

2. Плодородие почв и применение удобрений

spring wheat yields on watershed, medium- and severely eroded soils under organic, mineral and organic-mineral fertilizer systems. Yields and values of responses to inoculation depended on slope elements and fertilizer system.

Поступила 04.04.13

УДК 633.16+633.367:632.15

НАКОПЛЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ ЯЧМЕНЯ И ЛЮПИНА ЦИНКА, МЕДИ И СВИНЦА ПРИ РАЗНЫХ УРОВНЯХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ЭТИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

**Н.К. Лукашенко¹, С.Е. Головатый², З.С. Ковалевич³, Т.М. Минкина⁴,
Г.В. Мотузова⁵, С.С. Манджиева⁴, В.В. Чаплыгин⁴**

¹Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

*²Международный государственный экологический университет
им. А.Д. Сахарова, г. Минск, Беларусь*

³Международный университет «МИТСО», г. Минск, Беларусь

⁴Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия

⁵Московский государственный университет, г. Москва, Россия

ВВЕДЕНИЕ

Среди экологических проблем защиты окружающей среды от техногенного загрязнения все большее внимание уделяется агроэкосистемам – основным факторам обеспечения продовольственной безопасности государств.

В первых рядах самых опасных техногенных загрязняющих веществ стоят тяжелые металлы (ТМ). Наиболее высокими темпами в агроэкосистемах идет накопление Pb, Cd, Hg, As, Cu, Zn. В России содержание в почвах Pb и Cu, превышающее ПДК, отмечено на 1–2 % площадей пахотных угодий, содержание Cd, Ni, Cr, Zn, Hg выше ПДК – на не более 1 % пахотных земель [1]. Исследования, выполненные в РУП «Институт почвоведения и агрохимии» Республики Беларусь, показали, что около 11 % всех обследованных сельскохозяйственных земель (дерново-подзолистые почвы) имеют избыточное содержание подвижных форм меди (> 5 мг/кг), около 12 % – избыточное содержание подвижного цинка (> 10 мг/кг) [2]. Почвы с одновременным избытком меди и цинка составляют около 9 % всех обследованных земель. Количество минеральных почв, в которых содержание цинка и меди превышает ориентировочно допустимые концентрации (ОДК), составляет соответственно 0,7 и 0,9 % от всех обследованных сельскохозяйственных земель.

За период интенсивной химизации сельского хозяйства в Республике Беларусь отмечается положительный ежегодный баланс ТМ в пахотном горизонте минеральных почв, который для Cd, Pb, Zn и Cu составляет соответственно 5,1; 162,1; 692,3 и 192,0 г/га [2].

Избыточное накопление ТМ в растениеводческой продукции, которая используется для кормовых и продовольственных целей, представляет серьезную угрозу здоровью человека и животных. Известно негативное влияние ТМ на обменные процессы в организме человека и животных, приводящее к токсикозам, соматическим и генетическим заболеваниям, а зачастую и к полной гибели организма. Критерием безопасности в отношении ТМ в продуктах питания и кормах являются узаконенные в государствах максимально допустимые медицинские и ветеринарные уровни содержания этих элементов (ПДК, МДУ) для отдельных видов кормов и групп продовольствия.

Почвы ввиду своих генетических особенностей и агрохимических свойств различаются по общему содержанию, а также по содержанию подвижных и доступных растениям форм ТМ. Доступность ТМ растениям определяется их общими запасами в почве, скоростью десорбции из твердых фаз в жидкие, концентрацией в почвенном растворе [3, 4]. Для определения содержания в почве доступных растениям соединений металлов используют показатели перехода их в вытяжки, извлекающие металлы непрочно связанные с почвенными компонентами (подвижные формы). Экстрагенты для выделения подвижных форм ТМ разработаны с учетом специфических особенностей почвы [5].

Растения, произрастающие в условиях избытка ТМ, проявляют различную видовую устойчивость к ним. На этом основании они подразделяются на аккумуляторы (накопители), исключители (отражатели) и индикаторы. Аккумуляторы отличаются повышенной способностью накапливать металлы в растительных органах. У исключителей поступление токсикантов в надземную массу задерживается и остается на низком уровне в широком диапазоне концентраций этих элементов во внешней среде. У растений-индикаторов поглощение и транспорт тяжелых металлов в надземную часть происходит пропорционально их концентрации в почве [6].

Для прогнозирования накопления ТМ в растениеводческой продукции возникает объективная необходимость изучения поведения ТМ в системе почва-растение. Количественная оценка накопления ТМ в продукции базируется на изучении взаимосвязи между их состоянием в почве и накоплением в растениях. Результаты исследований послужат объективным критерием определения пригодности загрязненных почв для сельскохозяйственного использования.

Цель настоящих исследований состояла в установлении степени накопления **Cu, Zn и Pb растениями ячменя при разных уровнях моноэлементного загрязнения чернозема обыкновенного и каштановой среднесолонцеватой почвы в условиях южной части России, растениями люпина – при разных уровнях моноэлементного загрязнения дерново-подзолистой супесчаной и легкосуглинистой почвы в условиях Беларуси, в выявлении связи между формами соединений ТМ в почве и накоплением их в растениях.**

МЕТОДИКА И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов исследований были выбраны: чернозем обыкновенный, каштановая почва Ростовской области и яровой ячмень сорта Одесский–100, дерново-подзолистая почва Минской области и кормовой люпин сорта Янтарь.

