



УДК (631.8:633.174):631.95

А.В. Синдирева

## ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ (Cd, Ni, Zn, Cu, Pb) НА ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЮЖНОЙ ЛЕСОСТЕПИ ОМСКОЙ ОБЛАСТИ

**Ключевые слова:** микроэлементы, столовая свекла, морковь, рапс яровой, Омская область, экологическая оценка.

### Введение

Формирование урожая, качество растениеводческой продукции зависят от химического состава растений. Поэтому крайне важно исследование влияния микроэлементов на элементный состав растений. С экологической позиции интерес представляет исследование влияния на химический состав растений тех элементов, поступление которых в почву возросло в результате антропогенной деятельности, в частности, тяжелых металлов.

По силе своего действия факторы, влияющие на поступление микроэлементов в растение, располагаются в следующем порядке: сельскохозяйственная культура, концентрация элементов в почве, содержание в ней органического вещества, емкость поглощения катионов и др. [1, 2].

Известно, что повышенное содержание микроэлементов в почве, как и их недостаток, в целом нежелательны для растений. Однако отдельные виды растений накапливают определенное количество микроэлементов без видимых признаков угнетения, другие растения такой способностью не обладают. Это связано с геохимической ситуацией среды, в которой формировался определенный вид растения.

### Объекты и методы исследования

В процессе исследований установлено влияние кадмия, никеля, цинка на химический состав столовой свеклы, моркови и кормовой культуры – рапса ярового.

Микроэлементы определяли в ФГУ ЦАС «Омский» атомно-абсорбционным методом. Опыты со столовой свеклой, морковью, рапсом яровым заложены на лугово-черноземной почве южной лесостепи Омской области в условиях моделирования антропогенного поступления кадмия, никеля, цинка в дозах 7, 22 и 36 кг/га под столовую свеклу и морковь, а также в дозах, соответствующих 0,5-2 ПДК этих элементов в почве под рапс яровой. Фоном (Ф) на вариантах с

морковью являлось внесение фосфора в дозе 90 кг/га, столовой свеклой – азота в дозе 45, фосфора в дозе 90 кг/га. Исследования проведены в 1996-2008 гг.

### Экспериментальная часть

Исследования, проведенные со столовой свеклой, морковью показали, что поглощение, распределение и накопление тяжелых металлов в растениях зависели от культуры, вносимого в почву элемента, метеорологических условий года. Содержание тяжелых металлов также во многом определяется фазой развития растений. В таблице 1 представлены средние многолетние данные о содержании тяжелых металлов в столовой свекле и моркови на период уборки.

Известно, что кадмий обладает высокой скоростью поступления в растения и быстрым передвижением к органам запаса ассимилянтов [3]. Исследования показали, что внесение кадмия в среднем способствовало увеличению содержания этого металла в свекле по сравнению с фоном в течение всего периода вегетации. Наибольшее увеличение содержания этого элемента в растении наблюдается в засушливые годы. Очевидно, это объясняется меньшей сопротивляемостью растения избытку тяжелых металлов в неблагоприятных для него метеорологических условиях. К периоду биологического созревания растений содержание кадмия в корнеплодах свеклы, выращенной на варианте с внесением этого элемента в дозе 7 кг/га, в среднем за годы исследований было выше на 27,7% по сравнению с растениями фонового варианта и составляло 0,23 мг/кг. К периоду уборки моркови содержание кадмия снижается в корнеплодах и увеличивается в ботве в среднем за годы исследований на 65,8%, что составляет 0,68 мг/кг. Очевидно, морковь обладает избирательной способностью и защитными механизмами, что позволяет ей в меньшей степени пропускать кадмий в корнеплоды и накапливать их в листьях [4].

