

ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ИЗВЕСТКОВАНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ДОЛОМИТОВОЙ МУКОЙ НА МИКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ

© 2024 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}

¹Российский государственный гидрометеорологический университет
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, 79, Россия

²Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

*E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

В многолетнем прецизионном микрополевым эксперименте изучено влияние известкования кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой (ДМ, диапазон доз 0–2.0 H_r , 9-й год последействия) на реакцию почвы, содержание подвижных соединений Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb в почве и микроэлементный состав растений ячменя (*Hordeum* L.). Выявлено, что наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы были Zn и Mn, содержание которых в органах растений ячменя достоверно линейно уменьшалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r . Существенным было последействие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r). Наблюдали тенденцию к снижению содержания Fe в соломе и колосе растений ($r = -0.572$ и -0.570 соответственно) в указанном диапазоне доз. Полученные данные подтвердили, что известкование может приводить к увеличению содержания Cd в зерновых культурах: в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r увеличение содержания элемента в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза, а в соломе – линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$). Содержание Cu и Pb в растениях ячменя слабо зависело от дозы известкового мелиоранта.

Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, известкование, доломитовая мука, последействие, растения ячменя, микроэлементный состав растений, реакция почвы.

DOI: 10.31857/S0002188124090059, **EDN:** CCTVSI

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшая задача сельскохозяйственного производства – сбалансированный и безопасный элементный состав продукции растениеводства и животноводства, одним из инструментов достижения которой на кислых почвах является применение известковых мелиорантов. Такой прием повышения плодородия кислых почв, как известкование, имеет ряд специфических особенностей, определяющих его влияние на кислотно-основные свойства почвы и элементный состав сельскохозяйственных культур. Известно [1], что действие известкового мелиоранта может проявляться в течение 15–20 лет и более. При внесении повышенных доз доломитовой муки (2.0 и 2.5 H_r) нейтрализующее действие мелиоранта наблюдали даже через 32 года после внесения [2].

В процессе взаимодействия известковых мелиорантов с почвой, помимо нейтрализации почвенной кислотности и насыщения почвенного поглощающего комплекса основаниями, происходит усиление конкурентных взаимодействий между Ca,

Mg и их химическими аналогами, приводя к изменению элементного состава почвенного раствора и растений. Степень и продолжительность воздействия на систему почва–растение определяется дозой, нейтрализующей способностью и фракционным составом мелиоранта, составом и свойствами почвы [3, 4].

Изменение реакции почвы и насыщения ППК кальцием и магнием при известковании кислых почв может приводить к существенному снижению содержания химических элементов в культурных растениях, к дефициту необходимых для растений и человека микроэлементов, что можно рассматривать как дополнительный фактор риска здоровью населения, особенно при низком фоновом содержании эссенциальных микроэлементов в почве [4]. Известно [5], что дефицит микронутриентов в питании современного человека – это объективная реальность, которая проявляется независимо от качества и количества потребляемой пищи. Известно также [6], что в таежно-лесной нечерноземной зоне реакции живых организмов обусловлены

недостатком кальция, фосфора, кобальта (73% всех почв), меди (70%), йода (80%), молибдена (53%), бора (50%), цинка (49%), оптимальным содержанием марганца (72%), относительным избытком особенно в поймах рек стронция (15%). Влияние известкования на элементный состав растений существенно зависит также от почвенно-климатических условий и видовых и сортовых особенностей растений, определяющих интенсивность накопления химических элементов, распределение их в органах растений, отношение к реакции среды.

Цель работы – в условиях многолетнего микрополевого эксперимента изучить влияние последствия доломитовой муки (ДМ) в широком диапазоне доз на микроэлементный состав (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd и Pb) растений ячменя.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в условиях многолетнего микрополевого прецизионного (без повторностей) опыта, заложенного на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в Меньковском филиале Агрофизического института (Ленинградская обл., Гатчинский р-н) в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина – 25 см, $\approx 300 \text{ кг}$ почвы/сосуд) в мае 2012 г. [7, 8].

Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда площадью 1 м^2) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру

делянок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой легкосуглинистой дерново-подзолистой почвой с показателями: pH 4.6 ед., $H_{\text{г}}$ – 3.96, сумма обменных оснований – 0.87 ммоль/100 г. Схема опыта, варианты: 1 – контроль (фон NPK), 2 – фон + ДМ 0.2 $H_{\text{г}}$, 3 – фон + ДМ 0.3 $H_{\text{г}}$, 4 – фон + ДМ 0.4 $H_{\text{г}}$, 5 – фон + ДМ 0.5 $H_{\text{г}}$, 6 – фон + ДМ 0.6 $H_{\text{г}}$, 7 – фон + ДМ 0.7 $H_{\text{г}}$, 8 – фон + ДМ 0.8 $H_{\text{г}}$, 9 – фон + ДМ 0.9 $H_{\text{г}}$, 10 – фон + ДМ 1.5 $H_{\text{г}}$. Размещение делянок систематическое, 2-рядное. Доза доломитовой муки (CaCO_3 50.4% + MgCO_3 48.9%) по 1 $H_{\text{г}}$ составила 5.54 т/га. Ежегодно вносили минеральные удобрения (АЗФК, суммарная за 2012–2020 гг. доза – N604P484K414).

