

УДК 631.416.8

С. С. Манджиева (НИИ биологии ФГАОУ ВПО «ЮФУ»)

Т. М. Минкина, С. Н. Сушкова (ФГАОУ ВПО «ЮФУ»)

О. Г. Назаренко, С. Ю. Бакоев (ФГОУ ВПО «ДонГАУ»)

Е. М. Антоненко (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕЛИОРАНТОВ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАСТЕНИЙ ЦИНКОМ И СВИНЦОМ

В условиях многолетнего микрополевого опыта установлена тесная связь между содержанием подвижных форм Zn и Pb в черноземе обыкновенном и количеством металлов в яровом ячмене. Загрязнение Zn и Pb ведет к накоплению данных металлов в растениях в количествах, превышающих их ПДК. Внесение мела, цеолитов, органических удобрений, а также их сочетания привело к уменьшению подвижности Zn и Pb в почве и снижению количества данных металлов в ячмене в течение трех лет исследования. Использование мела совместно с навозом позволило получить гигиенически чистую продукцию уже в первый год их применения.

Ключевые слова: мелиоранты, транслокация, тяжелые металлы, ячмень, чернозем обыкновенный.

S. S. Mandzhieva

T. M. Minkina, S. N. Sushkova

O. G. Nazarenko, S. U. Bakoev

E. M. Antonenko

AMELIORANTS USING FOR PREVENTION OF PLANTS CONTAMINATION WITH ZINC AND LEAD

Close relationship between the content of Zn and Pb mobile forms in the ordinary chernozem and the metals amount in spring barley was established in long years microfield experience. Contamination of Zn and Pb leads to the accumulation of these metals in plants in quantities exceeding their Macs. Penetration chalk, zeolite, organic fertilizer, as well as their combination led to a decrease the Zn and Pb mobility in the soil and reduce the amount of these metals in barley for three years studies. Using chalk, with the manure yielded hygienically clean products in the first year of their application.

Keywords: ameliorants, translocation, heavy metals, barley, the ordinary chernozem.

В результате хозяйственной деятельности человека значительная доля поллютантов попадает в почву и прочно в ней удерживается. Загрязнение тяжелыми металлами (ТМ) почв вызывает тревогу не только из-за возможного снижения продуктивности сельскохозяйственных культур, но и в связи с ухудшением качества продукции сельского хозяйства. Проблема осложняется тем, что растения без каких-либо визуальных признаков могут содержать опасные для человека и животных количества ТМ [1]. Таким

образом, качество почв в значительной степени определяет качество растительной продукции.

В настоящее время многие теоретические и практические стороны проблемы загрязнения почв ТМ изучены явно недостаточно. Дискуссионным остается вопрос о способах эффективной ремедиации загрязненных почв, особенно высокоплодородных, к которым, в первую очередь, относятся черноземы.

В качестве поглотителей ТМ представляют интерес природные цеолиты, обладающие высокой емкостью обменного поглощения. Адсорбционные свойства цеолитов определяются уникальной кристаллической решеткой, характеризующейся развитой внутренней поверхностью и строго определенным размером входных окон [2]. Использование природных сорбентов выгодно тем, что они являются экологически чистым сырьем, их применение доступно и недорого.

В то же время, рассматривая цеолиты как сорбенты ТМ, следует учитывать, что их применение ограничивается следующими обстоятельствами: во-первых, объем вносимых цеолитов очень велик, что делает приемлемым их использование только вблизи цеолитовых месторождений. Во-вторых, наряду с катионами ТМ цеолиты могут поглощать ионы калия, аммония, микроэлементов, то есть влиять на условия минерального питания растений [3]. В-третьих, имеются сведения, что цеолиты подвержены выветриванию и в ходе этого процесса могут превратиться в другие минералы с иными свойствами поглощения катионов [4]. Имеются различные точки зрения по эффективности действия цеолитов на загрязненных ТМ почвах. Использование цеолитов в качестве адсорбентов ТМ в почвах изучено недостаточно.

