

УДК 631.811.94.033:621.039.8

ИЗУЧЕНИЕ ПОСТУПЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В РАСТЕНИЯ МЕТОДОМ РАДИОАКТИВНЫХ ИНДИКАТОРОВ

Ю. Я. МАЗЕЛЬ, В. В. РАЧИНСКИЙ, А. Д. ФОКИН
(Кафедра прикладной атомной физики и радиохимии)

Ранее были изучены абиогенная миграция тяжелых металлов [1, 4] и их биогеогенный перенос в почвах [2]. В настоящей работе исследуется поступление этих металлов из различных химических соединений в растения.

Как известно, двухвалентный цинк, присутствующий в почве, частично усваивается растениями и повторно возвращается в почву в составе биоорганических соединений, из которых он может использоваться последующими поколениями растений.

Представляет интерес сравнить использование цинка, поступившего в почву в форме ионов и в составе растительных остатков. С этой целью был проведен вегетационный опыт с ячменем сорта Факед в 3-кратной повторности. Продолжительность вегетации 3 мес. Использовали почву пахотного горизонта тяжелосуглинистой дерново-подзолистой почвы (площадка 2) [1]. Масса почвы в сосуде 2 кг. Цинк вводили в почву в ионной форме (раствор сульфата цинка) и в меченных ^{65}Zn свежих и высушенных остатках растений (надземные органы фасоли), после чего почву тщательно перемешивали. Общая активность составляла 10 мкКи на сосуд, при этом в каждый сосуд вводили по 0,02 мг цинка.

По окончании опыта надземную часть растений срезали, корневую массу отбирали путем осторожного размачивания и отмывания почвы на сите, что не исключает, конечно, потери корней. Кроме того, часть цинка могла вымываться из корневой массы, поэтому полученные результаты дают лишь приближенное представление о действительных значениях коэффициентов использования цинка растениями.

Наиболее интенсивно цинк поступал в растения из свежих растительных остатков (табл. 1). Коэффициенты использования цинка в этом варианте почти в 2 раза выше, чем ионного цинка, сорбированного почвой.

Во всех вариантах общее содержание этого элемента в корневой массе в 2—3 ра-

за выше, чем в надземных органах. Однако концентрация его в надземных органах и корнях с учетом их соотношения по массе была приблизительно одинаковой.

Таблица 1

Поступление цинка (% от внесенного)
в ячмень за 3 мес вегетации
(средние значения и максимальное
отклонение от среднего)

Показатель	Zn ⁺²	Цинк в составе высушенных растительных остатков	Цинк в составе свежих растительных остатков
Надземные органы	2,2±0,8	1,8±1,0	2,9±1,4
Корни	3,4±2,0	4,7±2,5	8,1±4,7
Растения в целом	5,6±2,8	6,5±3,5	11,0±6,4

Примечание. Средняя масса надземных органов во всех вариантах составляла 8,3±0,8 г, корней — 16,4±3,0 г.

Проведенный эксперимент дает лишь самое общее представление об использовании растениями ионного цинка, сорбированного почвой, и цинка, входящего в состав растительных остатков. Между тем химические формы поступивших в почву металлов чрезвычайно разнообразны, поскольку последние могут быть связаны самыми различными минеральными и органическими ее компонентами. Тяжелые металлы в почве находятся в разных формах: сорбированной, связанной с органическим веществом, труднорастворимых соединений и т. д. Для изучения доступности растениям различных форм тяжелых металлов был

Поглощение цинка ячменем (активность воздушно-сухого растительного материала, 10^{-2} мкКи/г)

Вариант	Надземная масса			Корневая система, 2,5 мес
	0,5 мес	1 мес	2,5 мес	
Монтмориллонит	3,1±0,7	23,3±7,0	21,6±8,0	15,8±1,3
Асканит	4,0±0,8	22,1±0,9	14,0±0,4	35,6±0,6
Каолинит	3,3±0,1	21,9±0,6	17,0±0,2	23,9±0,2
Супесь	3,2±0,2	18,1±0,5	12,2±1,0	17,0±3,1
Покровный суглинок	5,3±0,4	10,8±0,2	7,2±0,4	10,5±2,1
Морена	3,6±0,3	16,1±0,4	10,9±2,3	14,6±1,3
Песчаноподзолистая почва	4,2±0,3	13,5±1,2	9,1±1,3	13,4±1,6
Подзол тяжелосуглинистый	4,3±1,2	19,5±0,8	16,0±1,2	24,9±3,8
Чернозем	2,8±0,1	10,6±1,3	7,4±2,5	14,8±3,0
Гумусовые вещества:				
ММ 700	5,3±1,7	20,8±1,7	17,2±0,8	17,5±5,2
ММ (2÷5)·10 ³	6,2±1,8	12,9±3,0	14,3±1,2	21,4±1,1
ММ 7000	5,3±0,9	17,8±0,8	12,4±1,6	17,2±4,8
ZnCl ₂ (контроль)	9,7±1,0	19,4±2,5	18,1±3,3	18,6±2,6

