

# СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПРОПАШНЫХ КУЛЬТУРАХ НА ДЕРНОВО-КАРБОНАТНОЙ ПОЧВЕ С РАЗНЫМИ УРОВНЯМИ УДОБРЕННОСТИ

Е.С. Волкова, Псковский НИИСХ

Изложены результаты многолетних исследований по влиянию химического загрязнения дерново-карбонатной почвы тяжелыми металлами на урожай пропашных культур при использовании различных систем удобрения в условиях Псковской области. Установлено влияние загрязнения на гигиеническое качество продукции. Рассчитан биологический вынос металлов растениями.

**Ключевые слова:** пропашные культуры, удобрения, урожайность, тяжёлые металлы, дерново-карбонатная почва.

В Псковской области на поверхность почвы ежегодно поступает от 6,3 до 125 г/га свинца и от 0,63 до 1,44 г/га кадмия. Наиболее неблагоприятные в этом отношении Псковский, Дновский и Печорский районы [1]. Вызывает озабоченность также накопление на станции очистки воды ОСВ с высоким содержанием тяжелых металлов (ТМ), внесение которых без предварительной обработки неизбежно приведет к загрязнению почв области.

В литературе имеются результаты исследований с ТМ, проведенных на дерново-подзолистых почвах, типичных для Нечерноземья. Исследования с ТМ на дерново-карбонатных почвах в условиях промывного водного режима не проводили. Известно, что ТМ в условиях нейтральной и близкой к нейтральной реакции среды хорошо сорбируются почвами, образуя труднорастворимые соединения [2-7]. В то же время, содержание металлов в растениях определяется присутствием в почве их легкодоступных соединений. Объекты исследований – пропашные культуры (картофель, свёкла столовая и кормовая). Они являются культурами интенсивного типа питания, требующими высокого плодородия почвы. Внесение

высоких доз удобрений под эти культуры в условиях загрязнения может приводить к накоплению ТМ в растениях.

Цель исследований – изучить последствия загрязнения почвы ТМ при использовании различных систем удобрения под пропашные культуры для установления влияния на урожай и гигиеническое качество возделываемых культур.

**Методика.** Работа по изучению влияния различных систем удобрения на продуктивность и гигиеническое качество картофеля и кормовой свёклы проводилась в 2003-2007 гг. на базе мелкоделяночного полевого опыта, заложенного в 1995 г. на дерново-карбонатной почве в Печорском районе Псковской области. Схема опыта и методика исследований приведены в статье Т.В. Шайковой и Е.С. Волковой (ж. «Плодородие», №4, 2014 г.).

Подготовку образцов минеральных удобрений для анализа проводили методом мокрого озоления в  $\text{HNO}_3$ , навоза – сухого озоления после высушивания. Содержание меди, цинка, свинца и кадмия в сухом веществе навоза составило, соответственно, 12,1; 97; 7,95 и 1,22 мг/кг. В азотосеке: 25,4; 9,4; 2,2 и 0,04 мг/кг соответственно. Количество металлов, поступившее с удобрениями, было несущественным.

В опыте использовали картофель сорта Петербургский и сорт кормовой свёклы Эккендорфская жёлтая. Технологии выращивания культур – общепринятые для Псковской области. Опыт проводили в 3- и 4-кратной повторности. Полученные результаты обработаны методом дисперсионного анализа по Б.А. Доспехову с помощью Excel.

Количество валовых, кислоторастворимых и подвижных соединений в незагрязненной почве соответствовало их фоновым значениям в данной геохимической провинции (табл. 1).