На 9-й год взаимодействия ДМ с почвой (2020 г.) выращивали ячмень (*Hordeum L.*) сорта Ленинградский до фазы колошения. Почвенные пробы были отобраны до посева, результаты их аналитических испытаний (pH_{KCl} почвы и содержания подвижных соединений тестируемых химических элементов) представлены в табл. 1.

Аналитические исследования выполнены сотрудниками испытательной лаборатории Агрофизического института. Содержание цинка, меди, марганца, железа, кадмия и свинца в почве и растениях ячменя определяли атомно-абсорбционным методом после мокрого озоления, pH_{KCl} почвы – потенциометрическим методом. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

Таблица 1. Реакция почвы и содержание подвижных соединений микроэлементов в почве (через 9 лет после внесения доломитовой муки)

Вариант	Показатели							
	pH _{KCl}	$H_{\text{г}}$ ммоль/100 г	Zn	Cu	Cd	Pb	Mn	Fe
			мг/кг (экстрагент – ААБ pH 4.8)					
1. Контроль	4.2	5.0	0.79	0.15	0.02	0.18	22.0	24.6
2. ДМ 0.2	4.4	4.3	0.51	0.12	0.02	0.13	15.5	19.2
3. ДМ 0.3	4.6	3.7	0.43	0.14	0.02	0.17	13.9	15.1
4. ДМ 0.4	4.6	3.8	0.96	0.16	0.03	0.18	13.5	14.1
5. ДМ 0.5	5.0	3.3	0.39	0.15	0.02	0.12	9.6	9.7
6. ДМ 0.6	4.9	3.3	0.33	0.17	0.02	0.05	11.1	10.8
7. ДМ 0.7	5.1	3.0	0.26	0.08	0.02	0.02	9.6	9.2
8. ДМ 0.8	5.2	2.8	0.32	0.18	0.02	<0.01	9.6	8.4
9. ДМ 0.9	5.2	2.8	0.32	0.11	0.03	<0.01	10.4	9.4
10. ДМ 1.0	5.9	1.7	0.24	0.22	0.01	<0.01	7.5	6.0
11. ДМ 1.5	6.0	1.6	0.22	0.16	0.02	<0.01	8.2	5.8
12. ДМ 2.0	6.4	1.1	0.15	0.12	<0.01	0.02	8.8	5.4

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты многолетнего микрополевого эксперимента свидетельствовали о длительном последствии известкования дерново-подзолистой почвы на элементный состав сельскохозяйственных культур. В зависимости от дозы известкового мелиоранта, генетически обусловленных особенностей растений и свойств химических элементов возможен широкий диапазон варьирования эффектов [7, 9–11].

Установлено, что наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы являются цинк и марганец: на 9-й год последствия ДМ содержание данных эссенциальных (жизненно необходимых) химических элементов в органах растений ячменя линейно зависело от дозы известкового мелиоранта (рис. 1).

По уменьшению содержания Zn (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: колос (36.0–13.0) > корни (14.0–8.0) > солома (7.6–0.2).

На 9-й год после внесения ДМ в дозе 1.0 H_r содержание Zn в колосе, соломе и корнях снизилось по отношению к контролю на 46, 77 и 29% соответственно, при увеличении дозы мелиоранта до 2.0 H_r различие составило 63, 97 и 39%. Установлено, что содержание Zn в колосе, соломе и корнях растений линейно снижалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r (коэффициенты корреляции $r = -0.899, -0.895, -0.750$ соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576) (рис. 1, табл. 2).

В зависимости от дозы известкового мелиоранта убыль содержания Zn по отношению к контролю варьировалась в пределах: колос – 7–63, солома – 18–97, корни – 10–39%.

Выявлено, что внесение ДМ оказывало длительное последствие на содержание подвижных соединений Zn в почве: на 9-й год после внесения ДМ содержание элемента линейно снижалось ($r = -0.752$) в интервале величин pH 4.2–6.4 (табл. 1, 2). Наибольшую интенсивность указанного процесса наблюдали в интервале pH почвы 5.0–6.4 (интервал доз ДМ 0.5–2.0 H_r). Последствие доз ДМ 0.5 и 2.0 H_r привело к снижению содержания подвижных соединений цинка в почве по отношению к контролю на 51 и 81% соответственно (табл. 1).