проведен вегетационный опыт с ячменем в условиях песчаной культуры, которая позволяет выяснить роль отдельных форм тяжелых металлов в отличие от почвенной культуры, где эти металлы присутствуют одновременно в виде разных форм и постоянно перераспределяются между почвенными компонентами и переходят из одной формы в другую.

Тяжелые металлы (цинк, кадмий и ртуть) вносили в песок в ионной форме, а также связанные глинистыми минералами, породами, почвами и органическим веществом.

Минералы — монтмориллонит, асканит (в опыте с цинком) и каолинит, их катионообменная емкость (КОЕ) составляла соответственно 50—60; 80—100 и 8—10 мг·экв на 100 г.

Породы — супесь, покровный суглинок и морена. Супесь — прослойка из флювиогляциальных отложений, в минеральной ее части преобладал кварц; КОЕ супеси — 1—1,5 мг·экв на 100 г. Минеральная часть покровного суглинка состоя-

ла из окислов железа и алюминия, минералов каолининовой группы со значительной примесью кварца, слюд, гидрослюд и первичных минералов (полевых шпатов); КОЕ — 10—13 мг·экв. Морена по минеральному составу не отличалась от покровного суглинка, но гранулометрический состав ее был менее выравнен; КОЕ — 6—7 мг·экв.

Почвы — песчаноподзолистая, подзол тяжелосуглинистый и чернозем. Песчано-подзолистая почва из органогенного горизонта A₁A₂, сформирована на флювиогляциальных отложениях; КОЕ — 1,5—2 мг·экв. Подзол тяжелосуглинистый, горизонт A₁A₂ сформирован на покровном суглинке; КОЕ — 12—15 мг·экв. Чернозем — типичный по минералогическому составу, представленному каолинистыми и монтмориллонитовыми глинами, кварцем и полевыми шпатами; КОЕ — 20—30 мг·экв на 100 г.

Органические соединения — гумусовые вещества с ММ 700, 2000—

Таблица 3

Поглощение кадмия ячменем (активность воздушно-сухого растительного материала, 10^{-2} мкКи/г)

Вариант	Надземная масса			Корневая система, 2,5 мес
	0,5 мес	1 мес	2,5 мес	
Монтмориллонит	3,6±0,4	1,9±0,1	4,1±0,5	59,2±6,6
Каолинит	7,7±1,4	4,1±0,3	5,2±0,2	83,9±13,2
Супесь	5,7±0,1	3,0±0,1	4,3±0,2	72,4±3,3
Покровный суглинок	5,8±0,5	2,8±0,8	3,8±0,3	65,8±4,9
Морена	4,2±0,7	2,5±0,2	2,8±0,3	52,6±9,9
Песчаноподзолистая почва	4,3±0,1	2,9±0,2	4,4±0,6	69,1±11,5
Подзол тяжелосуглинистый	1,7±0,1	2,4±0,1	2,8±0,3	36,2±3,3
Чернозем	0,9±0,1	1,7±0,2	2,1±0,2	28,0±11,5
Гумусовые вещества:				
ММ 700	9,6±1,5	3,1±0,6	5,8±0,2	98,7±11,5
ММ (2÷5)·10 ³	7,5±1,4	3,7±0,2	5,6±0,3	72,4±3,3
ММ 7000	9,5±0,5	3,9±0,5	5,6±1,0	88,8±1,6
CdCl ₂ (контроль)	8,0±1,2	4,1±1,0	5,8±0,6	85,5±9,9

Поглощение ртути ячменем
(активность воздушно-сухого растительного материала, 10^{-2} мкКг/г)

