

ИЗУЧЕНИЕ ПОВЕДЕНИЯ Cd И Zn В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ И ИХ ДЕЙСТВИЕ НА ПОЧВЕННЫЙ МИКРОБОЦЕНОЗ

Т.Л. Жигарева¹, А.Н. Ратников¹, Д.Г. Свириденко¹, Г.И. Попова¹,
К.В. Петров¹, А.А. Касьяненко², Н.А. Черных², М.Н. Картузова²

¹Всероссийский НИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии РАСХН,
249032, Обнинск, Россия;

²Экологический факультет, Российский университет дружбы народов,
Подольское шоссе, 8/5, 113093, Москва, Россия

Результаты исследований по изучению трансформации различных форм нахождения кадмия и цинка свидетельствуют о том, что в зависимости от их концентрации в почве количество обменных и подвижных соединений увеличивается, а, следовательно, увеличивается и поступление их в растения. Это отразилось на росте, развитии и продуктивности изучаемых культур. При биэлементном нахождении в почве кадмия и цинка наблюдается тенденция к увеличению их мобильности, причем кадмия в большей степени, чем цинка, что, по-видимому, можно объяснить увеличением их взаимной конкуренции за активные центры почвенно-поглощающего комплекса. Показано, что загрязнение почвы тяжелыми металлами (Cd, Zn) изменяет состав и соотношение основных групп микроорганизмов, а также влияет на процессы превращения углерода и азота в почве — дыхание и азотфиксацию.

Трансформация соединений тяжелых металлов (ТМ) в почве и потребление их растениями является сложной функцией, зависящей от многих переменных: состава почвы, свойств самих металлов, почвенно-экологических условий роста и развития растений. Знание форм соединений металлов в почве имеет большое значение в изучении их поведения в различных компонентах биосферы, в разработке приемов и методов снижения их фитотоксичности и восстановления плодородия загрязненных почв. Большинство тяжелых металлов, присутствуя в растительных организмах в ничтожно малых количествах, выполняют весьма важные функции, входя в состав биологически активных веществ — являясь микроэлементами. Присутствуя в почве в больших количествах, тяжелые металлы оказывают негативное влияние на рост и развитие растений. Наиболее благоприятные условия для интенсивной миграции тяжелых металлов по биологической цепи почва-растение складываются на дерново-подзолистых почвах Нечерноземной зоны. Поэтому изучение биологической доступности тяжелых металлов имеет важное значение в сельскохозяйственном производстве.

Ведущая роль в формировании почвенного плодородия принадлежит биохимической деятельности микроорганизмов. Исследованиями установлена тесная корреляционная связь между параметрами биологической активности почв, уровнем ее плодородия и величиной урожайности растений. Загрязнение почвы тяжелыми металлами изменяет численность и состав микробного сообщества почв, снижает интенсивность основных микробиологических процессов и активность почвенных ферментов. Кроме того, тяжелые металлы изменяют и более консервативные признаки почв, такие как гумусное состояние, структура, рН и др. Все это ведет к частичной, а в ряде случаев и к полной утрате плодородия почв [1]. Специфика воздействия тяжелых металлов на различные группы микроорганизмов и степень их токсичности зависит от вида металла, его концентрации и типа почвы. Например, под влия-

нием промышленного и транспортного загрязнения тяжелыми металлами изменяется структура комплексов почвенных грибов — снижается богатство выделяемых видов, изменяется их встречаемость и в результате разнообразие комплексов грибов уменьшается [2].

Под воздействием тяжелых металлов изменяется также биологическая активность почв. Рядом исследователей установлено, что попадающие в почву тяжелые металлы ингибируют трансформацию соединений углерода и азота. Одним из наиболее масштабных этапов в круговороте углерода является его высвобождение из различных органических соединений в виде углекислоты, «дыхание почвы». Во многих работах отмечается, что высокие дозы тяжелых металлов могут ингибировать протекание этого процесса [3].

