

УДК 631.821.1:546.47:631.445.24

ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ ОТХОДНОГО МЕЛА НА СОДЕРЖАНИЕ ЦИНКА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ И ЕГО НАКОПЛЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСЛОКАЦИИ ЦИНКА В РАСТЕНИЯ СЕМЕЙСТВ ЗЛАКОВЫХ, БОБОВЫХ И КАПУСТНЫХ

© 2024 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², В. М. Буре^{1,3}, А. О. Ковлева^{1,2}¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

В условиях 5-летнего вегетационно-прецизионного опыта, заложенного на кислой дерново-подзолистой супесчаной почве, мелиорированной возрастающими (от 0.8 до 24 т/га) дозами конверсионного мела (КМ), изучено влияние известкования на величину почвенной кислотности (pH_{KCl}), содержание в почве подвижных соединений цинка и его транслокацию в растения, относящиеся к семействам капустных, бобовых и злаковых. Показано, что при увеличении дозы применения мелиоранта содержание доступного для растений цинка в почве снижалось, а его переход в ткани растений замедлялся. Выявлены количественные параметры накопления цинка растениями ярового рапса спустя 1 год, 4 и 5 лет после известкования. Установлена связь между содержанием цинка в зерне и соломе ярового ячменя. В интервале доз мелиоранта от 0 до 2.0, рассчитанных по гидролитической кислотности (H_T), зерно ячменя накапливало цинк в достаточном количестве для нормального функционирования ячменя. Содержание цинка в тканях вики, позволяющее нормально развиваться растениям, менялось в вариантах известкования от 0.2 до 1.7 H_T . Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие взаимосвязь: а – дозы применения мела и величины pH_{KCl} почвы, достигнутой в результате известкования, б – величины pH_{KCl} почвы и содержания цинка в почве и растениях, в – содержания цинка в почве и его транслокации в виды растений различных биологических семейств, г – концентрации цинка в зерне и соломе растений.

Ключевые слова: возрастающие дозы отходного мела, содержание цинка, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, эмпирические модели, транслокация цинка в растения, семейства злаковых, бобовых и капустных.

DOI: 10.31857/S0002188124080101, EDN: CDOHYF

ВВЕДЕНИЕ

Цинк – элемент безусловно необходимый для роста и развития растений. Он играет важную роль в азотном, углеродном и фосфатных обменах, способствуя синтезу нуклеиновых кислот и белка. При недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органические кислоты, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, нарушается синтез белка. Дефицит цинка приводит также к нарушению

фосфорного обмена. При недостатке этого элемента в листьях подавляется скорость деления клеток мезофилла, что приводит к морфологическим изменениям листьев. На сегодняшний день известно ≈ 300 ферментов, содержащих цинк.

Содержание цинка в дерново-подзолистых почвах составляет ≈ 35 мг/кг, при варьировании концентрации от 20 до 67 мг/кг [1]. Растворимость и доступность цинка в почвах обнаруживает отрицательную корреляцию со степенью насыщенности кальцием. Известкование приводит к снижению

подвижности цинка в почвах. Минимальная растворимость цинка отмечена при рН 5.5–6.9 [2].

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург) длительное время проводят исследования, направленные на установление влияния известкования на химический состав растений [3–12].

Настоящая работа посвящена установлению влияния возрастающих доз известкового мелиоранта на содержание подвижных соединений цинка в дерново-подзолистой супесчаной почве и его транслокацию в растения. Цель работы – разработать эмпирические модели процесса транслокации цинка в виды растений семейств злаковых, капустных и бобовых, выращенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной отходным мелом в широком интервале его доз.