1. Содержание валовых, кислоторастворимых и подвижных форм ТМ в естественной дерново-карбонатной почве, мг/кг

Слой почвы, см	5 н. $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$				1 н. $\text{HNO}_3$				ААБ с pH 4,8			
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd	Cu	Zn	Pb	Cd
0-20	5,24	22,4	7,24	0,276	2,9	4,8	5,5	0,064	0,15	0,64	0,52	0,04
20-30	5,07	16,3	6,25	0,198	2,4	4,2	4,7	0,065	0,34	0,15	0,37	0,03
30-40	4,78	16,9	5,56	0,184	1,8	3,4	3,6	0,038	0,40	0,24	0,27	0,04
40-50	4,95	18,0	9,7	0,208	1,6	3,4	6,8	0,046	0,47	0,40	0,29	0,02
ОДК*	132	220	130	2,0	-	-	-	-	-	-	-	-
ПДК**	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	23,0	6,0	-

\*Ориентировочно допустимые концентрации валовых форм ТМ для суглинистых почв с pH > 5,5. \*\*Предельно допустимые концентрации подвижных форм ТМ в почвах.

2. Содержание подвижных соединений ТМ в почве (ф + ТМ), мг/кг

Год исследования	Cu	Zn	Pb	Cd
1995	240,1	363,8	54,6	5,27
1996	92,9	187,3	54,1	4,56
1997	69,5	213,3	32,9	3,87
1998	52,8	152,9	46,9	3,89
1999	24,6	84,6	23,9	2,24
2003	24,9	76,0	15,8	2,17
2004	17,6	56,3	10,3	1,39
2005	16,0	47,1	9,9	0,88
2006	14,8	68,3	15,5	2,1
ПДК	3,0	23,0	6,0	-
ОДК для почв с pH>5,5 (валовое содержание)	2,0			

Содержание подвижных соединений ТМ в загрязненной дерново-карбонатной почве приведено в таблице 2. В год загрязнения оно соответствовало очень сильному загрязне-

нию почвы медью, цинком и кадмием и сильному загрязнению почвы свинцом [9].

В дальнейшем, снижение содержания подвижных соединений ТМ происходило в результате: 1) закрепления почвенными компонентами; 2) вымывания в нижележащие горизонты; 3) выноса растениями. Уровень содержания ТМ в образцах почвы 2006 г. соответствовал среднему загрязнению почв исследуемыми металлами.

Один из основных показателей, представляющих интерес для агроэкологии при решении проблемы устойчивости агроценозов к загрязнению ТМ – урожайность сельскохозяйственной продукции. Установлено отрицательное влияние избыточного содержания ТМ в почве на урожайность исследуемых культур (табл. 3).

По отношению к чистому фону получены существенные различия между вариантами. За первые пять лет исследований агрономический ущерб от загрязнения составил 37,4, или в среднем за год 7,5 ц корм. ед. (КЕ) с 1 га. Применение наво-

за на протяжении данного периода было малоэффективно. В целом за 1995-1999 гг. недобор урожая в данном варианте составил 16,4 ц КЕ/га. Внесение повышенных доз минераль-

ных удобрений приводило к увеличению урожайности на третий год исследований. Ущерб в среднем за год составил 1,5 ц КЕ/га, т.е. был несущественным.

### 3. Урожайность исследуемых культур (1995-1999 гг.), ц/га

Вариант опыта	Картофель			Свёкла		Всего, ц КЕ/га	В среднем за год, ц КЕ/га	± к NPK, ц КЕ/га
	1995 г.	1996 г.	1997 г.	столовая 1998 г.	кормовая 1999 г.			
Контроль	113,0	116,3	72,3	91,0	145,0	128,2	25,6	-
Чистый фон –NPK	171,0	194,5	123,0	262,0	411,3	254,3	50,9	-
Загряз.фон– NPK+TM	159,7	142,0	110,0	217,0	366,9	216,9	43,4	-7,5
NPK+TM+навоз, 60 т/га	182,7	151,6	107,5	240,9	418,8	237,9	47,6	-3,3
2NPK+TM	161,0	171,0	115,0	260,2	444,0	246,8	49,4	-1,5
HCP <sub>05</sub>	-	17,4	11,2	30,0	37,2		3,2	

Данные по изучению последствий ТМ на урожай картофеля и кормовой свёклы представлены в таблице 4. Через девять лет после загрязнения почвы солями ТМ установлено фитотоксическое влияние на растения.