Другим эффективным приемом ремедиации является известкование загрязненных почв [5]. Отличительная особенность природного материала – мела – связана с тем, что он, как и цеолиты, легко добывается и пере-

рабатывается при относительно небольших затратах, не вызывая серьезных экологических нарушений. Некоторые авторы [1, 3] указывают на увеличение сорбционной активности минеральных и органических сорбентов при их совместном внесении.

Эффективность приемов ремедиации загрязненных почв наиболее изучена на слабокислых и нейтральных черноземах и кислых дерново-подзолистых и подзолистых почвах различного гранулометрического состава. На основе данных исследований для кислых и слабокислых почв разработаны рекомендации по снижению подвижности ТМ путем внесения цеолитов и известкования. В то же время методы ремедиации загрязненных почв степной зоны не разработаны. Черноземы обыкновенные в основном находятся вне внимания исследователей.

Поскольку почвы данного генетического подтипа занимают значительную площадь (в основном в промышленно развитых районах Ростовской области и Краснодарского края, подвергающихся активному антропогенному загрязнению), причем большая их часть находится в сельскохозяйственном использовании, представляется весьма актуальным проведение на них аналогичных исследований.

В условиях вегетационных и полевых опытов нами было показано инактивирующее действие CaCO_3 , глауконита и навоза, а также их сочетания на подвижность Zn и Pb в черноземах обыкновенных [6]. В качестве известкового материала использовался мел, который на 97 % состоит из Ca, количество Mg составляет всего 3 %. Показано, что химическая активность природных карбонатов имеет отрицательную корреляцию с содержанием магния ($r = -0,92$) [7].

Использование карбонатов и глауконита на исследуемых почвах обусловлено не только их высокими сорбционными свойствами, но имеющимися природными месторождениями мела и цеолита на исследуемой территории.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. В условиях полевого мелкоделяночного опыта чернозем обыкновенный был искусственно загрязнен уксуснокислыми солями Zn и Pb в дозе 300 и 96 мг/кг, через 3 месяца в нее были внесены сорбенты. В качестве мелиоративных средств применяли мел ($2,5 \text{ кг/м}^2$ и 5 кг/м^2), глауконит ($2,5 \text{ кг/м}^2$) и полуперепревший навоз КРС (5 кг/м^2), а также их сочетания. Повторность опыта – трехкратная. Изучение последствий их было начато через год с момента закладки опыта и продолжалось в течение трех лет в системе севооборота.

Опыт был заложен по следующей схеме: 1. Контроль; 2. Металл (Me); 3. Me + $2,5 \text{ кг/м}^2$ мела; 4. Me + $2,5 \text{ кг/м}^2$ мела + 5 кг/м^2 навоза; 5. Me + 5 кг/м^2 мела; 6. Me + 5 кг/м^2 мела + 5 кг/м^2 навоза; 7. Me + 2 кг/м^2 глауконита; 8. Me + 2 кг/м^2 глауконита + 5 кг/м^2 навоза; 9. Me + 5 кг/м^2 навоза. Образцы отбирали с глубины 0-20 см.

Исследуемая культура – яровой ячмень (*Hordeum sativum distichum*) сорта Одесский 100. Для того чтобы добавленные в почву соли ТМ прошли трансформацию, между их внесением и посевом ячменя был выдержан период 8 месяцев.

Агротехника возделывания культуры – зональная. Закладка опытов, проведение наблюдений и учетов, отбор растительных проб проводились в соответствии с методиками полевого опыта [8] на базе государственного сортоиспытательного участка (ГСУ) «Ростовский». Образцы растений отбирались в фазу полной спелости ярового ячменя.

Во время проведения исследований складывались благоприятные погодные условия, вместе с тем, некоторые климатические показатели значительно различались по годам. Метеоусловия первого и второго года исследований были достаточно благоприятными для роста и развития ярового ячменя, тогда как третий был засушливым.