2. Плодородие почв и применение удобрений

Исследуемые почвы: 1) чернозем обыкновенный карбонатный мощный малогумусный тяжелосуглинистый на лессовидном суглинке (учхоз «Донское» Октябрьского р-на, Ростовской обл., Россия), имеющий следующие свойства: 3,9 % гумуса; 53,1 % физической глины; 32,4 % ила; 0,4 % CaCO_3 ; pH_{KCl} 7,5; состав обменных оснований (мг-экв/100 г): 29,5 Ca^{2+} , 5,5 Mg^{2+} , 0,1 Na^+ ; содержание N-NO_3 – 0,8 мг/100 г, P_2O_5 – 32 мг/кг, K_2O – 248 мг/кг. Почва характеризуется как близкая к нейтральной, низкообеспеченная по гумусу, среднеобеспеченная по фосфору и калию. Валовое содержание Pb, Zn и Cu соответствует фоновому уровню для черноземов обыкновенных [7, 8];

2) каштановая среднемощная среднесолонцеватая среднесуглинистая на лессовидном суглинке (АО «Прогресс» Зимовниковского р-на, Ростовской обл., Россия), содержащая 2,6 % гумуса; 47,7 % физической глины; 29,5 % ила; 0,1 % CaCO_3 ; pH_{KCl} 7,8; состав обменных оснований (мг-экв/100 г): 20,2 Ca^{2+} , 4,5 Mg^{2+} , 2,4 Na^+ ; содержание N-NO_3 – 0,6 мг/100 г; P_2O_5 – 12 мг/кг; K_2O – 380 мг/кг. Почва характеризуется как слабощелочная, низкообеспеченная по гумусу и фосфору, с повышенным содержанием калия. Валовое содержание Pb, Zn и Cu соответствует фоновому уровню для каштановых почв [7, 8];

3) дерново-подзолистая супесчаная почва, развивающаяся на водноледниковых рыхлых супесях, подстилаемых с глубины 1 м моренным суглинком, сменяемым песком (РУП «Экспериментальная база им. Суворова» Узденского района, Минской обл., Беларусь), содержащая 2,1 % гумуса; pH_{KCl} 6,2; P_2O_5 – 130,8 мг/кг, K_2O – 131,1 мг/кг; Zn вал. – 20,2 мг/кг, Zn подв. – 6,7 мг/кг, Zn обм. – 5,0 мг/кг; Cu вал. – 5,9 мг/кг, Cu подв. – 2,8 мг/кг, Cu обм. – 0,5 мг/кг; Pb вал. – 9,9 мг/кг, Pb подв. – 4,7 мг/кг, Pb обм. – 2,2 мг/кг. Почва по степени кислотности характеризуется как близкая к нейтральной, среднеобеспеченная по гумусу и фосфору, низкообеспеченная по калию. Содержание Pb, Zn и Cu – на уровне фонового для супесчаных почв Беларуси [9];

4) дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, развивающаяся на легких пылеватых суглинках (СПК «Щемяслица» Минского района, Беларусь), содержащая 2,1 % гумуса; pH 6,0; P_2O_5 – 250,8 мг/кг, K_2O – 153,4 мг/кг; Zn вал. – 33,1 мг/кг, Zn подв. – 9,1 мг/кг, Zn обм. – 4,0 мг/кг; Cu вал. – 7,3 мг/кг, Cu подв. – 2,8 мг/кг, Cu обм. – 0,5 мг/кг; Pb вал. – 14,3 мг/кг, Pb подв. – 5,6 мг/кг, Pb обм. – 1,4 мг/кг. Почва по степени кислотности характеризуется как слабокислая, среднеобеспеченная по гумусу, высокообеспеченная по фосфору, среднеобеспеченная по калию. Валовое содержание Pb, Zn и Cu – на уровне фонового для суглинистых почв Беларуси [9].

Исследования проводили в вегетационных условиях. Растения выращивали в сосудах с массой почвы 6 кг. Дозы внесения Cu, Zn и Pb соотнесены с имеющимся уровнем загрязнения почв и предельно допустимыми концентрациями (ПДК) России и Республики Беларусь [10–12]. Металлы в изучаемые почвы вносили в виде водорастворимых солей: уксуснокислого свинца ($\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), сернокислой меди ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) и сернокислого цинка ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Повторность в опытах 3-5-кратная.

В период вегетации влажность почвы поддерживали на уровне 60 % от наименьшей влагоемкости. Почвенные образцы были отобраны и проанализированы после уборки урожая. Ячмень убирали в фазу восковой спелости, люпин на зеленую массу – в начале образования сизых бобов, на зерно – в фазу созревания зерна.

Общее содержание ТМ в почве определяли после разложения проб смесью кислот ($\text{HF} + \text{HClO}_4$). Содержание металлов, прочно связанных с почвенными компонентами, характеризующих потенциальный запас их подвижных соединений, определяли в составе вытяжек (параллельная экстракция) ацетатно-аммонийного буфера ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) – ААБ, рН 4,8 и соляной кислоты (1М HCl) [13].

Пробоподготовку растительных образцов проводили путем сухого озоления при 450 °С с последующим растворением золы смесью концентрированных кислот $\text{HNO}_3 + \text{HCl}$ [14]. Содержание металлов в вытяжках из почвы и в растворе золы растений определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС–30).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Незагрязненные фоновые почвы, на которых проводились исследования, практически не различались по содержанию в них ТМ (табл. 1).