Вариант	Надземная часть			Корневая система, 1,5 мес
	0,5 мес	1 мес	1,5 мес	
Монтмориллонит	32,4±2,3	12,9±8,0	8,7±1,6	390±6
Каолинит	30,9±2,1	18,1±2,4	12,5±2,4	557±54
Супесь	28,2±4,1	19,0±3,0	10,6±2,3	590±61
Покровный суглинок	31,2±2,0	17,7±2,5	15,0±3,2	507±62
Морена	21,2±0,4	14,6±0,7	15,7±1,2	497±12
Песчанопodzолистая почва	26,3±2,9	13,0±2,3	7,2±1,1	350±55
Подзол тяжелосуглинистый	14,3±3,0	7,2±0,8	6,0±1,0	233±8
Чернозем	14,8±0,7	7,6±0,5	5,6±0,5	228±19
Гумусовые вещества:				
ММ 700	36,9±4,6	10,6±1,5	12,8±0,4	491±52
ММ (2÷5)·10 ³	25,0±2,7	13,9±2,8	14,0±0,8	494±20
ММ 7000	33,5±2,5	17,4±2,1	12,7±0,3	564±72
HgCl ₂ (контроль)	29,8±5,0	19,8±3,4	11,8±0,7	694±7

5000 и более 7000; КОЕ — 300—800 мг·экв на 100 г.

КОЕ основного наполнителя — кварцевого песка — 1 мг·экв.

К 10 г субстрата (по 40 мг гумусовых веществ) добавляли 10 мл воды и 190 мкг цинка, 3 мг кадмия или 254 мкг ртути с активностью соответственно 18; 23 и 21 мкКг. Масса внесенных тяжелых металлов определялась удельной активностью товарных препаратов изотопов цинка-65, кадмия-115 и ртути-203.

Катионообменная емкость субстратов обеспечивала связывание тяжелых металлов. Через 3 ч взаимодействия субстраты тщательно перемешивали с 700 г песка. В контроле тяжелые металлы вводили в песок в ионной форме.

В сосуды емкостью 1,5 л, подготовленные к началу опыта, вносили 300 г чисто-

го кварцевого песка, затем 700 г песка, перемешанного с радиоактивным субстратом, все это сверху засыпали 100 г чистого кварцевого песка. Песок увлажняли до 60% ПВ. В каждый сосуд высевали по 50 пророщенных семян ячменя. Растения выращивали при температуре $20 \pm 2^\circ$, освещенности 8000 лк и продолжительности светового дня 12 ч. Повторность опыта 3-кратная. Продолжительность опыта с цинком и кадмием 2,5 мес, с ртутью — 1,5 мес. Через две недели и через месяц после посева семян из каждого сосуда отбирали по 10 растений для изучения кинетики накопления тяжелых металлов в ходе вегетации. Для установления активности цинка и кадмия через 2,5 мес, а для ртути — через 1,5 мес срезали надземную массу растений, корни аккуратно отмывали водой, растительную массу высушивали

Таблица 5

Коэффициент биологического поглощения тяжелых металлов ячменем

Вариант	Цинк		Кадмий		Ртуть	
	надземная часть	корни	надземная часть	корни	надземная часть	корни
Монтмориллонит	11,0±4,0	8,0±0,1	4,8±0,6	68±8	6,2±1,1	280±4
Каолинит	8,5±0,1	12,0±2,6	6,0±0,2	97±15	8,9±1,7	400±40
Супесь	6,0±0,5	8,5±1,5	5,0±0,2	83±4	7,6±1,6	420±40
Покровный суглинок	3,5±0,2	5,0±1,0	4,4±0,4	76±6	10,7±2,2	360±4
Морена	5,5±1,1	7,0±0,6	3,2±0,4	61±11	11,2±0,9	360±8
Песчанопodzолистая почва	4,5±0,7	6,5±0,8	5,1±0,8	80±13	5,2±0,8	250±40
Подзол тяжелосуглинистый	8,0±0,6	12,5±1,9	3,2±0,4	42±4	4,3±0,6	170±6
Чернозем	3,5±1,2	7,5±1,5	2,4±0,2	32±13	8,9±0,8	160±13
Гумусовые вещества:						
ММ 700	8,5±0,4	9,0±2,6	6,7±0,2	115±13	9,2±0,3	350±40
ММ (2÷5)·10 ³	7,0±0,6	10,5±0,5	6,5±0,4	83±4	10,0±0,6	350±14
ММ 7000	6,0±0,8	8,5±2,4	6,5±1,2	103±12	9,1±0,2	400±50
Контроль	9,0±1,6	9,5±1,3	6,7±0,8	100±12	8,5±0,5	500±50