Общее содержание ТМ в почве определяли рентген-флюоресцентным методом. Концентрацию подвижных соединений метал-

лов в почве определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС). Для экстракции обменных форм ТМ применяли 1 н аммонийно-ацетатный буфер ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) – ААБ, pH 4,8, характеризующий актуальный запас элементов в почве. По разнице между содержанием металлов в вытяжках 1 % раствора ЭДТА в ААБ и ААБ рассчитывали количество комплексных соединений. Количество специфически сорбированных форм находили по разнице результатов, полученных при экстрагировании вытяжками 1 н HCl и ААБ. Методическое обоснование такого подхода к расчету соединений приведено в работе авторов Т. М. Минкиной, Г. В. Мотузовой, О. Г. Назаренко и др. [9]. Суммарное содержание обменных, комплексных и специфически сорбированных форм составляет группу непрочных соединений. Экологическое значение данной группы состоит в том, что она характеризует миграционную способность ТМ и, соответственно, возможность их поступления в растения.

Тяжелые металлы в растениях определены методом мокрого озоления в смеси кислот $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ [10] с последующим определением на ААС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Установлено, что содержание Zn в зерне ячменя на контроле составляет 21,6-24,8 мг/кг (таблица 1), что отвечает их фоновому содержанию [11, 12]. Концентрация Zn в соломе была на уровне 16,6-18,7 мг/кг и оценивалась как дефицитная (< 20 мг/кг) [13].

Таблица 1 – Содержание ТМ в различных органах растений ярового ячменя (действие)

Вариант опыта	Мг/кг							
	1 год		2 год		3 год		Среднее за 3 года	
	зерно	стебли	зерно	стебли	зерно	стебли	зерно	стебли
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zn								
Без внесения металла	22,6	17,3	24,8	18,7	21,6	16,6	23,0	17,5
Металл (Me)	65,3	74,8	68,2	75,7	62,7	69,6	65,4	73,4
Me + глауконит	51,3	55,3	53,7	56,0	49,2	51,6	51,4	54,3
Me + навоз	53,2	56,7	55,3	60,2	58,7	60,3	55,7	59,1
Me + глауконит + навоз	49,8	52,8	51,2	54,5	48,7	51,0	49,9	52,8
Me + мел 2,5 кг/м ²	45,0	50,8	47,8	53,6	42,8	49,7	45,2	51,4
Me + мел 5 кг/м ²	44,6	54,2	46,4	59,6	42,0	46,5	44,3	53,4

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Ме + мел 2,5 кг/м ² + навоз	48,7	57,2	51,2	61,7	45,3	51,6	48,4	56,8
Ме + мел 5 кг/м ² + навоз	42,3	53,5	44,2	52,0	37,8	50,5	41,4	52,0
НСП ₀₅	4,4	7,4	5,2	8,2	4,8	6,6	4,0	5,6
Рb								
Без внесения металла	0,4	1,4	0,3	1,7	0,3	1,2	0,3	1,4
Металл (Ме)	2,4	10,2	2,0	9,0	3,0	7,3	2,5	8,8
Ме + глауконит	1,83	7,54	1,72	8,10	1,96	4,81	1,84	6,82
Ме + навоз	1,70	7,18	1,68	7,43	1,79	4,72	1,72	6,44
Ме + глауконит + навоз	1,75	7,76	1,63	8,62	1,84	5,13	1,74	7,17
Ме + мел 2,5 кг/м ²	1,41	6,82	1,40	7,20	1,17	6,42	1,33	6,81
Ме + мел 5 кг/м ²	1,38	6,57	1,51	6,60	1,25	6,14	1,38	6,44
Ме + мел 2,5 кг/м ² + навоз	0,86	6,11	1,10	4,21	0,93	5,35	0,96	5,22
Ме + мел 5 кг/м ² + навоз	0,50	5,48	0,58	4,45	0,53	4,23	0,54	4,72
НСП ₀₅	0,17	0,29	0,23	0,92	0,18	0,23	0,44	1,45

Концентрация Zn в корнях ярового ячменя была несколько ниже (19,9 мг/кг), чем в зерне. Такое распределение Zn в ячмене, по-видимому, связано с недостатком его подвижных форм в карбонатном черноземе. Благоприятные погодные условия второго года отразились на повышении обеспеченности Zn ячменем по сравнению с первым и третьим годом.

