. 304 с.
4. *Копчик Г.Н.* Проблемы и перспективы фиторемедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // Почвоведение. 2014. № 9. С. 1113–1130.
5. *Ладонин Д.В., Карпунин М.М.* Фракционный состав соединений никеля, меди, цинка и свинца в почвах, загрязненных оксидами и растворимыми солями металлов // Почвоведение. 2011. № 8. С. 953–965.
6. *Максимов И.В., Абизильдина Р.Р., Пусенкова Л.И.* Стимулирующие рост растений микроорганизмы как альтернатива химическим средствам защиты от патогенов (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47. № 4. С. 1–4.
7. *Манджиева С.С., Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И.* Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640.
8. *Мотузова Г.В.* Фракционирование почвенных соединений мышьяка // Почвоведение. 2006. № 4. С. 432–442.
9. *Плеханова И.О.* Степень самоочищения агродерново-подзолистых супесчаных почв, удобренных осадков сточных вод // Почвоведение. 2017. № 4. С. 491–497. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17040086>
10. *Плеханова И.О., Бамбушева В.А.* Экстракционные методы изучения состояния тяжелых металлов в почвах и их сравнительная оценка // Почвоведение. 2010. № 9. С. 1081–1088.
11. *Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д., Кленова О.В.* Влияние осадков сточных вод на содержание и фракционный состав тяжелых металлов в супесчаных дерново-подзолистых почвах // Почвоведение. 2001. № 4. С. 496–503.
12. *Плеханова И.О., Кутукова Ю.Д., Обухов А.И.* Накопление тяжелых металлов растениями при загрязнении почв осадком сточных вод // Почвоведение. 1995. № 12. С. 1530–1536.
13. *Соколова М.Г., Акимова Г.П., Бойко А.В., Нечаева Л.В., Глянько А.К., Вайшла О.Б., Ведерникова А.А.* Влияние бактериальных биопрепаратов на урожай картофеля и его качество // Агрохимия. 2008. № 6. С. 62–67.
14. *Соколова М.Г., Белоголова Г.А., Акимова Г.П., Вайшла О.Б.* Влияние инокуляции ризосферными бактериями на рост растений и транслокацию микроэлементов из загрязненных почв // Агрохимия. 2016. № 7. С. 72–80.
15. *Шаббаев В.П.* Почвенные механизмы уменьшения поглощения кадмия растениями ячменя при применении ризосферных бактерий, стимулирующих рост растений // Агрохимия. 2017. № 7. С. 71–77.
16. *Шаббаев В.П.* Применение ростстимулирующих ризосферных бактерий для стимуляции роста растений при загрязнении почвы нефтью, свинцом и кадмием // Агрохимия. 2016. № 8. С. 82–87.
17. *Шаббаев В.П., Бочарникова Е.А., Остроумов В.Е.* Ремедиация загрязненной кадмием почвы при применении стимулирующих рост растений ризобактерий и природного цеолита // Почвоведение. 2020. № 6. С. 738–750.
18. *Braud A., Geoffroy V., Hoegy F., Mislin G.L.A., Schalk I.J.* Presence of the siderophores pyoverdine and pyochelin in the extracellular medium reduces toxic metal accumulation in *Pseudomonas aeruginosa* and increases bacterial metal tolerance // Environ. Microbiol. Rep. 2010. Iss. 2. P. 419–425.
19. *Chandel A.K., Chen H., Sharma H. Ch., Adhikari K., Gao B.* Beneficial Microbes for Sustainable Agriculture // Microbes for Sustainable Development and Bioremediation. Chapter 15. CRC Press, 2020. 386 p. <https://doi.org/10.1201/9780429275876>
20. *Mishra J., Singh R., Arora N.K.* Alleviation of heavy metal stress in plants and remediation of soil by rhizosphere microorganisms // Front. Microbiol. 2017. V. 8. Article 1706. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01706>
21. *Filgueiras A.V., Lavilla I., Bendicho C.* Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental soil samples // J. Environmental Monitoring. 2002. V. 4. P. 823–850.
22. *Han H.S., Lee K.D.* Plant growth promoting rhizobacteria effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth of lettuce under soil salinity // Res. J. Agr. Biol. Sci. 2005. V. 1. № 3. P. 210–215.
23. *Khan M.S., Zaidi A., Wani P.A.* Role of plant growth promoting rhizobacteria in the remediation of metal contaminated soils // Environ. Chem. Lett. 2009. V. 7. № 1. P. 1–19.
24. *Laternus F., Arnold von K., Grøn C.* Organic contaminants from sewage sludge applied to agricultural soils // Environ. Sci. Pollut. Res. 2007. V. 14. P. 53–60.
25. *Lewis K., Epstein S., D. Onofrio A., Ling LL.* Uncultured microorganisms as a source of secondary metabolites // J. Antibiotics. 2010. V. 4. P. 1–9.
26. *Miller W.P., Martins D.C., Zelazny L.W.* Effect of sequencein extraction of trace metals from soils // Soil Sci. Soc. Am. J. 1986. V. 50. P. 598–601.
27. *Welbaum G.E., Sturz A.V., Dong Z., Nowak J.* Managing soil microorganisms to improve productivity of agroecosystems // Crit. Rev. Plant Sci. 2004. V. 23. P. 175–193.

Influence of Rhizospheric Bacteria on the State of Heavy Metals in the Soil-Plant System

I. O. Plekhanova^{1, *}, V. O. Kulikov¹, and V. P. Shabaev²

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science, Russian Academy of Sciences, ul. Institutskaya, 2, Pushchino, Moscow oblast, 142290 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: irinaoplekhanova@mail.ru*

The results of a vegetative experiment on soddy-podzolic sandy loamy soil (soddy-podzolic) 30 years after the cessation of the use of sewage sludge are presented. In the experiment, the influence of rhizospheric bacteria of the genus *Pseudomonas* on the mobility and fractional composition of heavy metal compounds Cu, Zn, Cd, Ni, and Pb in the soil and their entry into the vegetative organs and root system of spring wheat plants was studied. Under the influence of inoculation with bacteria, the content and ratio of the forms of heavy metal compounds in the experimental soils changed: the content of mobile Cd compounds and as well as Cd associated with organic matter increased, the content of Cu, Ni, Pb and, to a lesser extent, Zn associated with organic matter and iron compounds increased. A decrease in the content of Cd and Zn in the vegetative mass of wheat plants and an increase in the ratio of the content of elements in the roots and vegetative mass of plants were noted, which indicates on an increase in plant resistance to the toxic effect of heavy metals and an increase in the barrier function of roots.

Keywords: heavy metals, fractions of compounds, bacteria of the genus *Pseudomonas*, barrier functions of roots, metals in plants