На контроле и в варианте NPK + TM урожай клубней картофеля в 2003 г. и кормовой свёклы в 2006 и 2007 гг. был статистически равный. ТМ нивелировали действие внесенных минеральных удобрений. Всего за 2003-2007 гг. недополучено 29,2 ц КЕ/га. Внесение навоза устраняло отрицательное влияние ТМ на урожайность на протяжении всего периода исследований, за исключением 2005 г., когда существенная

прибавка клубней картофеля была получена только при внесении навоза в дозе 90 т/га. В целом за данный период агрономическая эффективность внесения 30 т/га навоза составила 91,0 ц КЕ/га; 60 т/га – 131,6 ц КЕ/га; 90 т/га – 143,5 ц КЕ/га, или в среднем за год – 12,3; 26,3 и 28,7 ц КЕ/га. Повышенные дозы NPK, внесенные под культуры в условиях загрязнения, были эффективны также на протяжении всего периода исследований, за исключением 2005 г., когда прибавка урожая находилась в пределах ошибки опыта. Агрономическая эффективность применения 2NPK составила за 2003-2007 гг. 97,8 ц КЕ/га, или в среднем за год 19,6 ц КЕ/га.

### 4. Урожайность исследуемых культур (2003-2007 гг.), ц/га

Варианты опыта	Картофель			Кормовая свёкла		Всего, ц КЕ/га	В среднем ц КЕ/га	± к NPK, ц КЕ/га
	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.			
Контроль	135	86	70	303,3	230,4	172,6	34,5	-
Чистый фон –NPK	154	148	99	455,2	357,4	250,3	50,1	-
Загрязненный фон– NPK+TM	151	142	116	419,2	195,5	221,1	44,2	-5,9
NPK+TM+навоз, 30 т/га	204	191	128	644,3	325,7	312,1	62,4	12,3
NPK+TM+навоз, 60 т/га	213	215	134	753,9	396,7	352,7	70,5	26,3
NPK+TM+навоз, 90 т/га	214	171	160	851,0	406,0	364,6	72,9	28,7
2NPK+TM	225	198	118	620,6	358,2	318,9	63,8	19,6
HCP <sub>05</sub>	17	33,1	27,7	117,6	43,7			

Пригодность к использованию пищевой продукции определяют предельно допустимые концентрации (ПДК), кормов – максимально допустимые уровни (МДУ) ТМ. Превышения ПДК и МДУ по содержанию меди в клубнях картофеля, растениях столовой и кормовой свёклы в 1995-1999 гг. не отмечено (табл. 5).

Превышение ПДК по содержанию цинка в клубнях картофеля установлено в год загрязнения при внесении 2NPK (12,3 мг/кг при ПДК 10,0 мг/кг). В корнеплодах столовой свёклы отмечено накопление металла до уровня 2/3 ПДК (10,0 мг/кг). В листьях и корнеплодах кормовой свёклы содержание данного металла не превышало МДУ.

Содержание свинца в клубнях картофеля не превышало ПДК (0,5 мг/кг), однако со временем содержание металла повысилось до ½ ПДК при внесении NPK и NPK + навоз. Содержание металла в корнеплодах столовой свёклы достигало 0,92 ПДК при использовании органоминеральной системы удобрения и 0,9 ПДК при внесении 2NPK. Это может свидетельствовать о некотором накоплении свинца в продукции. В листьях и корнеплодах кормовой свёклы содержание токсиканта было значительно ниже МДУ.

Кадмий – один из наиболее токсичных элементов. ПДК кадмия в овощах составляет 0,03 мг/кг сырой массы. В клубнях картофеля в год загрязнения установлено накопление металла до уровня 0,93 ПДК при внесении 2NPK; 0,9 ПДК при внесении NPK + навоз; 0,76 ПДК при внесении NPK. Превышение в 1,6 ПДК отмечено на третий год исследований при внесении NPK; в 1,76 ПДК при внесении NPK + навоз; в 1,3 ПДК при внесении 2NPK. В корнеплодах столовой свёклы содержание металла превысило ПДК более, чем в 2 раза; в листьях установлено превышение МДУ в среднем в 1,6 раза. Допустимое количество кадмия содержалось только в корнеплодах кормовой свёклы. Листья кормовой

свёклы накапливали кадмий выше уровня МДУ (0,3 мг/кг) при внесении NPK и 2NPK; 0,349 мг/кг при внесении NPK + навоз.