Распределение Рb по органам ячменя в незагрязненной почве было следующим: 0,3 мг/кг в зерне; 1,4 мг/кг в стеблях и 4,4 мг/кг в корнях. Большее по сравнению с другими частями растений накопление металла в корнях объясняется тем, что при проникновении в плазму происходит инактивация и депонирование значительных его количеств в результате образования малоподвижных соединений с органическим веществом. Видимо, только часть Рb с ксилемным током транспортируется в надземные органы, что подтверждается работой [14].

Таким образом, распределение ТМ по органам ярового ячменя на незагрязненном черноземе следующее: для Zn – зерно > корни > стебли; для Рb – корни > стебли > зерно. Причем, различия в накоплении Рb исследуемыми органами растений выражены сильнее, чем по Zn.

Внесение ТМ в чернозем обыкновенный отразилось на содержании металлов в растениях (таблица 1). Содержание Zn в ячмене, выросшем на загрязненной почве, составляло 65,4 мг/кг в зерне, 73,4 мг/кг в соломе и 204 мг/кг в корнях. Добавление Pb в почву привело к накоплению его в растениях: зерне – 2,5 мг/кг; соломе – 8,8 мг/кг; корнях – 19,1 мг/кг.

В работе М. А. Кузьмич, Г. А. Графской, Н. В. Хостанцевой установлено, что отрицательное действие ТМ на продукционный процесс начинается с концентраций, превышающих нормальную в 3-10 раз [12]. Содержание Zn и Pb в зерне ячменя увеличилось в 3 и 6 раз соответственно. В условиях модельных экспериментов при аналогичной антропогенной нагрузке количество Zn в зерне ячменя возросло в 4 раза, Pb – почти в 8 раз, что соответствовало 88,4 мг/кг Zn и 3,9 мг/кг Pb [15]. Несколько меньшее накопление ТМ растениями в полевом опыте связано с лучшими условиями их произрастания по сравнению с условиями модельных экспериментов.

Накопление ТМ растениями привело к загрязнению растительной продукции (таблица 1). Содержание Zn в зерне увеличилось в 3 раза, Pb – в 8 раз и превышало ПДК данных элементов в 1,3 и в 5 раз соответственно (ПДК для Zn – 50 мг/кг, для Pb – 0,5 мг/кг) [16]. При этом в почвах загрязненных вариантов превышение ПДК по подвижным формам соответствующих элементов отличалось незначительно и составляло для Zn – 1,5 раза, для Pb – 2 раза, что указывает на меньшую устойчивость растений к повышенной концентрации Pb в почве. Так, высота барьера на границе корень-стебель и стебель-зерно при внесении Zn увеличивается до 2,8 и 1,1 соответственно. При добавлении Pb высота барьеров уменьшается до 2,2 на границе корень-стебель и до 3,5 на границе стебель-зерно. Эти изменения отражаются на перераспределении металлов по органам ярового ячменя. Соотношение зерно:стебли:корни по Zn на контроле составляет 1:1:1; при загрязнении – 1:1:3; по Pb данное соотношение на контроле равно 1:5:15, при загрязнении – 1:4:8. Таким образом, природа и концентрация

металлов в почве влияют на их распределение по органам ярового ячменя.

Установлены различия в закономерностях накопления элементов со временем. В последствии происходит снижение количества Zn во всех органах ячменя на 8-10 % в первый год последствия, и на 21-22 % – во второй год последствия (таблица 2). Соотношение зерно:стебли:корни остается неизменным.