Таблица 1

Содержание подвижных соединений тяжелых металлов в черноземе обыкновенном и каштановой почве

Валовое содержание, мг/кг	Обменные формы, ААБ, рН 4,8		Подвижные формы, 1М HCl	
	мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
1	2	3	4	5
Чернозем обыкновенный карбонатный мощный малогумусный тяжелосуглинистый				
Zn				
69,0 – фон	0,5	0,7	7,0	10,1
92,9	1,1	1,2	17,4	18,7
119,0	2,5	2,1	34,4	28,9
139,9	4,1	2,9	52,5	37,5
165,0	7,5	4,5	62,0	37,6
365,1	25,4	7,0	83,0	22,7
HCP_{05}	1,5		7,1	
ОДК 220,0 [14]	ПДК 23,0 [15]			

2. Плодородие почв и применение удобрений

Продолжение табл. 1

Валовое содержание, мг/кг	Обменные формы, ААБ, рН 4,8		Подвижные формы, 1М НСІ	
	мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
1	2	3	4	5
Cu				
43,9 – фон	0,3	0,7	2,1	4,8
46,1	0,4	0,9	3,7	8,0
53,2	0,8	1,5	5,0	9,4
72,5	1,1	1,5	11,7	16,1
100,3	1,3	1,3	18,3	18,2
135,0	4,4	3,3	29,5	21,9
НСР ₀₅	0,9		5,4	
ОДК 132,0 [14]	ПДК 3,0 [15]			
Pb				
25,0 – фон	0,6	2,4	3,0	12,0
33,1	0,7	2,1	2,9	8,8
42,0	0,8	1,9	4,4	10,5
60,0	1,4	2,3	6,2	10,3
78,2	3,4	4,3	9,3	11,9
127,0	8,2	6,5	29,9	23,5
НСР ₀₅	1,2		4,5	
ПДК 32,0 [15]	ПДК 6,0 [15]			
Среднемощная среднесолонцеватая среднесуглинистая каштановая почва				
Zn				
65,0 – фон	0,4	0,6	8,1	12,5
83,0	1,9	2,3	16,4	19,8
109,1	2,9	2,7	36,0	33,0

Валовое содержание, мг/кг	Обменные формы, ААБ, рН 4,8		Подвижные формы, 1М НСІ	
	мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
1	2	3	4	5
139,0	4,4	3,2	51,4	37,0
162,2	10,8	6,7	67,9	41,9
355,0	35,1	9,9	88,3	24,9
НСР ₀₅	2,1		8,7	
ОДК 220,0 [14]	ПДК 23,0 [15]			
Cu				
41,5 – фон	0,3	0,7	2,7	6,5
42,3	0,5	1,2	3,1	7,3
47,0	0,9	1,9	5,4	11,5
64,0	1,1	1,7	9,6	15,0
91,8	3,1	3,4	17,5	19,1
125,0	7,9	6,3	30,2	24,2
НСР ₀₅	0,7		6,1	
ОДК 132,0 [14]	ПДК 3,0 [15]			
Pb				
20,0 – фон	0,5	2,5	2,4	12,0
28,2	0,4	1,4	3,1	11,0
32,0	1,3	4,1	3,9	12,2
53,0	1,8	3,4	6,3	11,9
71,1	4,6	6,5	12,7	17,9
119,0	10,8	9,1	32,7	27,5
НСР ₀₅	0,7		5,0	
ПДК 32,0 [15]	ПДК 6,0 [15]			

2. Плодородие почв и применение удобрений

В черноземе обыкновенном общее (валовое) содержание цинка составляло 69,0, меди – 43,9, свинца – 25,0 мг/кг почвы. На долю непрочно связанных (подвижных) соединений цинка, меди и свинца (вытяжка 1М HCl) приходилось соответственно 10,1; 4,8 и 12,0 % от их общего содержания, что составляло 7,0; 2,1 и 3,0 мг/кг. Содержание наиболее легкоподвижных (обменных) соединений (вытяжка ААБ рН 4,8) цинка составило 0,5; меди – 0,3; свинца – 0,6 мг/кг почвы, или 1–2 % от валового содержания элементов.

В среднеспособной среднесолонцеватой каштановой почве общее содержание цинка, меди и свинца незначительно отличалось от общего содержания этих элементов в черноземе и составило соответственно 65,0; 41,5 и 20,0 мг/кг. Доля обменного цинка и меди от их валового содержания не превысила 1 %, свинца – 3 %. Доли подвижных форм цинка, меди и свинца составили соответственно 12,5; 6,5 и 12,0 %.

По степени подвижности (1М HCl) в незагрязненном черноземе обыкновенном ТМ расположились в следующем порядке: **Pb > Zn > Cu**. В среднесолонцеватой каштановой почве наибольшей подвижностью отличался цинк: **Zn > Pb > Cu**.

Незагрязненные дерново-подзолистые супесчаная и легкосуглинистая почвы по сравнению с черноземом обыкновенным и каштановой почвой характеризовались более низким общим содержанием тяжелых металлов (табл. 2).

Общее содержание цинка в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве составляло 33,1, меди – 7,3, свинца – 14,3 мг/кг. На долю подвижных форм цинка, меди и свинца приходилось соответственно 27,5; 38,3 и 39,2 %, или 9,1; 2,8 и 5,6 мг/кг. Относительное содержание обменных соединений **Zn, Cu, Pb** составило соответственно 12,1; 6,8 и 9,8 % от валового содержания.

В дерново-подзолистой супесчаной почве общее содержание тяжелых металлов было в 1,2–1,4 раза меньше, чем в суглинистой: цинка – 20,2 мг/кг, меди – 5,9 и свинца – 9,9 мг/кг. Однако доля подвижных и обменных форм ТМ в супесчаной почве была больше, чем в суглинистой. На долю подвижного и обменного Zn в супесчаной почве приходилось соответственно 33,2 % и 24,7 %, что в 1,2 и 2,1 раза больше, чем на суглинистой почве, на долю подвижной и обменной Cu – 47,4 % и 8,5 % (в 1,2 раза), подвижного и обменного Pb – 47,5 % и 22,2 % (в 1,2 и 2,3 раза).