Т а б л и ц а 6

Отношение удельной активности корней к удельной активности надземной массы ячменя

Вариант	Цинк	Кадмий	Ртуть
Монтмориллонит	0,7±0,3	14±2	45±8
Каолинит	1,4±0,3	16±2	45±10
Супесь	1,4±0,3	17±1	56±13
Покровный суглинок	1,4±0,3	17±2	34±7
Морена	1,3±0,3	19±4	32±2
Песчанопodzолистая почва	1,5±0,3	16±3	48±11
Подзол тяжело-суглинистый	1,6±0,3	13±2	39±6
Чернозем	2,0±0,8	13±5	41±5
Гумусовые вещества:			
ММ 700	1,0±0,3	17±2	38±4
ММ (2÷5)·10 ³	1,5±0,2	13±1	35±2
ММ 7000	1,4±0,4	16±3	44±6
Контроль	1,0±0,2	15±2	59±6
Среднее	1,4	16	43

при 105°, взвешивали и растирали. Активность измеряли на автоматическом гамма-радиометре марки 1185 фирмы «Sergl». Ошибка радиометрических измерений составляла не более 3%. Результаты измерений обрабатывали статистически.

Рост и развитие растений не зависели от субстрата, добавленного к песку, концентрации тяжелых металлов и радиации радиоактивных изотопов. На ранних стадиях развития растений (2 недели) в наи-

Т а б л и ц а 7

Содержание тяжелых металлов в надземной массе ячменя (% от общего содержания в растении)

Вариант	Цинк	Кадмий	Ртуть
Монтмориллонит	90±30	38±6	4,4±0,8
Каолинит	83±18	35±4	4,5±1,0
Супесь	84±16	33±2	3,6±0,9
Покровный суглинок	83±18	33±4	5,7±1,2
Морена	84±19	31±7	6,2±0,5
Песчанопodzолистая почва	83±16	36±8	4,1±0,9
Подзол тяжело-суглинистый	81±14	40±6	5,1±0,8
Чернозем	77±31	40±16	4,9±0,6
Гумусовые вещества:			
ММ 700	87±26	33±4	5,2±0,6
ММ (2÷5)·10 ³	82±8	40±3	5,6±0,9
ММ 7000	84±26	35±6	4,5±0,6
Контроль	86±20	37±6	3,4±0,4
Среднее	84	36	4,8

большем количестве поглощался цинк в ионной форме, кадмий — в ионной форме и из органометаллических соединений, а ртуть — в ионной форме, из органометаллических соединений, сорбированная минералами, породами и из песчанопodzолистой почвы (табл. 2, 3 и 4). К концу эксперимента наибольшим было поглощение цинка в ионной форме, сорбированного минералами, супесью и из органометаллических соединений. Значительное поглощение цинка из подзола тяжелосуглинистого явилось несколько неожиданным и скорее всего связано с невыясненными ошибками опыта. Цинк, сорбированный покровным суглинком, поглощался ячменем с меньшей скоростью, чем в контроле. Поглощение кадмия было наибольшим, когда в качестве его источника использовали ионную форму, а также кадмий, сорбированный минералами и связанный гумусовыми веществами. Ртуть в наибольшем количестве поглощалась в ионной форме, связанная минералами и гумусовыми веществами.

Коэффициент биологического поглощения (КБП) определяли как отношение удельной активности растительного материала к удельной активности песка-субстрата.

КБП тяжелых металлов во всех случаях был больше 1. КБП цинка, кадмия и ртути в надземной массе различался незначительно (табл. 5), в корневой системе он был наименьшим для цинка и наибольшим для ртути.

Определение КБП и его изменений под действием различных факторов внешней среды позволит прогнозировать накопление тяжелых металлов в растениях.