Таблица 2 – Содержание ТМ в различных органах растений ярового ячменя в течение трех лет после загрязнения почвы

Мг/кг

Вариант опыта	Действие		Последствие		2-е последствие	
	зерно	стебли	зерно	стебли	зерно	стебли
Zn						
Без внесения металла	23,0	17,5	24,2	18,1	22,7	17,9
Металл (Me)	65,4	73,4	58,7	67,4	57,2	66,0
Me + глауконит	51,4	54,3	30,4	34,5	28,4	32,2
Me + навоз	55,7	59,1	32,7	37,0	31,2	36,5
Me + глауконит + навоз	49,9	52,8	29,6	32,7	27,7	31,4
Me + мел 2,5 кг/м ²	45,2	51,4	26,5	30,7	24,1	28,7
Me + мел 5 кг/м ²	44,3	53,4	25,6	35,2	23,8	33,2
Me + мел 2,5 кг/м ² + навоз	48,4	56,8	29,7	38,2	28,4	37,1
Me + мел 5 кг/м ² + навоз	41,4	52,0	21,2	31,8	19,6	30,7
НСР _{0,5}	4,0	5,6	5,9	7,9	5,4	8,1
Pb						
Без внесения металла	0,3	1,4	0,2	1,1	0,3	1,3
Металл (Me)	2,5	8,8	1,7	5,9	0,9	3,0
Me + глауконит	1,84	6,82	0,41	1,49	0,36	1,35
Me + навоз	1,72	6,44	0,40	1,44	0,35	1,29
Me + глауконит + навоз	1,74	7,17	0,47	1,83	0,34	1,56
Me + мел 2,5 кг/м ²	1,33	6,81	0,36	1,27	0,27	0,91
Me + мел 5 кг/м ²	1,38	6,44	0,20	0,95	0,18	0,75
Me + мел 2,5 кг/м ² + навоз	0,96	5,22	0,25	1,20	0,16	0,85
Me + мел 5 кг/м ² + навоз	0,54	4,72	0,19	1,11	0,14	0,88
НСР _{0,5}	0,44	1,45	0,15	0,21	0,22	0,34

Транслокация Pb в последующие годы выражена значительно слабее. Концентрация Pb в зерне и стеблях в среднем во второй и третий год уменьшилась на 33 % и 65 % соответственно, в корнях, по сравнению с ними, изменилась незначительно.

Однако, несмотря на снижение поглощения металлов, со временем наблюдается стойкое загрязнение ими растительной продукции. Количес-

во Zn и Pb в генеративных органах ячменя превышало ПДК в течение трех лет с момента загрязнения (таблица 2).

Известно, что исследуемая почва – это высокобуферная система. Относительное содержание непрочно связанных соединений Zn и Pb в черноземе составляет всего 12-15 %. Однако механизмы самозащиты срабатывают недостаточно эффективно. Эта ситуация вызвала необходимость поиска способов ремедиации загрязненной почвы путем применения мелиорантов. Хотелось бы отметить, что все мелиоранты в той или иной степени снижали концентрацию Zn как в зерне, так и в стеблях ячменя.

Действие мелиорантов математически значимо различалось с фоном, что свидетельствует об их эффективности (таблица 1).

Сравнивая действие мелиорантов при их раздельном внесении, можно отметить, что глауконит и навоз изменяли концентрацию Pb в растениях слабее, чем мел. Уже в первый год использования мела количество Zn в зерне ячменя уменьшилось на 30 % и удовлетворяло требованиям безопасности, количество Pb снизилось в среднем на 50 %. Различия в накоплении металлов ячменем при внесении 2,5 % и 5 % дозы мела были математически недостоверными (таблица 1). Растворение мела в полевом опыте и в модельном эксперименте в основном происходило в первый год его внесения, в последующие годы эти изменения были незначительны [17], что указывает на возможность образования хемосорбированных карбонатов металлов и дальнейшую стабилизацию карбонатно-кальциевой системы. Таким образом, процесс разложения мела в течение трех лет после известкования был весьма далек от завершения.

При применении глауконита и навоза экологически безопасная продукция получена только во второй год их применения. Меньшая эффективность действия цеолита, по-видимому, связана как с невысокой селективностью его по отношению к Zn и Pb, так и с медленной кинетикой их взаимодействия в карбонатных почвах. В работах [1, 18] показано сущест-

венное ограничение подвижности ТМ в почве и поступление их в растения лишь при внесении цеолита, а также навоза в дозах 100 т/га и выше. Поэтому в рекомендациях по снижению токсичности загрязненных ТМ почв [19] предлагается использование высоких доз органических удобрений (100-150 т/га).