Установлено ингибирующее действие загрязнения и на трансформацию ряда природных органических соединений. Тяжелые металлы оказывают ингибирующее действие и на процесс естественного вовлечения азота в круговорот — азотфиксацию [4,5]. В целом влияние тяжелых металлов на микробные сообщества и микробиологические процессы в почве определяется типом металла, его дозой, формой соединения, свойствами загрязняемых почв. Отрицательное действие тяжелых металлов сильнее проявляется на малобуферных, с низким естественным плодородием почвах.

В условиях микрополевого опыта на дерново-подзолистой супесчаной почве экспериментальной базы ВНИИ сельскохозяйственной радиологии и агроэкологии изучали влияние различных доз Cd — 1, 5, 10, 20, 50 и Zn — 125, 250, 500, 1000, 2000 мг/кг соответственно на рост, развитие растений, их продуктивность и содержание тяжелых металлов в урожае. Исследование проводили на ячмене сорт «Эльф», клевере сорт «ВИК-35» и редисе сорт «Жара». После уборки урожая в почве определяли содержание обменных (извлекаемых $1n Ca(NO_3)_2$), подвижных (извлекаемых CH_3COONH_4 с pH 4,8) и подвижных кислоторастворимых (извлекаемых $1n HNO_3$) форм кадмия и цинка. Определение различных форм нахождения кадмия и цинка проводили методом последовательной обработки почвы, изучаемыми экстрагентами.

С целью изучения влияния органических удобрений и мелиорантов на показатели биологической активности дерново-подзолистой легко и среднесуглинистой почвы, загрязненной кадмием и цинком, в серии вегетационных опытов были определены: показатели численности основных групп почвенных микроорганизмов — бактерий, грибов и актиномицетов; потенциальная активность азотфиксации, денитрификации и дыхания почвы. Опытная культура — ячмень, сорт «Эльф». Питательные вещества вносили при набивке сосудов по 0,15 г/кг N, P_2O_5 и K_2O в виде растворов солей NH_4NO_3 , KH_2PO_4 и K_2SO_4 . Тяжелые металлы вносили в дозах: Cd — 10, 15 и Zn — 300 мг/кг почвы в виде азотнокислых солей. Органические удобрения и мелиоранты вносили из расчета 2,0 и 0,8% от веса почвы в сосудах соответственно.

Результаты наших исследований свидетельствуют о том, что внесенные в почву кадмий и цинк фиксируются почвой и образуют комплексы, в той или иной степени, доступные для корневого поглощения растениями. Изучаемая дерново-подзолистая супесчаная почва (без внесения ТМ) содержит кадмия 0,35, цинка 43,4 мг/кг почвы. Из них 28,6 кадмия и 30 % цинка находятся в труднорастворимом состоянии. Содержание обменных, подвижных, кислоторастворимых соединений кадмия составляет соответственно 20,0; 17,0; 34,4 %, а для цинка — 22,8; 19,8 и 27,4 % (табл. 1).

Результаты исследований по изучению трансформации различных форм нахождения кадмия и цинка свидетельствуют о том, что в зависимости от их

концентрации в почве количество обменных и подвижных соединений увеличивается, а следовательно увеличивается и поступление их в растения. Это отразилось на росте, развитии и продуктивности изучаемых культур.

Т а б л и ц а 1

Содержание различных форм соединений Cd и Zn в дерново-подзолистой супесчаной почве, % от внесенной дозы тяжелых металлов

| Доза металла, мг/кг | Обменные соединения, 1н $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ | Подвижные соединения, $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ (pH 4,8) | Кислоторастворимые соединения, 1н HNO_3 | Труднорастворимые соединения |
|---------------------|---|---|--|------------------------------|
| Кадмий | | | | |
| Фон | 20,0 | 17,0 | 34,4 | 28,6 |
| 1 | 29,6 | 22,2 | 20,0 | 28,1 |
| 5 | 38,3 | 29,0 | 22,4 | 10,3 |
| 10 | 39,8 | 32,2 | 19,3 | 8,7 |
| 20 | 41,6 | 34,3 | 15,5 | 8,6 |
| 50 | 42,7 | 34,8 | 13,7 | 8,8 |
| Цинк | | | | |
| Фон | 22,8 | 19,8 | 27,4 | 30,0 |
| 125 | 30,0 | 41,1 | 23,1 | 5,8 |
| 250 | 31,3 | 41,3 | 21,4 | 6,0 |
| 500 | 32,2 | 41,0 | 20,5 | 6,3 |
| 1000 | 34,5 | 40,5 | 18,7 | 6,3 |
| 2000 | 35,5 | 40,5 | 17,5 | 6,5 |