В задачи исследования входило:

- в условиях 5-летнего вегетационно-прецизионного опыта установить динамику величины pH_{KCl} в процессе взаимодействия мела с почвой; разработать эмпирические зависимости, адекватно описывающие изменение величины pH_{KCl} в почве под действием возрастающих доз мелиоранта;

- определить концентрацию цинка в почве отдельных вариантов опыта; выявить связь между содержанием цинка в почве и величиной рН во всем промежутке эксперимента;

- получить количественные параметры накопления цинка в видах растений важнейших в сельскохозяйственном отношении семейств, определить взаимосвязь между величиной рН почвы и концентрацией цинка в тканях растений;

- провести замеры концентрации цинка в растениях ярового рапса на разных этапах проведения эксперимента;

- разработать эмпирические зависимости, описывающие связь между содержанием цинка в почве и его накоплением растениями;

- выявить связь между содержанием цинка в зерне и соломе ярового ячменя;

- оценить обеспеченность цинком растений, выращенных на мелиорированной почве при применении широкого интервала доз мелиоранта.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели был заложен вегетационный прецизионный опыт. Одной из особенностей прецизионных экспериментов является значительное увеличение числа вариантов за счет отказа от повторностей при сокращении шага различий между вариантами [13, 14].

Применение методики прецизионного эксперимента в данном опыте позволило изучить возможно большее количество ситуаций, встречающихся в производственных условиях, а также построить эмпирические зависимости, адекватно описывающие: а – влияние возрастающих доз мелиоранта на величину pH_{KCl} дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, б – связь между величиной рН почвы и концентрацией доступных растениям соединений цинка в почве и его накоплением растениями.

Опыт включал в себя 24 варианта и охватывал интервал доз конверсионного мела (КМ) от 0.1 до 3.0 H_r (0.8–24 т/га) (табл. 1).

Дозы КМ, соответствующие 2.0–3.0 H_r (16–24 т/га), на практике не применяют, но такая концентрация может иметь место при известковании научно обоснованной дозой в отдельных очагах почвы из-за неравномерности рассеивания мелиоранта [15, 16].

Продолжительность эксперимента – 5 лет. Объектами изучения служили виды растений из важнейших в сельскохозяйственном отношении семейств: злаковых, бобовых и капустных. В год применения мела выращивали рапс *Brássica nápus*, на 2-й год – вику *Vicia L*, на 3-й год – ячмень *Hórdeum*, на 4- и 5-й годы – рапс *Brássica nápus*. Уборку вики и рапса проводили в фазе цветения, ячмень – в фазе полной спелости зерна.

Влажность почвы в период вегетации поддерживали на оптимальном для растений уровне (60% полной полевой влагоемкости). Удобрения вносили ежегодно из расчета 0.2 г д.в. NPK/кг массы почвы в виде азофоски. Масса почвы в сосуде – 5 кг.

В опыте использовали кислую дерново-подзолистую супесчаную почву, отобранную под естественным многолетним лугом, со следующими физико-химическими показателями: pH_{KCl} 4.1 ед., гумус – 3.02%, гидролитическая кислотность – 5.4 ммоль(экв)/100 г, содержание частиц <0.01 мм – 18.6%.

В качестве известкового материала использовали конверсионный (отходный) мел с содержанием $CaCO_3 = 90\%$. Мел является побочным продуктом азотнокислой обработки фосфатного сырья при производстве комплексных минеральных удобрений. Содержание цинка в меле составляло 16, в азофоске – 31 мг/кг.

Содержание обменных форм цинка определяли, извлекая металл из почвы ацетатно-аммонийным буфером рН 4.8. Концентрацию цинка в растениях устанавливали после сухого озоления в муфеле при температуре 550°C. Определение содержания цинка в почве проводили на атомно-абсорбционном

Таблица 1. Влияние возрастающих доз КМ на величину рН почвы и содержание доступных для растений соединений цинка