Влияние кадмия, никеля, цинка на накопление микроэлементов в столовой свекле и моркови, мг/кг сухого вещества

Вариант	Кадмий	Никель	Цинк	Медь	Свинец
Столовая морковь					
Корнеплод					
Фон (Ф)	0,15	0,84	19,7	3,18	1,24
Ф+Сd <sub>7</sub>	0,16/+6,7	0,70/-16,6	17,6/-10,7	3,00/-5,66	1,07/-13,7
Ф+Ni <sub>22</sub>	0,11/-26,6	1,52/+80,9	9,94/-49,9	3,10/-2,50	1,20/-3,20
Ф+Zn <sub>36</sub>	0,24/+60,0	1,00/+19,0	22,5/+14,2	3,68/+15,7	1,33/+7,26
Надземная масса					
Фон (Ф)	0,41	3,20	20,9	3,87	3,23
Ф+Сd <sub>7</sub>	0,68/+65,8	1,76/-45,0	19,9/-7,78	4,64/+19,9	4,07/+26,0
Ф+Ni <sub>22</sub>	0,40/-2,44	2,29/-28,4	16,9/-4,00	3,27/-15,5	3,60/+11,4
Ф+Zn <sub>36</sub>	0,39/-4,88	1,99/-37,8	17,3/-17,2	4,42/+55,0	3,62/+12,1
Столовая свекла					
Корнеплод					
Фон (Ф)	0,18	0,62	12,6	5,49	2,23
Ф+Сd <sub>7</sub>	0,23/+27,7	0,53/-14,5	15,6/+23,8	5,40/-1,60	2,01/-9,87
Ф+Ni <sub>22</sub>	0,31/+72,2	1,06/+70,9	17,3/+37,9	5,57/+1,46	2,63/+17,9
Ф+Zn <sub>36</sub>	0,52/+188,9	0,78/+25,8	17,4/+38,1	6,10/+11,1	2,26/+1,35
Надземная масса					
Фон (Ф)	0,70	3,10	20,8	6,90	2,66
Ф+Сd <sub>7</sub>	0,56/-20,0	1,60/-48,4	14,9/-28,4	3,23/-53,2	2,93/+10,2
Ф+Ni <sub>22</sub>	0,60/-14,3	3,20/+3,22	26,9/+29,3	6,87/-0,40	3,77/+41,7
Ф+Zn <sub>36</sub>	1,26/+80,0	2,70/-12,9	22,9/+10,1	5,84/-15,4	4,27/+60,5

\* В числителе – содержание микроэлемента, мг/кг сухого вещества; в знаменателе – изменения по сравнению с фоном, %.

Применение никеля под столовую свеклу способствовало увеличению содержания этого элемента в корнеплоде в течение всего периода вегетации. Наибольшее увеличение его содержания в корнеплодах столовой свеклы, выращенной с внесением Ni в дозе 22 кг/га, наблюдалось к периоду уборки и составляло 1,1 мг/кг, что выше уровня фона на 70%. К периоду уборки моркови значительное увеличение никеля наблюдается в корнеплодах при применении этого элемента только в засушливые годы.

Содержание цинка в растениях в течение всего периода вегетации на варианте с внесением этого элемента в почву в дозе 36 кг/га зависело от метеорологических условий года. Наиболее значительно содержание Zn увеличивается по сравнению с фоном в корнеплодах и ботве свеклы к периоду уборки. На вариантах с морковью к периоду уборки содержание цинка в корнеплодах выше по сравнению с фоном в среднем на 14,4%. Неоднозначно накопление цинка в ботве: в умеренно влажные годы отмечено его снижение, а в условиях засушливого года отмечалось увеличение микроэлемента на 23% по сравнению с растениями фонового варианта.

В целом исследованиями установлено, что содержание тяжелых металлов в растениях всех вариантов, как правило, было

наибольшим в начальные периоды развития столовой свеклы и моркови. К периоду биологического созревания растений в целом содержание кадмия, никеля, цинка более низкое.

Это объясняется эффектом «разбавления», поскольку в более поздние фазы развития растений скорость накопления биомассы урожая превышает скорость поступления этих элементов в растения, в результате происходит расконцентрация элементов. Такая закономерность в накоплении тяжелых металлов растениями отмечена также в работах других авторов [1].

Таким образом, внесение кадмия, никеля, цинка в почву способствовало в целом изменению химического состава растений свеклы и моркови. В зависимости от метеорологических условий года, фазы роста и развития корнеплодов, а также содержания элементов в почве такие изменения наблюдались в сторону увеличения или снижения содержания микроэлементов. Исследования показали, что столовая свекла по сравнению с морковью поглощает из поступивших в почву тяжелых металлов больше цинка в 1,6, никеля – в 4 и кадмия – в 3,5 раза.