По содержанию подвижных форм (1М HCl) ТМ в незагрязненных дерново-подзолистых почвах расположились в следующем порядке – **Pb > Cu > Zn**, по содержанию обменных форм (ААБ, рН 4,80) – **Zn > Pb > Cu**.

Таким образом, наиболее высокое содержание подвижных и обменных форм тяжелых металлов отмечено в незагрязненных дерново-подзолистых супесчаной и легкосуглинистой почвах по сравнению с черноземом обыкновенным и каштановой почвой.

После насыщения почв легкорастворимыми солями ТМ общее содержание элементов, доля их обменных и подвижных форм увеличились в разной степени.

При загрязнении тяжелыми металлами чернозема обыкновенного в наибольшей степени увеличивалась доля обменного цинка (табл. 1). В частности, при увеличении общего содержания в почве цинка в 2 раза (с 69,0 до 139,9 мг/кг) доля обменной формы металла возросла в 4 раза. При наибольшем уровне загрязнения чернозема цинком (365,1 мг/кг – более 5 раз выше фонового) доля обменной формы элемента возросла в 10 раз и составила 7,0 % против 0,7 % на фоне. Самая высокая доля подвижных форм цинка установлена при загрязнении, превышающем фон в 2–2,4 раза (37,6 %). По мере дальнейшего загрязнения чернозема доля подвижных кислоторастворимых форм цинка снизилась до 22,7 %.

С увеличением уровня загрязнения чернозема медью (с 43,9 до 135,0 мг/кг – в 3 раза) доля обменной и подвижной форм возросла с 0,7 до 3,3 % и с 4,8 до 21,9 % соответственно. Доля обменных и подвижных форм свинца также увеличилась по мере загрязнения чернозема, но в меньшей степени, чем меди. При возрастании концентрации свинца в почве до 127,0 мг/кг, т.е. более чем в 5 раз, количество обменных и подвижных форм возрастало в 2,0–2,7 раза и составляло соответственно 6,5 и 23,5 %.

В каштановой почве общая тенденция увеличения обменных и подвижных форм ТМ с повышением уровня загрязнения сохранялась, однако отмечено более высокое содержание обменных форм элементов. При максимальном уровне загрязнения почвы доля обменных форм **Zn, Cu и Pb** повышалась соответственно до 9,9; 6,3 и 9,1 %.

В загрязненной дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при общем содержании цинка 55 и 110 мг/кг доля подвижных форм элемента возрастала почти в 2 раза (с 27,5 до 52,3 % от валового содержания), как и в супесчаной почве (с 33,2 до 70,8 % от валового содержания) (табл. 2). Доля обменных форм цинка в легкосуглинистой почве увеличилась более чем в 2 раза, составив 29,3–32,7 % от валового содержания, в супесчаной почве – менее чем в 2 раза, достигнув 35,4–48,2 % от валового содержания.

Таблица 2

Содержание подвижных соединений тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах

Валовое содержание, мг/кг	Обменные формы, ААБ, рН 4,8		Подвижные формы, 1М НСІ	
	мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
Дерново-подзолистая легкосуглинистая почва				
Zn				
33,1 – фон	4,0	12,1	9,1	27,5
55	16,1	29,3	26,2	47,6
110	36,0	32,7	57,5	52,3
НСР ₀₅	4,2		13,1	
ОДК 110,0 [10]	ПДК 23,0 [11]		ОДК 18,0 [2]	
Cu				
7,3 – фон	0,5	6,8	2,8	38,3
33	6,3	19,1	24,6	74,5
66	15,0	22,7	46,6	70,6
165	43,5	26,4	133,7	81,0
НСР ₀₅	14,1		17,7	
ОДК 66,0 [10]	ПДК 3,0 [12]		ОДК 13,5 [2]	
Pb				
14,3 – фон	1,4	9,8	5,6	39,2

2. Плодородие почв и применение удобрений

Окончание табл. 2

Валовое содержание, мг/кг	Обменные формы, ААБ, рН 4,8		Подвижные формы, 1М НСІ	
	мг/кг	% от валового	мг/кг	% от валового
32	7,5	23,4	17,7	55,3
64	20,9	32,7	50,6	79,1
160	69,5	43,4	129,0	80,6
НСР ₀₅	19,7		21,1	
ПДК 32,0 [12]	ПДК 6,0 [10]		ОДК 25,0 [2]	
Дерново-подзолистая супесчаная почва				
Zn				
20,2 – фон	5,0	24,7	6,7	33,2
55	19,5	35,4	35,4	64,4
110	53,0	48,2	77,9	70,8
НСР ₀₅	15,7		22,9	
ОДК 55,0 [10]	ПДК 23,0 [11]		ОДК 12,0 [2]	
Cu				
5,9 – фон	0,5	8,5	2,8	47,4
33	9,0	27,3	22,4	67,9
66	23,9	36,2	54,5	82,6
165	68,7	41,6	135,3	82,0
НСР ₀₅	10,4		4,8	
ОДК 33,0 [10]	ПДК 3,0 [12]		ОДК 7,5 [2]	
Pb				
9,9 – фон	2,2	22,2	4,7	47,5
32	9,3	29,1	20,7	64,7
64	27,3	42,6	61,1	95,5
160	77,4	48,4	133,7	83,6
НСР ₀₅	22,8		18,7	
ПДК 32,0 [12]	ПДК 6,0 [10]		ОДК 15,0 [2]	

С увеличением степени загрязнения дерново-подзолистых почв медью (с 33 до 165 мг/кг) доля ее подвижных форм увеличилась с 74,5 до 81,0 % в суглинистых почвах и с 67,9 до 82,0 % в супесчаных, обменных форм – с 19,1 до 26,4 % и с 27,3 до 41,6 % соответственно.