Вариант	Доза КМ, т/га	1-й год (Рапс)*	2-й год (Вика)		3-й год (Ячмень)		4-й год (Рапс)		5-й год (Рапс)	
		рН _{KCl}	Zn в почве	рН _{KCl}	Zn в почве	рН _{KCl}	Zn в почве	рН _{KCl}	Zn в почве	рН _{KCl}
1. Контроль	0.0	4.0	7.6	4.2	11.2	4.1	7.0	4.0	8.4	4.0
2. КМ по 0.1 H _г	0.8	4.2	7.6	4.3	10.6	4.1	6.0	4.0	6.7	4.0
3. КМ по 0.2 H _г	1.6	4.1	6.7	4.4	7.4	4.3	5.4	4.0	5.7	4.1
4. КМ по 0.3 H _г	2.4	4.5	2.9	4.6	4.4	4.2	4.0	4.1	4.0	4.1
5. КМ по 0.4 H _г	3.2	4.6	5.5	4.6	5.1	4.4	4	4.2	5	4.2
6. КМ по 0.5 H _г	4.0	4.8	4.5	4.8	4	4.5	3.1	4.3	4	4.3
7. КМ по 0.6 H _г	4.8	5.0	2.5	4.9	3.2	4.4	2.4	4.4	3.1	4.3
8. КМ по 0.7 H _г	5.6	5.2	2.7	4.9	3.5	4.6	2.4	4.5	3.0	4.4
9. КМ по 0.8 H _г	6.4	5.4	2	5.0	3	4.7	2.7	4.7	2.1	4.5
10. КМ по 0.9 H _г	7.2	5.6	2.6	5.2	3.0	4.8	2.0	4.7	2.4	4.5
11. КМ по 1.0 H _г	8.0	5.7	1.8	5.4	2.4	5.1	2.1	4.7	2.9	4.5
12. КМ по 1.1 H _г	8.8	5.6	2.1	5.3	1.9	5.2	2.2	5.1	2.9	4.7
13. КМ по 1.2 H _г	9.6	5.9	2.2	5.5	2.3	5.2	1.5	5.1	2	4.7
14. КМ по 1.3 H _г	10.4	5.8	1.9	5.5	1.2	5.3	1.1	5.3	1.8	5.0
15. КМ по 1.4 H _г	11.2	6.2	1.7	5.6	1.9	5.4	2.6	5.4	1.4	5.0
16. КМ по 1.5 H _г	12.0	6.2	0.5	5.7	2.2	5.6	1.1	5.6	1.6	5.1
17. КМ по 1.6 H _г	12.8	6.3	0.9	5.7	1.0	5.7	1.0	5.7	1.4	5.4
18. КМ по 1.7 H _г	13.6	6.2	0.9	5.7	0.9	5.7	0.9	5.7	1.5	5.3
19. КМ по 1.8 H _г	14.4	6.3	0.7	5.9	2.5	5.8	0.9	5.7	1.9	5.3
20. КМ по 1.9 H _г	15.2	6.6	0.4	6.4	1.2	5.9	0.6	5.7	1.2	5.4
21. КМ по 2.0 H _г	16.0	6.8	0.9	6.3	1.2	6.2	0.4	6.2	1.4	5.6
22. КМ по 2.2 H _г	17.6	6.5	0.5	6.7	1.8	6.5	0.6	6.4	0.7	5.9
23. КМ по 2.5 H _г	20.0	6.7	0.8	7.1	0.9	7.0	0.3	6.7	1.3	6.3
24. КМ по 3.0 H _г	24.0	6.9	2.6	7.1	1.7	7.3	1.1	7.1	1.8	6.9

Примечание. Содержание Zn в почве после уборки рапса в год известкования не определяли.

спектрофотометре. Построение эмпирических зависимостей осуществляли согласно [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почва, выбранная для исследования, характеризовалась сильнокислой реакцией (рН_{KCl} 4.1 ед.). За 5 лет эксперимента в контрольном варианте без известкования изменения величины рН не установлено (табл. 1).

Во всех произвесткованных вариантах опыта мелиоративный эффект от использования КМ был достигнут уже в год применения. Скорость растворения КМ и эмпирические модели процесса растворения мелиоранта за 5 лет изучения представлена в работах [18, 19].

Максимальный рост величины рН в год известкования зафиксирован в варианте с использованием мела в дозе, соответствующей 3 H_г (6.9 ед. рН). На третий год последствий дозы, соответствующие 0.2–0.3 H_г, исчерпали свое влияние на показатель рН. Во всех других вариантах величина рН_{KCl} была больше, чем в контроле. На 4-й год последствий до варианта с применением мела в дозе 1 H_г величина рН_{KCl} оставалась в интервале, соответствующем сильнокислой реакции почвы. В остальных вариантах рН_{KCl} был выше. Таким образом, условия произрастания растений в различных вариантах опыта в годы изучения складывались по-разному.