Инактивация ТМ в почве и, соответственно, их миграционная способность также зависит от степени минерализации используемого навоза. В данной работе использовали полуперепревший навоз КРС. При его разложении в почве идет образование водорастворимых низкомолекулярных органических комплексов, увеличивающих миграционную способность металлов. Затем, по мере разложения органического вещества, начинает сильнее проявляться иммобилизирующий эффект за счет образования более прочно связанных соединений ТМ с органическим веществом. Подобный факт был установлен при внесении в почву свежего навоза и неразложившейся и слаборазложившейся соломы [1, 19]. Следовательно, при использовании навоза идет образование различных по подвижности органо-минеральных комплексов, что может как уменьшать, так и увеличивать подвижность металлов.

Установлена более высокая эффективность действия комплексного внесения мелиорантов по сравнению с отдельным их применением (таблица 1). Добавление органических веществ к глаукониту и мелу способствует увеличению количества центров, прочно фиксирующих металлы. На почвах, загрязненных Рb, разница между действием мела и его сочетанием с навозом в содержании поллютанта в растениях была достоверной (таблица 1), что связано с его высокой комплексообразующей способностью с органическим веществом.

Наибольший мелиоративный эффект оказало сочетание двойной дозы мела и навоза, как в действии, так и в последствии. Концентрации Zn и Рb в генеративных частях растений минимальны по сравнению с другими

мелиорантами. Причем погодно-климатические условия мало влияют на процесс инактивации – действие мелиорантов стабильно высокое по всем трем годам исследования (таблица 1). На вариантах совместного действия навоза с разными дозами мела во все годы исследований содержание непрочных соединений Zn и Pb в почве было даже ниже, чем в незагрязненной почве. В присутствии мела образующиеся при взаимодействии ТМ с органическим веществом комплексные соединения обладают низкой растворимостью, что снижает их подвижность [6].

Очень важно, что с течением времени сорбционный эффект на всех вариантах опыта сохраняется (таблица 2). Причем, действие мелиорантов усилилось на второй и третий год, что обусловлено более полным взаимодействием металлов с сорбентами. Различия в действии мелиорантов по накоплению ТМ растениями сохранялись в течение трех лет после их внесения, но были менее выраженными. В последствии присутствие в почве глауконита и навоза снижало уровень Zn в генеративных органах растений ниже ПДК, однако менее эффективно, чем карбонаты и их сочетание с навозом. Так, на вариантах с мелом и его внесением с навозом получено зерно, содержащее Zn и Pb в пределах фоновых концентраций элементов. Важно подчеркнуть, что разовое известкование и внесение органических удобрений, по данным литературных источников [20], уменьшает подвижность Pb в почве не менее чем на 10 лет.

Таким образом, получено достоверное увеличение содержания Zn и Pb в стеблях и зерне ячменя при загрязнении по сравнению с контролем и последующее достоверное снижение содержания металла при внесении мелиорантов в течение трех лет исследований. Наиболее эффективным сорбентом, снижающим содержание ТМ в растениях, является совместное внесение $5 \text{ кг/м}^2 \text{ CaCO}_3$ и 5 кг/м^2 навоза.

Прослеживается аналогичный эффект действия мелиорантов на содержание ТМ в растениях и количество их подвижных форм в почве, что

обусловлено их тесной связью (таблица 1 и таблица 3).

Таблица 3 – Подвижные формы Zn и Pb в черноземе обыкновенном через 1 год после внесения металлов (n = 9)