Соотношение форм нахождения при внесении кадмия 1 мг/кг почвы по сравнению с фоновым меняется незначительно. Содержание обменных и подвижных соединений возрастает соответственно на 9,6 и 5,2 %, а кислоторастворимая фракция снижается на 14,4 %. Концентрация цинка 125 мг/кг способствует увеличению содержания легкодоступных соединений: обменной до 30; подвижной до 41,1 %, — и резко снижает содержание труднодоступных соединений с 30 до 5,8 %. Содержание кислоторастворимых соединений снижается незначительно. Дальнейшее увеличение концентрации кадмия до 50 мг/кг почвы привело к перераспределению элемента по фракциям: увеличив обменную до 42,7, соединений, извлекаемых ацетатом аммония, до 34,8 %, а содержание кислоторастворимой фракции уменьшилось до 13,7 %. С увеличением концентрации цинка в почве от 125 до 2000 мг/кг соотношение различных соединений варьирует незначительно.

Степень влияния различных концентраций кадмия и цинка на урожай и устойчивость различных сельскохозяйственных культур представлена в табл. 2. Результаты исследований свидетельствуют о том, что наиболее чувствительной культурой к содержанию Cd в почве является ячмень. Так, если урожай редиса и клевера при концентрации Cd в почве 10 мг/кг снизился соответственно на 18 и 12%, то продуктивность ячменя при той же концентрации металла снизилась на 36% по отношению к контролю. Увеличение концентрации кадмия до 50 мг/кг почвы привело к снижению урожая клевера на 92, а редиса на 95% по отношению к контрольному варианту. Концентрация Cd в почве 50 мг/кг вызвала стерильность колосьев и отсутствие урожая зерна ячменя.

Негативное влияние различных концентраций цинка неоднозначно отразилось на изучаемых культурах. Наибольшая чувствительность к цинку наблюдалась у редиса. При концентрации цинка 250 мг/кг почвы продуктивность редиса снизилась на 22, а клевера на 12% по отношению к контролю, в то время как урожай зерна ячменя сохранился на 100%. Концентрация цинка 1000 мг/кг почвы привела к отсутствию зерна у ячменя, минимальному урожаю клевера и редиса - всего 3 и 2% от контроля соответственно. Полная гибель всех возделываемых культур (ячменя, клевера, редиса) наблюдалась при концентрации цинка в почве 2000 мг/кг (табл. 2).

Таблица 2

Влияние различных доз кадмия и цинка на урожай сельскохозяйственных культур

| Доза внесения металла, мг/кг | Урожай | | | | | |
|---------------------------------------|----------------|--------------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | ячмень (зерно) | | клевер (сено) | | редис (корнеплоды) | |
| | ц/га | % от кон- троля | ц/га | % от кон- троля | ц/га | % от кон- троля |
| Кадмий | | | | | | |
| 0 | 31,4 | 100 | 99,9 | 100 | 110,5 | 100 |
| 1 | 30,8 | 98 | 100,7 | 101 | 107,6 | 97 |
| 5 | 26,3 | 84 | 90,9 | 91 | 108,0 | 98 |
| 10 | 20,1 | 64 | 88,2 | 88 | 90,4 | 82 |
| 20 | 5,2 | 17 | 46,7 | 47 | 76,3 | 69 |
| 50 | нет зерна | - | 8,1 | 8 | 6,0 | 5 |
| НСР ₀₅ | 1,4 | - | 1,8 | - | 1,6 | - |
| Цинк | | | | | | |
| 0 | 30,9 | 100 | 100,5 | 100 | 99,7 | 100 |
| 125 | 33,3 | 108 | 107,0 | 107 | 105,6 | 106 |
| 250 | 31,0 | 100 | 88,1 | 88 | 78,0 | 78 |
| 500 | 10,4 | 34 | 15,4 | 15 | 17,2 | 17 |
| 1000 | нет зерна | - | 3,2 | 3 | 1,6 | 2 |
| 2000 | гибель | - | гибель | - | гибель | - |
| НСР ₀₅ | 1,4 | - | 1,1 | - | 1,2 | - |