Эмпирические зависимости, адекватно описывающие изменение величины рН под действием возрастающих доз мелиоранта во всем промежутке времени изучения, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Эмпирические зависимости, описывающие изменение pH_{KCl} от дозы применения КМ

Год исследования	Эмпирическая зависимость	Изменение показателя pH_{KCl} при увеличении дозы мелиоранта на 1 ед.	p -value	R^2
1-й	$y_1 = 4.3 + 0.000135 \cdot x$	$v_1 = 0.000135$	6.1×10^{-12}	0.91
2-й	$y_2 = 4.2 + 0.000129 \cdot x$	$v_2 = 0.000129$	3.19×10^{-18}	0.97
3-й	$y_3 = 3.9 + 0.00014 \cdot x$	$v_3 = 0.00014$	5.5×10^{-19}	0.98
4-й	$y_4 = 3.79 + 0.00014 \cdot x$	$v_4 = 0.00014$	1.5×10^{-19}	0.98
5-й	$y_5 = 3.779 + 0.000118 \cdot x$	$v_5 = 0.000118$	8.7×10^{-17}	0.97

* R^2 – коэффициент детерминации. То же в табл. 3.

Таблица 3. Эмпирические зависимости, описывающие изменение содержания Zn в почве от величины pH_{KCl}

Год исследования	Эмпирическая зависимость	p -value	R^2
2-й	$\ln(y_6) = 5.03 - 0.81 \cdot x^*$	9.48E – 06	0.597
3-й	$\ln(y_7) = 4.22 - 0.63 \cdot x$	4.2E – 06	0.625
4-й	$\ln(y_8) = 4.8 - 0.83 \cdot x$	6.76E – 09	0.789
5-й	$\ln(y_9) = 3.95 - 0.63 \cdot x$	4.89E – 06	0.620

* x – величина pH_{KCl} . То же в табл. 5.

Все зависимости (1–5) имеют очень высокий уровень статистической значимости по F -критерию. Величины коэффициента детерминации близки к единице. Это свидетельствовало о наличии очень сильной линейной связи между величиной pH_{KCl} и дозой мела. Все зависимости очень похожи друг на друга. Соответствующие коэффициенты в формулах близки по величине.

Данные содержания цинка в почве после уборки растений вики приведены в табл. 1. Показано, что известкование способствовало снижению подвижности цинка в почве. Несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, можно говорить, что уменьшение содержания цинка в известкованных вариантах наблюдали до дозы применения мела $1.9 H_r$. Эмпирическая модель зависимости содержания цинка в почве от величины pH_{KCl} после уборки вики приведена в табл. 3. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

В дальнейшем, по мере проведения эксперимента, известкование продолжало оказывать влияние на содержание доступного для растений цинка. Чем больше была доза применения КМ, тем концентрация цинка в почве была меньше.

Максимальным уровнем накопления цинка в год применения мелиоранта характеризовались растения рапса контрольного варианта (36.0 мг/кг воздушно-сухой массы растений) (табл. 4).

Снижение содержания цинка в тканях рапса под действием известкования наблюдали до дозы

применения, соответствующей $1.1 H_r$ (7.5 мг/кг). Далее изменения его содержания были незначительными и укладывались в диапазон 6.75–8.75 мг/кг.

Эмпирическая модель зависимости содержания цинка в рапсе от величины pH_{KCl} почвы в год известкования приведена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

Одной из задач настоящего опыта являлось выявление различий содержания цинка в рапсе в год применения мела, а также на 3-й и 4-й годы последействия (табл. 4). Содержание цинка в контрольном варианте спустя 4 года после известкования увеличилось до 164 мг/кг. Рост содержания цинка в рапсе наблюдали до варианта, произвесткованного дозой КМ $0.7 H_r$ (253 мг/кг). Далее, по мере увеличения дозы мелиоранта, концентрация цинка в растениях снижалась. Минимальная концентрация цинка была выявлена в варианте, произвесткованном КМ в дозе $2.0 H_r$.

Эмпирическая модель, описывающая зависимость содержания цинка в рапсе от pH почвы на 4-й год проведения опыта, представлена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

Закономерности, выявленные при анализе данных содержания цинка в тканях рапса, выращенного спустя 5 лет после мелиорации, целиком подтвердили картину 4-го года опыта. Рост содержания цинка наблюдали до варианта $0.7 H_r$ (300 мг/кг).