Мг/кг

Вариант опыта	Подвижные формы металла		
	обменные	комплексные	специфически сорбированные
Zn			
Без внесения металла	0,6	0,4	6,5
Металл (Me)	33,0	27,9	52,3
Me + глауконит	27,8	8,1	14,4
Me + навоз	25,1	14,5	20,3
Me + глауконит + навоз	25,4	10,6	19,9
Me + мел 2,5 кг/м ²	21,6	7,8	17,2
Me + мел 5 кг/м ²	18,0	8,8	29,9
Me + мел 2,5 кг/м ² + навоз	15,4	8,2	15,3
Me + мел 5 кг/м ² + навоз	10,2	9,8	20,0
HCP _{0,95}	6,4	1,4	10,3
Pb			
Без внесения металла	0,8	0,3	2,4
Металл (Me)	12,8	6,0	22,9
Me + глауконит	8,4	4,9	20,9
Me + навоз	8,0	3,6	17,1
Me + глауконит + навоз	7,2	1,8	14,9
Me + мел 2,5 кг/м ²	6,7	4,5	9,3
Me + мел 5 кг/м ²	4,6	4,2	9,5
Me + мел 2,5 кг/м ² + навоз	5,7	1,5	12,9
Me + мел 5 кг/м ² + навоз	4,5	0,2	9,8
HCP _{0,95}	1,4	1,3	9,9

Данные корреляционного анализа свидетельствуют, что связь между обменными формами Zn и Pb в почве и их содержание в зерне и стеблях ярового ячменя по всем годам взаимодействия была тесной и очень тесной (коэффициент корреляции (R) колебался от $0,84 \pm 0,14$ до $0,99 \pm 0,04$). Связь между концентрацией ТМ в растениях и количеством форм, связанных в комплексы также оценивалась от средней до очень тесной ($R = 0,71 \pm 0,18$ до $0,91 \pm 0,10$). Сходная взаимосвязь наблюдалась с количеством неспецифически сорбированных форм ($R = 0,64 \pm 0,21$ до $0,90 \pm 0,11$).

Таким образом, полученные значения корреляции между содержанием всех подвижных форм Zn и Pb в почве (обменных, комплексных и спе-

цифически сорбированных) и накоплением металлов в ячмене указывает на доступность исследуемых форм растениям. Это факт также подтверждается существованием тесной и очень тесной связи между суммарным содержанием в почве данных форм, отнесенных нами в группу непрочно связанных соединений, и количеством металла в зерне и соломе ячменя (для Zn и Pb $R = 0,76 \pm 0,19$ до $0,96 \pm 0,07$).

Таким образом, на основании полученных данных установлено сходство и различие в накоплении и перераспределении Zn и Pb по органам ячменя.

Сходные закономерности состоят в следующем:

- увеличение накопления металлов в растениях при их внесении в почву;
- тесная корреляция между содержанием непрочно связанных соединений Zn и Pb в почве и их накоплением в растениях;
- медленная скорость перехода из непрочно в прочно связанные соединения ТМ в почве, в результате чего, содержание Zn и Pb в ячмене было выше ПДК в течение трех лет с момента загрязнения;
- применение мела, глауконита и навоза приводит к уменьшению транслокации ТМ в органы ячменя;
- наибольшее уменьшение ТМ в растениях наблюдается при совместном использовании мела с навозом;
- с течением времени сохраняется инактивирующий эффект от внесения мелиорантов.

Различия выражаются в следующем:

- на незагрязненной почве наибольшее количество Zn сосредоточено в зерне, Pb – в корнях;
- при загрязнении почв интенсивность накопления Zn зерном и соломой ячменя снижается значительно сильнее, чем Pb;
- в загрязненных почвах Zn накапливается преимущественно в кор-

нях, высота барьеров на границе корень/стебель и стебель/зерно увеличивается. Аккумуляция Pb происходит, в основном, в зерне и стеблях, высота барьеров корень/стебель и стебель/зерно при этом снижается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные опытные данные свидетельствуют о том, что накопление и распределение металлов в растениях зависит от вида загрязнителя и от их подвижности в почве. Загрязнение чернозема обыкновенного Zn и Pb ведет к повышению содержания металлов во всех органах ячменя. При этом продукция не отвечает санитарно-гигиеническим требованиям.

В основе системы мероприятий по восстановлению почв, загрязненных ТМ, должно лежать повышение сорбционной способности почв к негативному действию ТМ, снижение транслокации их в растения. Внесение в загрязненный Zn и Pb чернозем обыкновенный мела, цеолитов, органических удобрений и их сочетания позволило снизить подвижность этих металлов в почве и ограничить их поступление в яровой ячмень в течение трех лет исследования. Наибольший детоксикационный эффект проявился при использовании CaCO_3 совместно с навозом.