### 5. Содержание ТМ в продукции, мг/кг натурального вещества

Год	Фон + TM	Ф + TM+навоз, 60 т/га	2Ф + TM	ПДК, МДУ
<i>Медь</i>				
1995	1,6	1,1	1,4	5,0
1996	1,1	1,1	1,0	5,0
1997	1,0	1,0	0,8	5,0
1998	0,8/1,8	0,8/1,9	0,8/1,9	5,0/30,0
1999	1,0/1,4	1,0/1,3	0,8/1,2	30,0/30,0
<i>Цинк</i>				
1995	6,0	7,3	12,3	10,0
1996	4,2	4,4	4,5	10,0
1997	3,1	3,2	2,7	10,0
1998	6,3/17,4	7,1/18,7	7,3/20,1	10,0/100,0
1999	7,2/16,0	8,2/20,8	7,1/16,9	100,0/100,0
<i>Свинец</i>				
1995	0,10	0,11	0,10	0,5
1996	0,20	0,23	0,20	0,5
1997	0,25	0,26	0,22	0,5
1998	0,37/0,75	0,46/1,08	0,45/0,9	0,5/5,0
1999	0,30/0,53	0,31/0,61	0,27/0,56	5,0/5,0
<i>Кадмий</i>				
1995	0,023	0,027	0,028	0,03
1996	0,024	0,027	0,022	0,03
1997	0,048	0,053	0,041	0,03
1998	0,070/0,50	0,072/0,48	0,069/0,50	0,03/0,3
1999	0,051/0,366	0,064/0,349	0,050/0,389	0,3/0,3

Примечание. Содержание ТМ: в числителе в корнеплодах, в знаменателе в листьях свёклы (то же в табл. 6).

# 6. Содержание ТМ в продукции, мг/кг натурального вещества

Год	Ф+ТМ	Ф+ТМ+ навоз, 30 т/га	Ф+ТМ+ навоз, 60 т/га	Ф+ТМ+ навоз, 90 т/га	2Ф + ТМ	ПДК
<i>Медь</i>						
2003	2,8	3,2	3,8	3,3	3,0	5,0
2004	0,8	0,7	1,2	1,5	1,1	5,0
2005	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	5,0
Среднее	1,63	1,73	2,1	2,0	1,83	5,0
2006	1,3/1,7	1,1/1,5	1,3/1,5	1,4/1,8	1,2/2,5	30/30
<i>Цинк</i>						
2003	3,7	4,4	3,7	3,7	3,8	10,0
2004	2,1	1,8	2,3	2,3	2,0	10,0
2005	4,3	3,5	4,4	3,7	4,1	10,0
Среднее	3,37	3,23	3,47	3,23	3,3	10,0
2006	6,5/7,6	7,9/12,9	8,1/13,3	8,7/11,8	7,8/11,1	100,0
<i>Свинец</i>						
2003	0,33	0,36	0,33	0,36	0,30	0,5
2004	0,14	0,10	0,11	0,12	0,10	0,5
2005	0,22	0,20	0,20	0,20	0,20	0,5
Среднее	0,23	0,22	0,21	0,23	0,2	0,5
2006	0,10/0,17	0,11/0,26	0,11/0,2	0,14/0,20	0,11/0,25	5,0/5,0
<i>Кадмий</i>						
2003	0,031	0,029	0,024	0,035	0,030	0,03
2004	0,010	0,009	0,012	0,013	0,011	0,03
2005	0,018	0,033	0,033	0,022	0,034	0,03
Среднее	0,02	0,024	0,023	0,023	0,025	0,03
2006	0,015/ 0,045	0,038/ 0,136	0,024/0,083	0,019/0,144	0,013/ 0,206	0,3/ 0,3