Таблица 4. Изменение содержания Zn в растениях в зависимости от дозы применения мела, мг/кг

Вариант	Доза КМ, т/га	1-й год (Рапс)	2-й год (Вика)	3-й год (Ячмень солома)	3-й год (Ячмень зерно)	4-й год (Рапс)	5-й год (Рапс)
1. Контроль	0.0	36	253	52	61	164	184
2. КМ по 0.1 H_T	0.8	23	166	39	67	158	203
3. КМ по 0.2 H_T	1.6	22.5	127	65	76	167	375
4. КМ по 0.3 H_T	2.4	26	63	32	61	114	212
5. КМ по 0.4 H_T	3.2	20	110	54	77	136	124
6. КМ по 0.5 H_T	4.0	25	61	48	73	146	138
7. КМ по 0.6 H_T	4.8	13	54	30	64	193	209
8. КМ по 0.7 H_T	5.6	12	55	36	69	253	300
9. КМ по 0.8 H_T	6.4	10	57	30	57	193	145
10. КМ по 0.9 H_T	7.2	10	49	26	51	165	223
11. КМ по 1.0 H_T	8.0	10	38	28	66	99	198
12. КМ по 1.1 H_T	8.8	7.5	42	38	69	80	205
13. КМ по 1.2 H_T	9.6	10	40	24	58	28	117
14. КМ по 1.3 H_T	10.4	8.75	40	26	55	77	69
15. КМ по 1.4 H_T	11.2	8.75	61	20	62	31	67
16. КМ по 1.5 H_T	12.0	6.75	30	25	47	25	150
17. КМ по 1.6 H_T	12.8	8	30	21	38	25	63
18. КМ по 1.7 H_T	13.6	7	39	18	50	28	88
19. КМ по 1.8 H_T	14.4	8.8	18	11	36	23	66
20. КМ по 1.9 H_T	15.2	7.5	21	9	25	24	44
21. КМ по 2.0 H_T	16.0	7.5	17	18	46	28	32
22. КМ по 2.2 H_T	17.6	7.5	18	12	28	25	27
23. КМ по 2.5 H_T	20.0	7	12	10	19	24	25
24. КМ по 3.0 H_T	24.0	7.5	18	10	29	32	39

Таблица 5. Эмпирические зависимости, описывающие связь между величиной pH_{KCl} в почве и транслокацией цинка в виды растений различных биологических семейств

Год исследования (культура)	Эмпирическая зависимость	p -value	R^2
1-й (рапс)	$\ln(y_{10}) = 5.36 - 0.52 \cdot x$	1.17E - 10	0.850
2-й (вика)	$\ln(y_{11}) = 8.37 - 0.84 \cdot x$	1.48E - 10	0.850
3-й (ячмень, солома)	$\ln(y_{12}) = 6.1 - 0.55 \cdot x$	1.42E - 08	0.775
3-й (ячмень, зерно)	$\ln(y_{13}) = 5.8 - 0.36 \cdot x$	1.17E - 07	0.728
4-й (рапс)	$\ln(y_{14}) = 8.48 - 0.84 \cdot x$	2.24E - 07	0.710
5-й (рапс)	$\ln(y_{15}) = 9.05 - 0.896 \cdot x$	3.96E - 08	0.753

Далее содержание цинка в рапсе постепенно снижалось, и в варианте, мелиорированном мелом в дозе 2.5 H_T , составило 27 мг/кг. Эмпирическая зависимость содержания цинка в рапсе на 5-й год после известкования от pH_{KCl} в почве приведена в табл. 5.

Показали, насколько по-разному происходило накопление цинка растениями ярового рапса в год известкования и спустя 4 и 5 лет после мелиорации (рис. 1). Это указывало на важную роль химического состава почвы на формирование элементного состава рапса и его экологическую пластичность.