В таблице 2 представлено накопление микроэлементов в рапсе при основном внесении Cd, Ni, Zn на период физиологической зрелости растения.

Влияние Cd, Ni, Zn на накопление микроэлементов в рапсе яровом (в среднем за 2004-2006 гг.)

Вариант	Кадмий	Никель	Цинк	Медь	Свинец
Контроль	0,59	4,42	32,77	3,05	3,85
Cd 0,5ПДК (3,5 кг/га)	0,73 /+27,3*	5,11/+15,6	41,41/+26,4	5,25/+72,1	3,93/+2,1
Cd 1ПДК (7,0 кг/га)	0,91/+54,2	6,16/+39,4	65,21/+99,0	5,3/+73,7	5,98/+55,3
Cd 2ПДК (14,3 кг/га)	0,98/+66,1	5,02/+13,6	66,19/+102,0	5,19/+70,2	4,93/+28,1
Ni 0,5ПДК (3,6 кг/га)	0,66/+11,8	5,09/+15,2	44,12/+34,6	5,85/+91,8	5,52/+43,4
Ni 1ПДК (8,4 кг/га)	0,76/+28,8	5,31/+20,4	44,03/+31,4	4,81/+57,7	5,4/+40,3
Ni 2ПДК (18,0 кг/га)	0,75/+27,1	5,63/+27,3	41,90/+27,9	5,64/+84,9	5,03/+30,6
Zn 0,5ПДК (26,2 кг/га)	0,57/-3,4	4,48/+1,4	46,24/+41,1	4,59/+50,5	3,49/-9,4
Zn 1ПДК (53,7 кг/га)	0,54/-8,5	6,05/+36,8	50,97/+55,6	5,53/+81,3	6,68/+73,5
Zn 2ПДК (109 кг/га)	0,47/-20,3	3,81/+13,8	39,18/+19,6	4,76/+56,1	5,39/+40,0

Исследования, проведенные с рапсом яровым, показали, что помимо вышеперечисленных факторов, формирование химического состава зависит не только от биохимических свойств, но и дозы вносимого элемента. Опыты, проведенные в условиях, граничащих с загрязнением металлами почвы (дозы 0,5-2 ПДК), особенно четко показывают, что поступление и накопление элемента во многом зависят от особенностей культуры, наличия защитных механизмов растения и потребности его в определенном химическом элементе. Несмотря на то, что практически во всех случаях установлена прямая тесная математическая зависимость между дозой вносимого элемента и его содержанием в зеленой массе растений, полученные в уравнениях коэффициенты регрессии свидетельствуют о различном характере поступления кадмия, никеля, цинка.

В процессе исследований установлена зависимость между дозами применения кадмия и содержанием микроэлемента в рапсе яровом на период физиологической зрелости растений, которая выражается уравнением:

$$y = 0,027 x + 0,63, r = 0,94,$$

где  $y$  – содержание кадмия в растении, мг/кг;

$x$  – доза поступления кадмия, кг/га.

Накопление никеля при корневом его поступлении в рапс яровой происходило менее интенсивно, нежели кадмия. Согласно данным таблицы 2 внесение наибольшей дозы никеля 2 ПДК (17,9 кг/га) приводит к его увеличению в среднем за годы исследования на 27,3%, что говорит о незначительных темпах накопления элемента.

Особый интерес представляет влияние цинка на содержание этого микроэлемента в зеленой массе рапса ярового. Очевидно, при высоких дозах внесения цинка

(свыше 53,8 кг/га) в лугово-черноземную почву срабатывают защитные механизмы растения, препятствующие накоплению микроэлемента.