Наименьшая из изучаемых доз кадмия — 1 мг/кг почвы способствовала накоплению металла в зерне ячменя, вегетативной массе клевера и корнеплодах редиса в количествах, превышающих ПДК (СанПиН 2.3.2.1078-01). Превышение ПДК по содержанию цинка в вегетативной массе клевера и корнеплодах редиса наблюдается уже с концентрации — 250 мг/кг почвы. Уровень ПДК в зерне ячменя был превышен при концентрации цинка в почве 500 мг/кг. Необходимо подчеркнуть, что накопление кадмия и цинка в растениях зависит от концентрации элемента в почве, но прямопропорциональной зависимости не отмечено.

Что касается биоты, то наиболее токсичным для почвенного микробоценоза оказывается совместное присутствие в почве ($Cd_{15} + Zn_{300}$ мг/кг), обуславливающее достоверное снижение численности актиномицетов в 2,9 раза по отношению к контролю. При моноэлементном загрязнении Cd_{15} и Zn_{300} численность бактерий не изменяется, но стимулируется активность грибов в почве (табл. 3).

Применение палыгорскитовой глины существенно (в 1,4-2,2 раза по сравнению с вариантом без сорбента) стимулирует активность почвенных грибов в вариантах с моноэлементным внесением цинка и кадмия.

Более информативными показателями, отражающими изменение микробоценоза под влиянием техногенного загрязнения, являются количественные

соотношения численности микроорганизмов различных систематических групп. Так, изменения в комплексе целлюлозоразрушающих микроорганизмов отражаются в соотношении численности актиномицетов и грибов. Это соотношение называют коэффициентом минерализации. Кадмий и цинк как при моно-, так и биэлементном загрязнении почвы снижают коэффициент минерализации в 1,5-5,4 раза по сравнению с контролем, при этом увеличивается доля грибной микрофлоры и повышается активность микроорганизмов, потребляющих минеральный азот (табл. 3).

Таблица 3

Влияние Cd и Zn и палыгорскитовой глины на состав и структуру почвенного микробоценоза дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы

| Вариант опыта | Численность микроорганизмов, тыс./г почвы | | | Актиномицеты грибы |
|---|---|---------|--------------|-----------------------|
| | бактерии | грибы | актиномицеты | |
| Без мелиоранта | | | | |
| Фон - N _{0,15} P _{0,15} K _{0,15} | 441±14 | 1,0±0,0 | 44,3±1,6 | 45,2±4,5 |
| Фон+Cd ₁₅ | 435±14 | 1,7±0,1 | 49,5±1,1 | 29,3±3,0 |
| Фон+Zn ₃₀₀ | 450±31 | 3,3±0,1 | 35,5±1,9 | 10,5±1,0 |
| Фон+Cd ₁₅ +Zn ₃₀₀ | 440±26 | 3,0±0,1 | 14,9±1,0 | 4,9±0,8 |
| Палыгорскитовая глина | | | | |
| Фон - N _{0,15} P _{0,15} K _{0,15} | 390±25 | 2,7±0,1 | 24,1±0,7 | 9,0±0,9 |
| Фон+Cd ₁₅ | 317±21 | 3,7±0,1 | 45,9±2,4 | 12,6±1,2 |
| Фон+Zn ₃₀₀ | 452±27 | 3,3±0,1 | 15,3±0,7 | 4,6±0,4 |
| Фон+Cd ₁₅ +Zn ₃₀₀ | 242±5 | 1,1±0,1 | 19,2±1,0 | 16,8±0,9 |