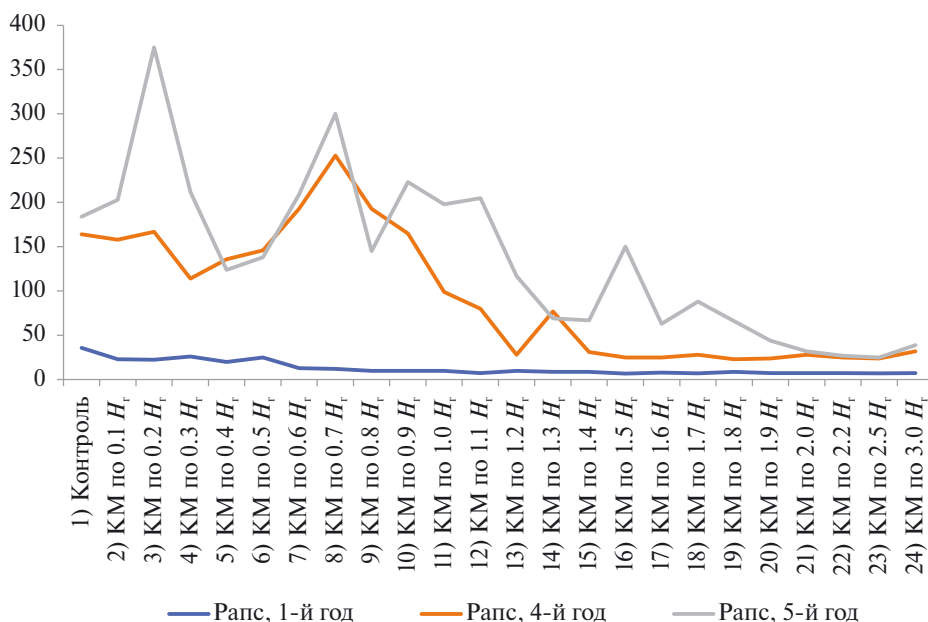


Рис. 1. Содержание цинка в растениях ярового рапса на разных этапах проведения опыта.

Растения семейства бобовых характеризовались высоким размахом изменений содержания цинка в биомассе (табл. 4). По мере увеличения дозы известкового материала концентрация цинка в вике снижалась. В контрольном варианте опыта содержание цинка составило 253 мг/кг воздушно-сухой массы растения. Минимальным содержанием характеризовался вариант, мелиорированный дозой мела 2.5 Н_г (12 мг/кг воздушно-сухой массы растений). Эмпирическая модель транслокации цинка в растения вики в зависимости от рН почвы приведена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

В работе [20] приведены данные, характеризующие содержание цинка в листьях двудольных растений: дефицит – 10–20, оптимум – 21–150 и избыток – 151–400 мг/кг. Они свидетельствовали, что в интервале доз КМ от 0.2 до 1.7 Н_г концентрация цинка в растениях вики укладывалась в диапазон содержания, позволяющего нормально развиваться растениям.

В соломе ячменя размах изменений содержания цинка укладывался в диапазон от 65 до 9 мг/кг воздушно-сухой массы растений. Эмпирическая модель, описывающая зависимость накопления цинка в соломе ячменя от величины рН почвы в известкованных вариантах, приведена в табл. 5. Модель статистически значима на высоком уровне значимости.

Во всех вариантах зерно растений накапливало цинк в количестве большем, чем в соломе (табл. 4). Его содержание менялось от 76–77 в вариантах опыта, мелиорированных дозами мела 0.2–0.4 Н_г, до 19 мг/кг

в варианте, мелиорированном дозой мела 2.5 Н_г. Выявлена значимая положительная связь между содержанием цинка в соломе и зерне ячменя ($r = 0.85$).

По данным [20], дефицит, оптимум и избыток содержания цинка для растений семейства злаковых составляет соответственно 20–24, 25–250 и 251–400 мг/кг сухого вещества. Следовательно, до дозы применения мела, соответствующей 2.0 Н_г, зерно ячменя накапливало цинк в количестве, нормальном для функционирования растений. Эмпирическая модель, описывающая транслокацию цинка в зерно ячменя, приведена в табл. 5.

Одной из задач настоящего исследования являлась разработка модели зависимости содержания цинка в зерне растений от содержания цинка в соломе при разных величинах рН почвы. График зависимости приведен на рис. 2.

Эмпирическая модель для y_{13} , y_{12} – цинк (зерно, ячмень):

$$y_{13} = 26.5 + 0.95 \times y_{12}, \quad (1.6)$$

где y_{12} – содержание Zn в соломе (ячмень).