Доля подвижных форм свинца в дерново-подзолистых легкосуглинистых и супесчаных почвах с увеличением уровня загрязнения (с 32 до 160 мг/кг) также возросла (от 55,3 % до 80,6 % и от 64,7 % до 83,6 % соответственно). Практически в равной мере возросла при загрязнении доля обменных форм свинца в суглинистой (от 23,4 % до 43,4 %) и в супесчаной почве (от 29,1 % до 48,4 %).

Увеличение подвижности ТМ в почве при возрастании уровня загрязнения способствовало увеличению поступления их в растения и накоплению в конечной продукции.

Чернозем. При повышении общего содержания в черноземе обыкновенном цинка от фонового (69,0 мг/кг) до высокого уровня загрязнения (365 мг/кг) содержание элемента в зерне возросло от 24,5 до 88,4 мг/кг, что значительно выше (в 1,8 раза) ПДК для растений (табл. 3). Содержание цинка в зерне ниже допустимого уровня отмечено при общем содержании в почве металла 119 мг/кг, обменного – на уровне 2,5 мг /кг почвы. Установлено более интенсивное накопление цинка в соломе ячменя, чем в зерне.

В диапазоне загрязнения почвы медью (46–135 мг/кг) ее накопления в зерне выше допустимого не установлено. Определено, что в соломе ячменя меди, в отличие от цинка, накапливалось меньше, чем в зерне.

Содержание Рb в зерне превысило допустимый уровень (0,5 мг/кг) уже при фоновом содержании металла в почве – 25 мг/кг. В соломе ячменя свинца, также как и цинка, накапливалось больше, чем в зерне.

Каштановая почва. При возделывании ячменя на среднемошной среднесолонцеватой каштановой почве накопление цинка в зерне выше допустимого отмечено уже при валовом его содержании на уровне 109,1 мг/кг (2,9 мг /кг – обменного и 36,0 мг/кг – подвижного).

При загрязнении почвы медью на уровне ПДК (125 мг/кг почвы) накопление ее в зерне не превышало допустимой нормы и составляло 9,7 мг/кг. В соломе содержание меди при таком же уровне загрязнения повышалось до 16 мг/кг.

На каштановой почве, также как и на черноземе, превышение допустимого норматива по содержанию свинца в зерне установлено при фоновой концентрации элемента в почве (20 мг/кг).

В исследованиях установлено более высокое накопление всех ТМ в соломе ячменя, чем в зерне.

Таким образом, накопление Zn в зерне ячменя выше принятых нормативов для продовольственного зерна установлено при более низком уровне загрязнения каштановой почвы, чем чернозема.

Содержание Рb в зерне выше допустимого уровня отмечалось уже при фоновом содержании элемента как в черноземе, так и в каштановой почве. Очевидно, здесь имеет место несоответствие принятых в России общих нормативов по допустимому содержанию металлов в почвах и в растениях [16, 17]. В связи с этим возникает объективная необходимость разработки региональных нормативов по допустимому содержанию ТМ в почвах и растениях.

Дерново-подзолистые почвы. В проведенных нами более ранних исследованиях на дерново-подзолистых почвах было установлено, что допустимыми уровнями валового содержания цинка в почве, обеспечивающими получение нормативно допустимых уровней содержания цинка в зерне (продовольственном и фуражном), являются 80 мг/кг – для суглинистых, 60 мг/кг – для супесчаных и 50 мг/кг – для песчаных почв. Для получения продовольственного зерна ячменя нормативно чистого по содержанию меди допустимые уровни валового содержания ее в суглинистых, супесчаных и песчаных почвах составляют соответственно 100; 70 и 60 мг/кг почвы [18].

Таблица 3
Содержание тяжелых металлов в зерне и соломе ярового ячменя при моноэлементном загрязнении чернозема и каштановой почвы

Валовое содержание ТМ в почве, мг/кг	Содержание ТМ в продукции, мг/кг		Валовое содержание ТМ в почве, мг/кг	Содержание ТМ в продукции, мг/кг	
	зерно	солома		зерно	солома
чернозем обыкновенный					
ZN					
69,0 – фон	24,5	20,4	65,0 – фон	22,4	17,6
92,9	26,5	47,4	83,0	28,3	40,2
119,0	42,2	54,4	109,1	51,7	66,8
139,9	50,5	70,0	139,0	52,6	71,4
165,0	69,9	77,9	162,2	80,8	103,6
365,1	88,4	107,9	355,0	95,5	116,1
НСР ₀₅	3,9	3,3	НСР ₀₅	1,5	5,3
ПДК [19]	50,0		ПДК [19]	50,0	
CU					
43,9 – фон	1,0	1,2	41,5 – фон	2,1	2,0
46,1	1,9	2,0	42,3	4,0	5,8
53,2	2,6	2,0	47,0	5,6	8,2
72,5	4,5	3,0	64,0	6,7	8,8
100,3	7,5	4,7	91,8	7,4	11,9
135,0	9,1	7,7	125,0	9,7	16,0
НСР ₀₅	0,5	1,7	НСР ₀₅	0,4	0,8
ПДК [19]	10,0		ПДК [19]	10,0	
PB					
25,0 – фон	0,5	1,2	20,0 – фон	0,6	1,0
33,1	0,5	1,0	28,2	0,8	1,3
42,0	0,7	2,2	32,0	0,6	1,4
60,0	1,7	2,7	53,0	2,3	3,3
78,2	2,1	3,8	71,1	2,6	4,3
127,0	3,9	4,7	119,0	3,9	5,8
НСР ₀₅	0,3	1,0	НСР ₀₅	0,4	0,3
ПДК [19]	0,5		ПДК [19]	0,5	

Содержание тяжелых металлов в зеленой массе и зерне люпина при моноэлементном загрязнении дерново-подзолистых супесчаных и суглинистых почв, мг/кг