Т а б л и ц а 8

Коэффициенты использования тяжелых металлов ячменем (% от внесенного количества)

Вариант	Цинк	Кадмий	Ртуть
Монтмориллонит	7,5±2,7	5,2±0,8	14,2±0,2
Асканит	5,8±0,2	—	—
Каолинит	6,3±0,1	7,1±1,1	20,1±1,9
Супесь	8,7±0,8	5,9±0,3	21,4±1,9
Покровный суглинок	2,5±0,1	5,5±0,6	18,7±0,2
Морена	4,0±0,8	4,3±0,9	18,4±0,4
Песчанопodzолистая почва	6,6±1,0	5,9±1,3	12,7±2,0
Подзол тяжело-суглинистый	6,1±0,5	3,3±0,5	8,5±0,3
Чернозем	2,8±0,9	2,5±1,0	8,4±0,7
Гумусовые вещества:			
ММ700	6,0±0,2	8,4±1,0	18,0±1,9
ММ (2÷5)×10 ³	5,2±0,5	6,6±0,5	18,2±0,7
ММ 7000	4,4±0,5	7,6±1,3	20,5±2,6
Контроль	6,3±1,1	7,6±1,2	24,9±2,5

Как видно из табл. 6, ртуть концентрируется преимущественно в корнях, а цинк более или менее равномерно распределяется по растению. Отношение концентраций цинка в корневой системе и надземной массе ячменя 1—2, кадмия — 13—19, ртути — 35—39.

Распределение тяжелых металлов по растению определяется, с одной стороны, их концентрацией в растительном материале, а с другой — массой последнего. Цинк сосредоточивается преимущественно в надземной массе (около 84 %), ртуть — в корневой системе (около 95 %), кадмий — и в надземной массе, и в корневой системе (табл. 7).

Распределение тяжелых металлов по растению не зависело от их источников. Это может свидетельствовать либо об одинаковых путях и скоростях транспорта различных соединений тяжелых металлов в растении, либо о том, что, поступая в клетки корня, различные соединения тяжелых металлов претерпевают превращения, и цинк, кадмий и ртуть движутся вверх по ксилеме в форме каких-то одинаковых соединений.

Количество цинка, поглощенное ячменем за период опыта, составило 2,5—7,5 %, кадмия — 2,5—8,4, ртути — 8,5—24,9 % их общего содержания в среде (табл. 8). Подтверждаются литературные данные [3]

о невысоких значениях коэффициента использования тяжелых металлов, находящихся в почве. В наших опытах для цинка он был равен 2,8—6,6 %, кадмия — 2,5—5,9, ртути — 8,4—12,7 %.

Заключение

Большого поглощения растениями тяжелых металлов по сравнению с контролем (ионная форма) ни в одном из вариантов опыта не обнаружено.

Скорость накопления тяжелых металлов из органо-минеральных соединений и в ионной форме приблизительно одинаковая. Сорбция тяжелых металлов на минералах каолининовой и монтмориллонитовой групп не повлияла на их поглощение растениями (тем более, что в контроле они также скорее всего были сорбированы в основном кварцевым песком).

Поглощение тяжелых металлов из почв и пород, легких по механическому составу, происходило более интенсивно, чем из пород с тяжелым механическим составом. Наименьшее количество тяжелых металлов поглощено из чернозема и подзола тяжело-суглинистого.

Концентрация цинка у месячных растений была наибольшей, а кадмия — наименьшей. Концентрация ртути по мере роста растений постоянно уменьшалась.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Талдыкин С. А., Сиушева А. Г., Шакарин Б. И. Абиогенная миграция токсикантов в подзолистых и дерново-подзолистых почвах естественного сложения. Итоги 1978 г. Ч. I. — Депонировано во ВНИИформцентре, Б748457, 5 апр. 1979 г. — 2. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Мазель Ю. Я., Талдыкин С. А., Сиушева А. Г., Шакарин Б. И. Биогенная трансформация и перенос токсических металлов в почвах. Итоги 1978 г. Ч. II. — Депонировано во ВНИИформцентре, Б748456, 5 апр.

1979 г. — 3. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Мазель Ю. Я. Поведение тяжелых металлов в системе почва — растение. Аналитический обзор. Итоги 1978 г. Ч. III. — Депонировано во ВНИИформцентре, Б748455, 5 апр. 1979 г. — 4. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Тормасов С. А., Талдыкин С. А. Исследование влагопереноса в подзолистых и дерново-подзолистых почвах в осенний и весенний периоды методом радиоактивных индикаторов. — Изв. ТСХА, 1980, вып. 2, с. 78—87.

Статья поступила 15 февраля 1980 г.

SUMMARY

It was studied by the method of radioactive indicators how metals (zinc, cadmium and mercury) come into barley from different compounds.

Utilization by plants of labelled zinc which comes into soil as ions and plant residues as well as getting labelled metals combined by different soil components into plants have been studied.

Zinc-65, cadmium-155 and mercury-203 were used as radioactive indicators.