Концентрация кадмия в количестве 10 мг/кг почвы существенно (в 2,2 раза) снижает коэффициент минерализации органического вещества. В свою очередь, присутствие цинка в почве в концентрации 300 мг/кг также влияет на снижение коэффициента минерализации гумусовых веществ, находящихся в почве, но в меньшей степени, чем присутствие кадмия. В данном случае процессы минерализации протекали медленнее в 1,6 раза по сравнению с контролем (табл. 4).

Органическое вещество в виде ТНК в варианте совместного присутствия в почве с кадмием нейтрализует негативное действие последнего на процессы минерализации гумуса, увеличивая интенсивность данного процесса в 2,0 раза по сравнению с вариантом, где ТНК отсутствовал.

Таблица 4

Влияние Cd, Zn и торфянового компоста на состав и структуру почвенного микробоценоза на среднесуглинистой почве

| Вариант опыта | Численность микроорганизмов, тыс./г почвы | | | Актиномицеты грибы |
|---|---|-------|--------------|-----------------------|
| | бактерии | грибы | актиномицеты | |
| Фон - N _{0,15} P _{0,15} K _{0,15} | 489 | 2,1 | 72,0 | 34,3 |
| Фон+ТНК | 590 | 3,4 | 89,3 | 26,3 |
| Фон+Cd ₁₀ | 661 | 4,4 | 69,3 | 15,8 |
| Фон+ТНК+Cd ₁₀ | 526 | 3,1 | 97,3 | 31,4 |
| Фон+Zn ₃₀₀ | 381 | 3,0 | 65,6 | 21,9 |
| Фон+ТНК+Zn ₃₀₀ | 453 | 4,8 | 63,9 | 13,3 |
| НСР ₀₅ | 38,0 | 0,3 | 6,4 | 3,5 |

Исследования по изучению влияния Cd_{10, 15} и Zn₃₀₀ мг/кг почвы и органических удобрений на биологическую активность дерново-подзолистой, легкосуглинистой и среднесуглинистой почвы выявили чрезвычайно нега-

тивное действие Zn на азотфиксацию — ее уровень снизился в 3,6 раза по сравнению с контролем, а уровень денитрификации — только в 1,2 раза. В свою очередь присутствие в почве Cd не оказывает достоверного влияния на активность азотфиксации, но несколько снижает денитрифицирующую активность почвы в 1,2 раза по сравнению с контролем. Торфонавозный компост частично нивелирует негативное влияние цинка на потенциальную активность азотфиксации, но уровень последней, тем не менее, оказывается гораздо ниже контрольного варианта (табл. 5).

Таблица 5
Влияние Cd, Zn и торфонавозного компоста на биологическую активность дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы

| Вариант | Потенциальная активность, мг/кг.сут. | | |
|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| | азотфиксации, aN_2 | денитрификации, aN_2-N_2O | дыхания, $aC-CO_2$ |
| Фон - $N_{0,15}P_{0,15}K_{0,15}$ | 19,0±1,9 | 29,0±3,4 | 355,0±42,0 |
| Фон + ТНК | 12,4±1,3 | 28,4±2,8 | 311,8±33,1 |
| Фон + Cd_{10} | 17,2±1,8 | 24,0±2,4 | 294,7±34,0 |
| Фон + ТНК + Cd_{10} | 6,8±0,7 | 20,0±2,3 | 486,3±54,0 |
| Фон + Zn_{300} | 5,3±0,6 | 25,0±2,8 | 433,5±48,5 |
| Фон + ТНК + Zn_{300} | 7,6±0,9 | 20,5±2,2 | 421,3±50,0 |

Обогащение почвы природными мелиорантами (палыгорскитовая глина) достоверно стимулирует деятельность денитрифицирующих бактерий в 1,3 раза по сравнению с вариантом, где были внесены только элементы минерального питания (табл. 6). Положительный эффект влияния палыгорскитовой глины на активность денитрификации сохраняется и при совместном присутствии ее с кадмием. Процессы денитрификации в данном случае были более интенсивными в 1,8 раза по сравнению с вариантом, где отсутствовал мелиорант. Интенсивность денитрификации не снижается и при биэлементном нахождении в почве $Cd_{15}+Zn_{300}$ в присутствии палыгорскитовой глины.