Валовое содержание элемента в почве, мг/кг	Супесчаная почва		Легкосуглинистая почва	
	зеленая масса	зерно	зеленая масса	зерно
Zn				
20,2/33,1* – фон	7,0	26,1	7,9	27,4
55	22,9	38,5	18,9	32,4
110	39,4	46,3	36,3	41,8
НСП ₀₅	6,6	9,3	5,3	5,6
МДУ [20]	10,0	50,0	10,0	50,0
Cu				
5,9/7,3 – фон	1,1	3,0	1,6	3,8
33	3,2	6,8	2,6	6,1
66	4,7	7,8	4,0	7,2
165	7,4	9,7	5,7	8,9
НСП ₀₅	2,8	2,2	1,2	2,4
МДУ [20]	5,0	30,0	5,0	30,0
Pb				
9,9/14,3 – фон	0,2	0,5	0,2	0,4
32	0,5	1,4	0,4	0,9
64	1,2	2,5	0,9	2,0
160	2,2	2,7	1,7	2,2
НСП ₀₅	0,4	0,7	0,2	0,3
МДУ [20]	0,6	4,0	0,6	4,0

Примечание. Над чертой – содержание ТМ в фоновой дерново-подзолистой супесчаной почве, под чертой – содержание ТМ в фоновой дерново-подзолистой суглинистой почве.

Продовольственное зерно ячменя с допустимым содержанием меди и цинка можно получить при более высокой степени загрязнения черноземов, чем каштановой и дерново-подзолистой почв.

Накопление ТМ в зеленой массе и зерне кормовой культуры люпина узколистного изучали в условиях Беларуси на дерново-подзолистой супесчаной и легкосуглинистой почвах (табл. 4). На почвах с фоновым содержанием Zn, Cu и Pb концентрация их в зеленой массе люпина не превышала действующих в Республике Беларусь ветеринарно-санитарных нормативов и составляла соответственно Zn – 7,0 и 7,9 мг/кг, Cu – 1,1 и 1,6 мг/кг и Pb – 0,2 мг/кг.

При фоновом содержании Zn в почве содержание его в зерне люпина было в 3,5–3,7 раза выше, чем в зеленой массе, и составляло 26,1–27,4 мг/кг, Cu и Pb – в 2,0–2,7 раза выше и составляло соответственно 3,0–3,8 мг/кг и 0,5–0,4 мг/кг.

2. Плодородие почв и применение удобрений

С увеличением уровня загрязнения дерново-подзолистой почвы цинком от 55 до 110 мг/кг, медью от 33 до 165 мг/кг и свинцом от 32 до 160 мг/кг содержание металлов в зеленой массе люпина превысило максимально допустимые уровни, которые составляют соответственно 10,0; 5,0 и 0,6 мг/кг.

Содержание цинка в зеленой массе люпина превысило МДУ в 1,9–3,9 раза при валовом содержании элемента в дерново-подзолистых почвах 55–110 мг/кг или содержании обменных форм в супесчаной почве 19,5–53,0 мг/кг, в суглинистой – 16,1–36,0 мг/кг.

При загрязнении почв медью на уровне 165 мг/кг накопление ее в зеленой массе люпина превышает МДУ в 1,1–1,5 раза.

Содержание свинца в зеленой массе люпина, превышающее МДУ в 1,5–3,7 раза, установлено при уровнях загрязнения дерново-подзолистых почв свинцом 64–160 мг/кг или при содержании обменных форм элемента в супесчаной почве 27,3–77,4 мг/кг, в суглинистой – 20,9–69,5 мг/кг.

Таким образом, накопление ТМ выше допустимого уровня отмечено только в зеленой массе люпина, в зерне накопление ТМ выше установленных нормативов не наблюдалось.

На основании полученных результатов установлены корреляционные зависимости между содержанием ТМ в растениях и в почве. Наиболее тесная связь отмечается между содержанием металлов в растениеводческой продукции и содержанием в почве их подвижных форм (табл. 5).

Выявлена тесная связь между содержанием тяжелых металлов в зеленой массе и зерне люпина и содержанием в дерново-подзолистой почве как валовых ($r = 0,82–0,97$), так и подвижных ($r = 0,85–0,99$) форм ТМ. Очевидно, это обусловлено высокой степенью подвижности ТМ (48–95 %) в загрязненных дерново-подзолистых почвах. Сходная закономерность выявлена между содержанием ТМ в зерне и соломе ячменя и содержанием их в черноземе и каштановой почве.

Таблица 5

Корреляционные зависимости между содержанием ТМ в растениях и почве

Элементы	Почвы			
	чернозем обыкновенный, ячмень	каштановая почва, ячмень	дерново-подзолистая почва, люпин	
			суглинистая	супесчаная
$Zn_{\text{зерно ячмень}} \rightarrow Zn_{\text{почва, вал}}$	$r = 0,51$	$r = 0,54$		
$Zn_{\text{зерно ячмень}} \rightarrow Zn_{\text{почва, HCl}}$	$r = 0,93$	$r = 0,92$		
$Zn_{\text{солома ячмень}} \rightarrow Zn_{\text{почва, вал}}$	$r = 0,54$	$r = 0,64$		
$Zn_{\text{солома ячмень}} \rightarrow Zn_{\text{почва, HCl}}$	$r = 0,96$	$r = 0,95$		
$Zn_{\text{зерно люпин}} \rightarrow Zn_{\text{почва, вал}}$			$r = 0,93$	$r = 0,87$
$Zn_{\text{зерно люпин}} \rightarrow Zn_{\text{почва, HCl}}$			$r = 0,95$	$r = 0,89$
$Zn_{\text{зел. масса люпин}} \rightarrow Zn_{\text{почва, вал}}$			$r = 0,95$	$r = 0,94$