# 7. Вынос меди, цинка, свинца и кадмия пропашными культурами (в среднем за 1995-1999 гг. и 2003-2006 гг.), г/га

Показатель	Контроль	НПК	НПК+ТМ	НПК+ТМ+ навоз, 30 т/га	НПК+ТМ+ навоз, 60 т/га	НПК+ТМ+ навоз, 90 т/га	2НПК+ТМ
<i>Медь</i>							
Продукция	114,4	169,3	223,4	291,1	344,1	363,5	281,6
Листья	191,3	262,1	461,0	432,8	530,5	506,9	494,1
Всего	305,7	431,4	684,4	723,9	874,6	870,4	775,7
<i>Цинк</i>							
Продукция	373,9	828,8	977,8	1353,6	1588,2	1778,5	1438,8
Листья	524,9	685,0	1686,9	1825,5	2288,5	2155,9	2059,5
Всего	898,8	1513,8	2664,7	3179,1	3876,7	3934,4	3498,3
<i>Свинец</i>							
Продукция	11,4	20,1	39,4	44,6	52,6	57,7	48,9
Листья	76,9	83,1	391,1	322,9	519,2	412,7	456,4
Всего	88,3	103,2	430,5	367,5	571,8	470,4	505,3
<i>Кадмий</i>							
Продукция	0,8	1,8	6,1	8,9	9,5	8,8	7,8
Листья	6,0	8,6	32,9	38,5	40,7	42,6	42,7
Всего	6,8	10,3	38,9	47,4	50,2	51,4	50,5

**Выводы.** 1. В год внесения ТМ в дерново-карбонатную почву установлена очень высокая степень загрязнения кадмием, цинком, медью и высокая степень загрязнения свинцом. Через пять лет содержание подвижных соединений в почве снизилось до уровня средней степени загрязнения.

2. Высокая степень загрязнения дерново-карбонатной почвы медью, цинком, свинцом и кадмием приводила к недобору урожая пропашных культур, равному в среднем за год 7,5 ц КЕ/га. Гигиеническое качество клубней картофеля, корнеплодов столовой свеклы и листьев кормовой свеклы по содержанию кадмия и клубней картофеля по содержанию цинка не соответствовало требованиям СанПиН.

3. Высокая степень загрязнения почвы исследуемыми металлами приводила к низкой эффективности внесения навоза. Недобор урожая в данном варианте в среднем за год составил 3,3 ц КЕ/га (НСР<sub>05</sub> 3,2 ц КЕ/га). Кроме того, содержание кадмия в клубнях картофеля, корнеплодах столовой свеклы и листьях кормовой свеклы не соответствовало требованиям СанПиН. Повышению урожайности культур на третий год исследований способствовало внесение двойной дозы минеральных удобрений, но данный прием не оказывал положительного действия на качество продукции: содержание кад-

При изучении последствий ТМ на гигиеническое качество продукции установлено, что содержание меди, цинка и свинца соответствовало нормативам, предъявляемым к пищевой продукции и кормам (табл. 6). Превышение ПДК кадмия в клубнях картофеля отмечено при использовании всех систем удобрения: НПК (2003 г.), НПК + навоз, 30 т/га (2005 г.); НПК + навоз, 60 т/га (2005 г.); НПК + навоз, 90 т/га (2003 г.); 2НПК (2003 и 2005 гг.). В 2003 г. содержание металла составляло 0,97 ПДК при внесении НПК + навоз, 30 т/га и 0,8 ПДК при НПК + навоз, 60 т/га. В 2005 г. содержание кадмия достигало 0,6 ПДК при внесении НПК и 0,07 ПДК при НПК + навоз, 90 т/га. Превышения кадмия в корнеплодах и листьях кормовой свеклы не обнаружено. В листьях отмечено накопление металла до уровня 0,45 ПДК при использовании НПК + навоз, 30 т/га; 0,48 ПДК при НПК + навоз, 90 т/га; 0,69 ПДК при использовании 2НПК.