Таблица 6
Влияние Cd, Zn и палыгорскитовой глины на биологическую активность дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы

| Вариант опыта | Потенциальная активность, мг/кг сут. | |
|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------|
| | денитрификации, $aN-N_2O$ | дыхания, $aC-CO_2$ |
| Без мелиорантов | | |
| Фон - $N_{0,15}P_{0,15}K_{0,15}$ | 28,1±4,0 | 2693,1±263,2 |
| Фон + Cd_{15} | 32,0±6,0 | 1793,1±369,6 |
| Фон + Zn_{300} | 27,4±2,4 | 1733,5±170,0 |
| Фон+ $Cd_{15}+Zn_{300}$ | 28,9±5,1 | 1658,2±128,4 |
| Палыгорскитовая глина | | |
| Фон - $N_{0,15}P_{0,15}K_{0,15}$ | 36,5±2,9 | 1069,9±187,4 |
| Фон + Cd_{15} | 56,4±6,5 | 1316,8±184,3 |
| Фон + Zn_{300} | 31,3±1,5 | 1882,4±115,5 |
| Фон+ $Cd_{15}+Zn_{300}$ | 67,3±6,0 | 2689,6±327,9 |

Одним из показателей биологической активности почвы является процесс высвобождения углерода из различных органических соединений в виде углекислоты, так называемое «дыхание» почвы. В наших исследованиях присутствие в почве кадмия и цинка как отдельно, так и в их сочетании ингибирует

потенциальную активность дыхания в 1,5 раза. Положительное влияние палыгорскитовой глины на скорость эмиссии CO₂ в почве наблюдается только в случае биэлементного присутствия тяжелых металлов. Кратность увеличения составила 1,6 раза по сравнению с вариантом без внесения мелиоранта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин С.В., Гузев В.С., Асеева К.В. и др. Тяжелые металлы как фактор антропогенного воздействия на почвенную микробиоту // Микроорганизмы и охрана почв. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1989. - С. 5-46.
2. Марфенина О.Е., Мирчинк Т.Г. Микроскопические грибы при антропогенном воздействии на почву // Почвоведение, 1988. № 9. - С. 107-112.
3. Умаров М.М., Азиева Е.Е. Некоторые биохимические показатели загрязнения почв тяжелыми металлами // Тяжелые металлы в окружающей среде. М., 1980. - С. 109-115.
4. Умаров М.М. Ассоциативная азотфиксация. М., 1986. - 153 с.
5. Клевенская И.Л. Влияние тяжелых металлов (Cd, Zn и Pb) на биологическую активность почв и процесс азотфиксации / В кн. Микробоценозы почв при антропогенном воздействии. Новосибирск, 1985. - С. 73-94
6. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов СанПиН 2.3.2.1078-01. Минздрав России. М. 2002. - 164 с.

THE BEHAVIOR OF HEAVY METALS IN SOILS

T.L. Jigareva¹, A.N. Ratnikov¹, D.G. Sviridenko¹, G.I. Popova¹, K.V. Petrov¹,
A.A. Kasianenko², N.A. Chernykh², M.N. Kartuzova²

¹Russian Institute of Agricultural Radiology and Agroecology,
249032, Obninsk, Russia;

²Russian Peoples Friendship University, 113093, Moscow, Russia

Are Cd and Zn an estimation of action of various levels of soil pollution by heavy metals on parameters of soils. The application of different types of fertilizers, as well as lime can reduce heavy metals accumulation in the yield of agricultural crops.