### Результаты и их обсуждение

Таким образом, проведенные многолетние исследования в условиях моделирования антропогенного поступления кадмия, никеля, цинка под столовую свеклу, морковь, рапс яровой позволили выявить следующие основные закономерности:

- дополнительное поступление кадмия, никеля, цинка в почву в большинстве случаев способствует увеличению содержания этих элементов как в органах запасающих ассимилянтов, так и в генеративных органах растений;

- поглощение кадмия, никеля, цинка убывает в ряду: рапс яровой > столовая свекла > морковь;

- в начальные периоды развития растений содержание микроэлементов выше, нежели к периоду физиологической зрелости, что объясняется эффектом «расконцентрации»;

- в засушливый год темпы накопления микроэлементов в органах растений выше, в умеренно влажный – ниже, что можно объяснить лучшей работой защитных механизмов растения в более благоприятных для него условиях;

- по абсолютному содержанию в растениях изучаемые микроэлементы можно расположить в следующей убывающей последовательности: цинк > никель > кадмий, что связано с их химическими свойствами и биологической ролью; в то же время по темпам накопления кадмий превосходит никель и цинк.

Многолетние полевые исследования позволили рассчитать нормативные коэффициенты «b» интенсивности действия поступивших в лугово-черноземную почву кадмия, никеля, цинка на изменение содер-

жания этих элементов в корнеплодах столовой свеклы, моркови, а также в зеленой массе рапса ярового (табл. 3).

Таблица 3

*Коэффициенты интенсивности действия «b» кадмия, никеля, цинка на химический состав растений, мг/кг сухого вещества*

Культура	Коэффициент интенсивности действия		
	Cd	Ni	Zn
Корнеплоды			
Столовая свекла	0,0067	0,12	0,13
Столовая морковь	0,0019	0,03	0,079
Надземная масса			
Рапс яровой	0,027	0,06	0,34

Полученные нормативы способствуют прогнозу элементного состава растений при антропогенном поступлении Cd, Ni, Zn в почву по формуле:

$$J_{\text{мг/кг}} = D \times b,$$

где J – содержание микроэлементов в растениях, мг/кг сухого вещества;

D – доза поступившего элемента в почву, кг/га;

b – коэффициент интенсивности действия единицы поступившего элемента в почву, мг/кг.

Установленные количественные значения коэффициента интенсивности действия «b» используются в практической агрохимии и экологии с целью расчета необходимой дозы применяемого микроэлемента, оценки его накопления в сельскохозяйственных культурах, а также для оценки химического состава и качества растениеводческой продукции.

Проведенные нами исследования показали, что при поступлении кадмия, никеля, цинка в растения в период их активного роста и развития проявляется определенная зависимость между ними и другими элементами, которая имеет различную степень связи. Это объясняется неодинаковой потребностью растений в химических элементах в определенные фазы роста и развития.

На основе установленных математических зависимостей между отдельными параметрами ионов при поступлении в растения свеклы и моркови составлены схемы взаимоотношения между Cd-Ni-Zn-Cu-Pb с учетом развития растительного организма (табл. 4).

В условиях моделирования антропогенного поступления кадмия, никеля, цинка в дозах от 0,5 до 2 ПДК меняется характер взаимного влияния микроэлементов. При

этом установлены зависимости, позволяющие прогнозировать химический состав рапса ярового на период его физиологической зрелости в условиях дополнительного поступления кадмия, никеля, цинка (табл. 5).

Таблица 4

*Взаимоотношение между ионами тяжелых металлов при поступлении в корнеплоды к периоду физиологической зрелости растений*

Столовая свекла	Морковь
$Ni = 0,43 \cdot Cd + 0,56, r = 0,94$	$Ni = 3,5 \cdot Cd + 0,17, r = 0,97$
$Zn = 9,44 \cdot Cd - 123,3Cd^2 + 0,013$	$Zn = 107,3 \cdot Cd + 2,04, r = 0,87$
$Cu = 2,06 \cdot Cd + 4,99, r = 0,99$	$Cu = 7,4 - 28,5 \cdot Cd, r = -0,97$
$Pb = 14,3 \cdot Cd - 19 \cdot Cd^2 + 0,014$	$Pb = 4,95 - 23,5 \cdot Cd, r = -0,99$
$Zn = 714,1 \cdot Ni - 498 \cdot Ni^2 - 238,6$	$Zn = 106,1 \cdot Ni - 51,8 \cdot Ni^2 - 32,3$
$Cu = 0,92 \cdot Ni + 5,09, r = 0,69$	$Cu = 29,7 \cdot Ni - 13 \cdot Ni^2 - 12,2$
$Pb = 1,46 \cdot Ni - 0,64 \cdot Ni^2 + 1,67$	$Pb = 12,6 \cdot Ni - 5,5 \cdot Ni^2 - 5,02$
$Cu = 1,27 \cdot Zn - 0,024 \cdot Zn^2 - 3,94$	$Cu = 4,24 - 0,093 \cdot Zn, r = -0,86$
$Pb = 0,082 \cdot Zn - 1,13, r = 0,96$	$Pb = 2,5 - 0,086 \cdot Zn, r = -0,98$
$Pb = 69,4 \cdot Cu - 5,99 \cdot Cu^2 - 197,9$	$Pb = 0,597 \cdot Cu - 0,53, r = 0,97$