Элементы	Почвы			
	чернозем обыкновенный, ячмень	каштановая почва, ячмень	дерново-подзолистая почва, люпин	
			суглинистая	супесчаная
Zn _{зел. масса люпин} → Zn _{почва HCl}			r = 0,97	r = 0,97
Cu _{зерно ячмень} → Cu _{почва, вал}	r = 0,58	r = 0,62		
Cu _{зерно ячмень} → Cu _{почва, HCl}	r = 0,99	r = 0,92		
Cu _{солома ячмень} → Cu _{почва, вал}	r = 0,55	r = 0,48		
Cu _{солома ячмень} → Cu _{почва, HCl}	r = 0,99	r = 0,93		
Cu _{зерно люпин} → Cu _{почва, вал}			r = 0,85	r = 0,82
Cu _{зерно люпин} → Cu _{почва, HCl}			r = 0,86	r = 0,85
Cu _{зел. масса люпин} → Cu _{почва, вал}			r = 0,92	r = 0,91
Cu _{зел. масса люпин} → Cu _{почва HCl}			r = 0,95	r = 0,93
Pb _{зерно ячмень} → Pb _{почва, вал}	r = 0,58	r = 0,54		
Pb _{зерно ячмень} → Pb _{почва, HCl}	r = 0,92	r = 0,82		
Pb _{солома ячмень} → Pb _{почва, вал}	r = 0,52	r = 0,52		
Pb _{солома ячмень} → Pb _{почва, HCl}	r = 0,83	r = 0,93		
Pb _{зерно люпин} → Pb _{почва, вал}			r = 0,82	r = 0,82
Pb _{зерно люпин} → Pb _{почва, HCl}			r = 0,86	r = 0,87
Pb _{зел. масса люпин} → Pb _{почва, вал}			r = 0,96	r = 0,97
Pb _{зел. масса люпин} → Pb _{почва HCl}			r = 0,99	r = 0,99

ВЫВОДЫ

1. Накопление тяжелых металлов в растениеводческой продукции определяется уровнем их содержания и подвижностью в почвах. Подвижность металлов, характеризуемая содержанием их подвижных и обменных форм, в загрязненных дерново-подзолистых супесчаных и легкосуглинистых почвах выше, чем в черноземе обыкновенном и каштановой почве. При загрязнении чернозема обыкновенного и каштановой почвы медью с 42,3 мг/кг до уровня ОДК доля подвижных форм (1M HCl) составила 7,3–24,2 %, обменных – 0,9–6,3 %. Доля подвижных форм цинка при повышении уровня загрязнения с 83,0 мг/кг до 1,7 ОДК увеличилась с 18,7 до 41,9 %, обменных – с 1,2 до 9,9 %. При повышении уровня загрязнения почв свинцом с 28,2 мг/кг (0,9 ПДК) до 4,0 ПДК доля подвижных форм возрастала с 8,8 до 27,5 %, доля обменных – с 1,4 до 9,1 %.

При загрязнении дерново-подзолистой почвы медью на уровне 1–5 ПДК, цинком – 1–2 ПДК и свинцом – 1–5 ПДК доля подвижных форм составила 67,9–82,6 %, 47,6–70,8 % и 55,3–95,5 %, обменных – 19,1–41,6 %, 29,3–48,2 % и 23,4–48,4 % соответственно.

2. Плодородие почв и применение удобрений

По содержанию подвижных форм металлы в загрязненных дерново-подзолистых почвах составили ряд – Pb > Cu > Zn, по содержанию обменных – Zn > Pb > Cu. В черноземе обыкновенном и каштановой почве по содержанию подвижных форм ТМ расположились в следующей последовательности – Zn > Cu > Pb, по содержанию обменных – Zn > Pb > Cu.

2. При загрязнении чернозема обыкновенного и каштановой почвы медью на уровне ПДК содержание элемента в зерне не превышало допустимых норм.

Превышение ПДК по цинку в зерне ячменя установлено при валовом его содержании в черноземе обыкновенном на уровне 140 мг/кг, в каштановой почве – 109 мг/кг.

Накопление свинца в зерне ячменя на уровне ПДК и выше установлено при фоновом содержании валового свинца в черноземе и каштановой почве. Очевидно, здесь имеет место несоответствие принятых в России нормативов по допустимому содержанию свинца в почвах (ПДК 32,0 мг/кг) и в растениях (ПДК 0,5 мг/кг), которые нуждаются в уточнении.

В дерново-подзолистых загрязненных почвах превышение МДУ по содержанию цинка в зеленой массе люпина установлено на уровне 55–110 мг/кг (1–2 ПДК), меди – 165 мг/кг (5 ПДК), свинца – 64–160 мг/кг (2–5 ПДК).

3. Установлена тесная корреляционная связь между содержанием ТМ в растениях люпина и содержанием их валовых ($r = 0,82–0,97$) и подвижных форм ($r = 0,85–0,99$) в дерново-подзолистой почве.

Между содержанием ТМ в растениях ячменя и содержанием их в черноземе обыкновенном и каштановой почве установлена корреляционная связь, более тесная – между содержанием ТМ в растениях и содержанием их подвижных форм ($r = 0,82–0,99$), чем валовых ($r = 0,48–0,64$).

При диагностике загрязнения чернозема обыкновенного и каштановой почвы Zn, Cu и Pb необходимо в первую очередь учитывать содержание в почве их подвижных форм (1М НСІ).