Для модели (1.6) $p = 1.36 \text{E} - 07$ (p -value по F -критерию), коэффициент детерминации $R^2 = 0.724$. Модель (1.6) статистически значима на очень высоком уровне. График модели (1.6) представлен на рис. 2

Модель (1.6) зависимости содержания Zn в зерне ячменя от содержания Zn в соломе имеет очень высокую статистическую значимость. Модель носит линейный характер, несомненно, имеется очень сильная связь между содержанием цинка в зерне и соломе ячменя.

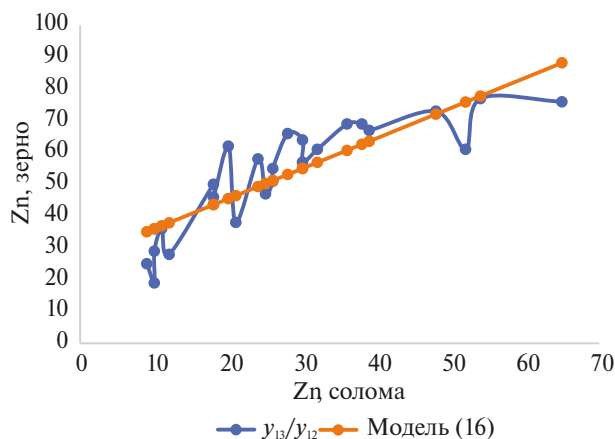


Рис. 2. Зависимость содержания цинка в зерне ячменя от содержания цинка в соломе при увеличении показателя рН почвы.

В целом, применение КМ для известкования кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы приводит к нейтрализации почвенной кислотности. Чем больше доза применения КМ, тем мелиоративный эффект выше. Изменение величины pH_{KCl} приводит к осаждению подвижных соединений цинка в почве и снижает его накопление в растениях.

ВЫВОДЫ

1. Мелиоративный эффект при использовании конверсионного мела был достигнут в год его применения. На 3-й год последствия дозы, соответствующие $0.2-0.3 H_T$, исчерпали свое действие. На 4-й год после действия до варианта с применением КМ в дозе $1 H_T$ величина pH_{KCl} соответствовала сильно-кислой реакции почв. В остальных вариантах pH_{KCl} был выше.

2. Известкование привело к снижению подвижности цинка в почве. Уменьшение содержания цинка в почве известкованных вариантов после уборки вики наблюдали до дозы применения мела $1.9 H_T$. По мере проведения эксперимента известкование продолжало оказывать влияние на концентрацию доступного для растений цинка в почве. Чем больше была доза применения КМ, тем концентрация цинка была меньше.

3. Максимальным уровнем накопления цинка в год известкования характеризовались растения рапса контрольного варианта (36.0 мг/кг). Снижение содержания цинка в тканях рапса наблюдали до дозы применения, соответствующей $1.1 H_T$ (7.5 мг/кг). Рост концентрации цинка в рапсе спустя 4 года после известкования установили до варианта, произвесткованного дозой мела $0.7 H_T$ (253 мг/кг). По мере увеличения дозы применения мела концентрация цинка в рапсе снижалась. Закономерности, выявленные при анализе данных концентрации цинка в тканях рапса,

выращенного спустя 5 лет после мелиорации, целиком подтвердили закономерность 4-го года опыта. Рост содержания цинка наблюдали до варианта $0.7 H_T$ (300 мг/кг).

4. В контрольном варианте опыта содержание цинка в растениях вики составило 245 мг/кг . Минимальным содержанием характеризовался вариант, мелиорированный дозой мела $2.5 H_T$ (12 мг/кг).

5. В соломе ячменя размах изменений содержания цинка укладывался в диапазон от 65 до 9 мг/кг . Во всех вариантах зерно растений накапливало цинк в количестве большем, чем в соломе, что составило от 19 до 77 мг/кг . Выявлена высокая положительная связь между содержанием цинка в соломе и зерне растений ($r = 0.85$).

6. Диапазон содержания цинка в тканях вики, позволяющий нормально развиваться растениям, достигался в интервале доз мелиоранта от 0.2 до $1.7 H_T$, в растениях ячменя — от 0 до $2.0 H_T$.

7. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие взаимосвязь: а — дозы применения мела и величины pH_{KCl} почвы, достигнутой в результате известкования, б — величины pH_{KCl} почвы и содержания цинка в почве и растениях, в — содержания цинка в почве и его перехода в виды растений из различных биологических семейств; г — содержания цинка в зерне и соломе растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1027 с.
2. Возбуцкая А.Е. Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
3. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Фтор в системе почва—растения при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // Агрохимия. 2002. № 2. С. 66–76.
4. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // Агрохимия. 2001. № 2. С. 74–78.
5. Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // Агрохимия. 2002. № 4. С. 81–87.
6. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрохимия. 2015. № 5. С. 61–68.
7. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Волкова Е.Н. Влияние различных видов фосфорных удобрений и фосфатного шлама на химический состав зеленой массы ярового рапса на кислой дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2006. № 3. С. 34–39.

8. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Последствия применения конверсионного мела для мелиорации кислых почв: стронций в системе дерново-подзолистая почва–растение // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1138.
9. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Оглуздин А.С. Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // Агрохимия. 2008. № 7. С. 50–55.
10. Литвинович А.В., Осипов А.И., Павлова О.Ю. Влияние техногенного загрязнения на химический состав растений хлопчатника // Агрохимия. 1998. № 1. С. 71–77.
11. Литвинович А.В., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Микроэлементный состав растений ярового рапса на разных этапах растворения конверсионного мела // Агрохимия. 2014. № 5. С. 64–71.
12. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю. Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2014. № 4. С. 80–87.
13. Langkilde N. Practical experiences with precision agriculture // Precision agriculture'99, IAMFE/RUSSIA, 12–15 December, All-Russian research institute of chemical melioration of soils, St. Petersburg/Pushkin, Russia. 1999. P. 35–46.
14. Lauk E., Lauk R., Lauk Y. Experimental planning and methods in regression analysis // Pros. of the 12th Intern. conf. on mechanization of field experiments. IAMFE/RUSSIA 5–9 July, St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg/Pushkin, Russia, 2004. P. 58–64.
15. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф. Пространственная неоднородность кислотности почв // Агрохим. вестн. 2006. № 6. С. 10–12.
16. Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
17. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.
18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
19. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // Агрохимия. 2016. № 12. С. 42–50.

Effect of Increasing Doses of Waste Chalk on the Zinc Content in Sod-Podzolic Light Loamy Soil and Its Accumulation by Plants. Empirical Models of Zinc Translocation into Plants of the Cereal, Legume and Cabbage Families

A. V. Litvinovich^{a, b, #}, A. V. Lavrishchev^b, V. M. Bure^{a, c}, A. O. Kovleva^{a, b}

^aAgrophysical Research Institute,
Grazhdanskiy prosp. 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia

^bSt. Petersburg State Agrarian University,
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

^cSt. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia,

[#]E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

Under the conditions of a 5-year vegetation-precision experiment based on acidic sod-podzolic sandy loam soil reclaimed with increasing (from 0.8 to 24 t/ha) doses of conversion chalk (CC), the effect of liming on the value of soil acidity (pH_{KCl}), the content of mobile zinc compounds in the soil and its translocation into plants was studied, related to the cabbage, legume and cereal families. It was shown that with an increase in the dose of meliorant, the content of zinc available to plants in the soil decreased, and its transition to plant tissues slowed down. Quantitative parameters of zinc accumulation by spring rape plants were revealed 1 year, 4 and 5 years after liming. A relationship has been established between the zinc content in grain and straw of spring barley. In the range of meliorant doses from 0 to 2.0, calculated by hydrolytic acidity (H_a), barley grain accumulated zinc in sufficient quantities for the normal functioning of barley. The zinc content in vetch tissues, which allows plants to develop normally, varied in liming options from 0.2 to 1.7 H_a . Empirical models have been developed that adequately describe the relationship between: a – the dose of chalk application and the pH value of the soil achieved as a result of liming, b – the pH value of the soil and the zinc content in soil and plants, c – the zinc content in soil and its translocation into plant species of various biological families, d – zinc concentrations in grain and straw of plants.

Keywords: increasing doses of waste chalk, zinc content, sod-podzolic light loamy soil, empirical models, translocation of zinc into plants, families of cereals, legumes and cabbage.