Таблица 5

*Взаимодействие микроэлементов в рапсе при внесении Cd, Ni, Zn в почву*

Уравнение корреляции, регрессии	r, η
Антропогенное поступление кадмия	
$Zn = -479,76Ni^2 + 4584,6Ni - 10858$	η = 0,99
$Cu = -1,89Ni^2 + 21,29Ni - 54,1$	η = 0,99
$Pb = 1,18Ni - 1,24$	r = 0,98
$Cu = -0,008Zn^2 + 0,82Zn - 15,7$	η = 0,99
$Pb = 0,001Zn^2 - 0,051Zn + 4,37$	η = 0,89
$Pb = 0,75Cu + 1,55$	r = 0,89
Антропогенное поступление никеля	
$Zn = -1167,6Cd^2 + 1621Zn - 517,54$	η = 0,99
$Cu = -322,22Cd^2 + 442,78Cd - 146,02$	η = 0,99
$Pb = -168,13Cd^2 + 234,43Cd - 75,947$	η = 0,99
$Cu = 0,26Zn - 5,35$	r = 0,99
$Pb = 0,14Zn - 0,78$	r = 0,99
$Pb = 0,63Cu + 2,06$	r = 0,94
Антропогенное поступление цинка	
$Ni = -487,17Cd^2 + 518,73Cd - 132,34$	η = 0,89
$Cu = -518,7Cd^2 + 536,31Cd - 132,74$	η = 0,99
$Pb = -1247,6Cd^2 + 1278,5Cd - 319,92$	η = 0,99
$Cu = 1,09Ni - 1,07$	r = 0,81

Установлено, что при оптимальном соотношении элементов в растениях эффект их взаимодействия возрастает в положительном направлении. Наблюдается явление синергизма. При дальнейшем переходе содержания элемента через оптималь-

ный уровень до высоких дозировок эффект взаимодействия элементов в растениях изменяется, принимая часто противоположные направления. Наблюдается явление антагонизма между ионами [5, 6].

#### Заключение

Полученные в результате многолетних исследований математические закономерности взаимоотношений микроэлементов при поступлении их в растения позволяют нормировать и прогнозировать элементный состав овощных и кормовых культур и, как следствие, их продуктивность и качество в условиях антропогенного поступления Cd, Ni, Zn.

#### Библиографический список

1. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва – растение / В.Б. Ильин. – Новосибирск: Наука, 1991. – 149 с.
2. Каббата-Пендиас А. Микроэлементы в почвах и растениях / А. Каббата-Пендиас, Х. Пендиас. – М.: Мир, 1989. – 440 с.

3. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях / Ю.В. Алексеев. – М.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.

4. Ермохин Ю.И. Агроэкологическая оценка действия кадмии, никеля и цинка в системе почва – растение – животное / Ю.И. Ермохин, А.В. Синдирева, Н.К. Трубина. – Омск: ОмГАУ, 2002. – 117 с.

5. Ермохин Ю.И. Антагонизм и синергизм ионов при поступлении их в растения козлятника восточного / Ю.И. Ермохин // Экологическое состояние почв и растений Западной Сибири и проблемы их качества: сб. науч. тр. – Омск: ОмГАУ, 1997. – С. 6-13.

6. Ермохин Ю.И. Концепция единства почвы и растения при разработке системы применения удобрений / Ю.И. Ермохин // Комплексная диагностика потребности сельскохозяйственных культур в удобрениях: сб. науч. тр. – Омск: ОмСХИ, 1989. – С. 17-23.