Данные по количеству металлов, отчужденных из почвы в результате выноса растениями картофеля, столовой и кормовой свеклы представлены в таблице 7. Внесение навоза и повышенных доз минеральных удобрений способствовало увеличению выноса, как за счет нарастания биомассы, так и вследствие влияния удобрений на поглощение элементов из почвы. В зависимости от применяемых удобрений, в сравнении с вариантом НПК+ТМ, вынос меди возрастал на 39,5-190,2 г/га, цинка – на 514,4-1269,7, свинца – на 39,9-141,3, кадмия – на 8,5-12,4 г/га.

Количество металлов, отчужденное из почвы в результате выноса растениями значительно ниже поступившего в почву при загрязнении.

мия в клубнях картофеля, корнеплодах столовой свеклы и листьях кормовой свеклы было выше допустимого.

4. Возделывание пропашных культур на дерново-карбонатной почве, имеющей среднюю степень загрязнения ТМ, приводило к недобору урожая, равному в среднем за год 5,9 ц КЕ/га. По содержанию меди, цинка, свинца полученная продукция соответствовала требованиям СанПиН. Количество кадмия в клубнях картофеля было выше допустимых значений при использовании всех систем удобрения. При возделывании кормовой свеклы к накоплению кадмия до уровня 2/3 МДУ приводило внесение 2НПК.

5. Отчуждение металлов из почвы в результате выноса растениями было незначительным по сравнению с поступившим при загрязнении.

## Литература

1. Волкова Е.С. Загрязненность тяжёлыми металлами почв Псковской области // В сб.: Состояние и перспективы развития пчеловодства на Северо-Западе России. Матер. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. - М., 2003. - С. 9-14.
2. Орлов Д.С. Химия почв. - М.: Изд-во МГУ, 1992. - 360 с.
3. Химия тяжёлых металлов, мышьяка и молибдена в почвах // Под ред. Н.Г. Зырина и Л.К. Садовниковой. - М.: Изд-во МГУ, 1985. - 185 с.

4. Суслина Л.Г., Анисимова Л.Н., Круглов С.В., Анисимов В.С. Накопление Cu, Zn, Cd и Pb ячменем из дерново-подзолистой и торфяной почв при внесении калия и различном pH // *Агрохимия*. - 2006. - № 6. - С. 69 – 79.
5. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. - Л.: Агропромиздат, 1987. - 190 с.
6. Ильин В.Б. Оценка защитных возможностей системы почва-растение при модельном загрязнении почвы свинцом (по результатам вегетационных опытов) // *Агрохимия*. - 2004. - № 4. - С. 52-57.
7. Котлярова О.Г., Лицуков С.Д. Котлярова Е.Г. Влияние тяжёлых металлов на урожайность и качество картофеля // *Достижения науки и техники АПК*. - 2003. - № 8 - С. 10 – 12.
8. Шайкова Т.В., Волкова Е.С. Сравнительная характеристика метода проростков для оценки химического загрязнения карбонатных почв тяжелыми металлами // *Плодородие*. - 2014. - №4.
9. Обухов А.И. Методические основы разработки ПДК ТМ и классификация почв по загрязнению // Система методов изучения почвенного покрова, деградированного под влиянием химического загрязнения. - М., 1992. - С. 13-20.

**HEAVY METALS IN ROW CROPS GROWN ON SODDY-CALCAREOUS SOILS WITH DIFFERENT LEVELS OF FERTILIZATION**

***E.S. Volkova, Pskov Research Institute of Agriculture, ul. Mira 1, Rodina, Pskov raion, Pskov oblast, 180559 Russia***

***E-mail: echepurkina@gmail.com, compniush@ellink.ru***

*The effect of the chemical pollution of soddy-calcareous soils with heavy metals (copper, zinc, lead, and cadmium) at the use of different fertilizing systems in the Pskov oblast has been studied in long-term experiments. The effect of pollution on the yield and hygienic quality of crop has been revealed. The biological removal of copper, zinc, lead, and cadmium by plants has been calculated.*

*Key words: row crops, fertilizers, crop yield, heavy metals, soddy-calcareous soil.*