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (Б11БРУ–007) и РФФИ, Министерства образования и науки Российской Федерации № 553.49.2011, Соглашение № 14.А18.21.0641.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проблемы деградации и восстановления продуктивности земель сельскохозяйственного назначения в России / Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Российская академия сельскохозяйственных наук. – М., 2008. – 68 с.
2. Головатый, С.Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С.Е. Головатый. – Минск: Ин-т почвоведения и агрохимии, 2002. – С. 25, 183–185.
3. Овчаренко, М.М. Подвижность тяжелых металлов в почве и доступность их растениям / М.М. Овчаренко // Аграрная наука. – 1996. – № 3. – С. 39–41.
4. Кузьмич, М.А. Влияние известкования на поступление тяжелых металлов в растения / М.А. Кузьмич, Г.А. Графская, Н.В. Хостанцева // Агрохимический вестник. – 2000. – № 5. – С. 7–9.
5. Трансформация соединений тяжелых металлов в почвах степной зоны / Т.М. Минкина [и др.] // Почвоведение. – 2008. – № 7. – С. 810–818.

6. Алексеев, Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю.В. Алексеев. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.
7. Закруткин, В.Е. Некоторые аспекты распределения меди и цинка в почвах и растениях агроландшафтов Ростовской области / В.Е. Закруткин, Д.Ю. Шишкина // Тяжелые металлы в окружающей среде: материалы междунар. симпозиума. – Пущино, 1997. – С. 101–109.
8. Закруткин, В.Е. Некоторые аспекты распределения свинца в почвах и растениях агроландшафтов Ростовской области / В.Е. Закруткин, Р.П. Шкафенко // Тяжелые металлы в окружающей среде: материалы междунар. симпозиума. – Пущино, 1997. – С. 110–117.
9. Крупномасштабное агрохимическое и радиологическое обследование почв сельскохозяйственных земель Республики Беларусь: метод. указания / под общ. ред. И.М. Богдевича. – Минск, 2006. – 64 с.
10. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы 2.1.7.12–1–2004 (ГН 2.1.7.12–1–2004). – Минск, 2004. – 29 с.
11. Предельно допустимые концентрации подвижных форм цинка, хрома, кадмия в почвах (землях) различных функциональных зон населенных пунктов, промышленности, транспорта, связи, энергетики, обороны и иного назначения: постановление Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 06 нояб. 2008 г., № 187.
12. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов: приложение к постановлению Министерства здравоохранения Респ. Беларусь, 19 нояб. 2009 г., № 125.
13. Практикум по агрохимии / под ред. В.Г. Минеева. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 304 с.
14. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве (валовое содержание): зарегистрированы в Министерстве юстиции Российской Федерации, 7 февр. 2006 г., № 7456.
15. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства / А.В. Кузнецов [и др.]; редкол.: А.М. Артюшин [и др.]. – 2-е изд., перер. и доп. – М.: ЦИНАО, 1992. – 53 с.
16. Накопление тяжелых металлов растениями ячменя на черноземе и каштановой почве / Т.М. Минкина [и др.] // Агрохимия. – 2009. – № 10. – С. 53–63.
17. Минкина, Т.М. Качество зерна пивоваренного ячменя при техногенном загрязнении чернозема обыкновенного / Т.М. Минкина, В.С. Крыщенко, С.В. Федосеенко // Научная мысль Кавказа. – 2003. – Приложение. Вып. 2. – С. 119–123.
18. Рекомендации по допустимому содержанию цинка и меди в почве при возделывании зерновых культур и многолетних трав / С.Е. Головатый [и др.] // Ин-т почвоведения и агрохимии. – Минск, 2006. – 43 с.
19. Медико-биологические требования и санитарные нормы качества продовольственного сырья и пищевых продуктов. – М., 1990. – 54 с.

2. Плодородие почв и применение удобрений

20. Допустимый уровень содержания некоторых химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных: ветеринарно-санитарный норматив по безопасности кормов и кормовых добавок: постановление Минсельхозпрода Респ. Беларусь, 28 апр. 2008 г., № 48. – Минск, 2008. – 8 с.

ACCUMULATION OF ZINK, COPPER AND LEAD BARLEY AND LUPINE PLANTS AT DIFFERENT SOIL POLLUTION LEVELS WITH THESE ELEMENTS

**N.K. Lukashenko, S.E. Golovaty, Z.S. Kovalevitch, T.M. Minkina,
G.V. Motuzova, S.S. Mandzhieva, V.V. Chaplugin**

Summary

Results of the joint researches executed in Belarus and Russia on studying of influence of pollution of the cespitose and podsolic sandy and loamy soil, the chernozem ordinary and the chestnut soil by heavy metals on accumulation of these elements in barley and lupine plants are stated in article. Various degree of mobility of heavy metals in the cespitose and podsolic soil, the chernozem and the chestnut soil is established. Accumulation of heavy metals in green mass and grain of a lupine and grain and straw barley is shown at different levels of soil pollution by them. Correlation dependences between heavy metals content in plants and the content of gross and mobile forms of heavy metals in soils are presented.

Поступила 02.04.13

УДК 631.8:631.81.095.337:633.432

ВЛИЯНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ С МИКРОЭЛЕМЕНТАМИ НА УРОЖАЙНОСТЬ И КАЧЕСТВО КОРНЕПЛОДОВ МОРКОВИ РАЗЛИЧНЫХ СРОКОВ УБОРКИ

Г.В. Пироговская, Д.Г. Мысливец
Институт почвоведения и агрохимии, г. Минск, Беларусь

ВВЕДЕНИЕ

Производство овощной продукции в Республике Беларусь не полностью соответствует растущим потребностям населения, поэтому на современном этапе его развития поставлена задача увеличения продукции овощных культур. Природные условия позволяют удовлетворить потребность страны в продукции основных овощных культур, в том числе и моркови, за счет собственного производства.