Работа выполнена при финансовой поддержке проектов Министерства образования и науки Российской Федерации: № 2.1.1/3819, № 16.740.11.0528.

Список использованных источников

1 Черных, Н. А. Приемы снижения фитотоксичности тяжелых металлов / Н. А. Черных [и др.] // Агрохимия. – 1995. – № 9. – С. 101-107.

2 Глазкова, Е. А. Применение природных цеолитов месторождения Хонгуруу (Япония) для очистки нефтесодержащих сточных вод / Е. А. Глазкова, Е. Б. Стрельникова, В. Г. Иванов // Химия в интересах устойчивого развития. – 2003. – № 11. – С. 849-854.

3 Байдина, Н. Л. Инактивация тяжелых металлов гумусом и цеолитами в техногеннозагрязненной почве / Н. Л. Байдина // Почвоведение. –

1994. – № 9. – С. 121-125.

4 Ильин, Б. В. Тяжелые металлы в системе почва-растение / Б. В. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.

5 Алексеев, Ю. В. Влияние кальция и магния на поступление кадмия и никеля из почвы в растения вики и ячменя / Ю. В. Алексеев, Н. И. Вялушкина // Агрохимия. – 2002. – № 1. – С. 82-84.

6 Минкина, Т. М. Влияние различных мелиорантов на подвижность цинка и свинца в загрязненном черноземе / Т. М. Минкина [и др.] // Агрохимия. – 2007. – № 10. – С. 67-75.

7 Дричко, В. Ф. Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела / В. Ф. Дричко, А. В. Литвинович, О. А. Павлова // Агрохимия. – 2002. – № 4. – С. 81-87.

8 Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М.: Колос, 1968. – 336 с.

9 Минкина, Т. М. Трансформация соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны / Т. М. Минкина // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 810-818.

10 Практикум по агрохимии / под ред. В. Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 304 с.

11 Закруткин, В. Е. Некоторые аспекты распределения меди и цинка в почвах и растениях агроландшафтов Ростовской области / В. Е. Закруткин, Д. Ю. Шишкина // Материалы международного симпозиума «Тяжелые металлы в окружающей среде». – Пущино, 1996. – С. 101-109.

12 Кузьмич, М. А. Влияние известкования на поступление ТМ в растения / М. А. Кузьмич, Г. А. Графская, Н. В. Хостанцева // Агрохимический вестник. – 2000. – № 5. – С. 28-29.

13 Кондрахин, И. П. Алиментарные и эндокринные болезни животных / И. П. Кондрахин. – М.: Агропромиздат, 1989. – 256 с.

14 Свинец в окружающей среде / Под ред. В.В. Добровольского. –

М.: Наука, 1987. – 181 с.

15 Самохин, А. П. Трансформация соединений тяжелых металлов в почвах Нижнего Дона: дис. ... канд. биол. наук: 03.00.27 / Самохин Алексей Петрович. – Ростов н/Д, 2003. – 122 с.

16 Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов. – М., 1990. – 54 с.

17 Минкина, Т. М. Изменение свойств загрязненной тяжелыми металлами почвы при использовании методов химической ремедиации / Т. М. Минкина [и др.] // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2006. – №. 1. – С. 76-80.

18 Дабахов, М. В. Влияние агрохимических средств на подвижность Рb и Cd в светло-серой лесной почве и поступление их в растения / М. В. Дабахов, Г. А. Соловьев, В. С. Егорова // Агрохимия. – 1998. – № 3. – С. 54-59.

19 Евдокимова, Г. А. Определение степени токсичности загрязненных металлами почв и некоторые способы ее снижения / Г. А. Евдокимова. – М.: АН СССР, 1985. – 86 с.

20 Салама, Ф. С. Влияние органических удобрений на подвижность свинца в почве и поступление его в растения / Ф. С. Салама, М. М. Абузид, А. И. Обухов // Вестник Московского Университета. – Серия 17. – Почвоведение. – 1993. – № 4. – С. 45-51.