Известно [12, 13], что растворимость и доступность растений соединений Zn возрастает с подкислением среды: минимальная растворимость элемента отмечена при pH 5.5–6.9, дальнейшее повышение pH ведет к увеличению его растворимости. Установлено [7, 14], что увеличение содержания Mg в почве и растениях при внесении ДМ оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca.

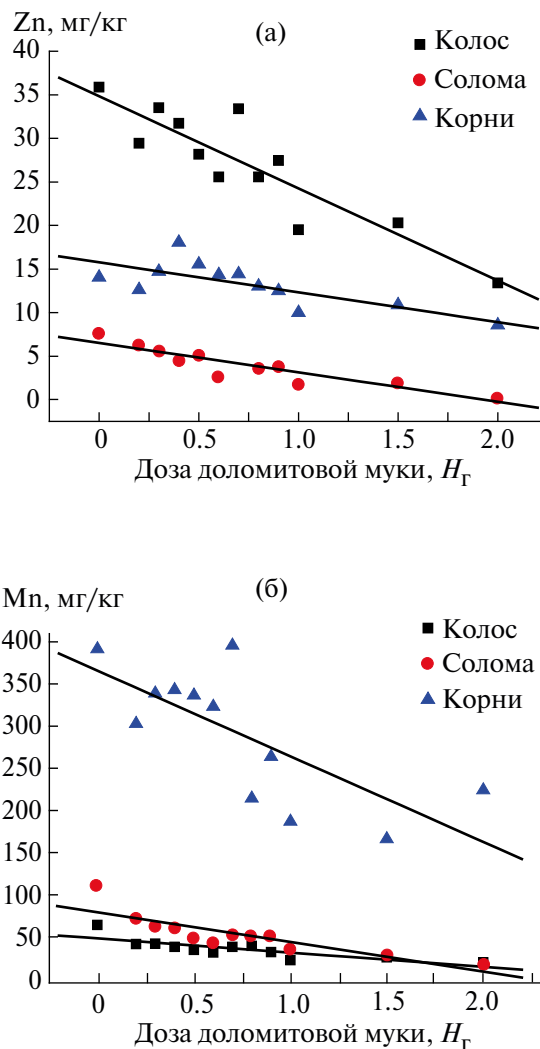


Рис. 1. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка и марганца в растениях ячменя.

Реакция почвенного раствора существенно влияет на подвижность Mn и Fe в почве и их доступность растениям, недостаток или избыток этих химических элементов негативно сказывается на процессах жизнедеятельности всех организмов [10, 12, 13].

Марганец относится к важнейшим для организма человека микроэлементам, является компонентом множества ферментов и выполняет в организме многочисленные функции, особенно выраженное действие Mn оказывает на инсулиновый обмен. На фоне недостатка Mn у практически здоровых людей может развиваться психоневрологическая симптоматика, напоминающая такие заболевания, как шизофрения и болезнь Паркинсона [15]. Дефицит Mn в кормах может вызывать патологические нарушения у животных [16].

Установлено, что известкование дерново-подзолистой почвы сопровождалось длительным

Таблица 2. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn, Mn, Cu, Fe и Cd в растениях ячменя от дозы доломитовой муки и реакции почвы в интервале доз 0–2.0 H_r (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости = 0.576)

Зависимость	Колос	Солома	Корни
Zn(f) = Доза ДМ	–0.899	–0.895	–0.750
Zn(f) = pH почвы	–0.915	–0.903	–0.930
Zn(f) = Zn _{подв} почвы	0.665	0.632	0.722
Mn(f) = Доза ДМ	–0.818	–0.841	–0.733
Mn(f) = pH почвы	–0.857	–0.869	–0.783
Mn(f) = Mn _{подв} почвы	0.902	0.945	0.633
Fe(f) = Доза ДМ	–0.572	–0.576	0.460
Fe(f) = pH почвы	–0.542	–0.587	0.410
Fe(f) = Fe _{подв} почвы	0.593	0.864	–0.212
Cu(f) = Доза ДМ	–0.260	–0.252	–0.406
Cu(f) = pH почвы	–0.334	–0.343	–0.380
Cu(f) = Cu _{подв} почвы	–0.583	–0.286	–0.271
Cd(f) = Доза ДМ	0.557	0.178	0.258
Cd(f) = pH почвы	0.573	0.270	0.346
Cd(f) = Cd _{подв} почвы	–0.405	0.165	–0.204
Pb(f) = Доза ДМ	0.226	–0.394	0.020
Pb(f) = pH почвы	0.232	–0.492	0.036
Pb(f) = Pb _{подв} почвы	0.340	–0.627	0.174

последствием, влияющим на содержание Mn в культурных растениях. Зависимость содержания Mn в колосе, соломе и корнях растений ячменя в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r по линейной модели характеризовалась коэффициентами корреляции $r = -0.818$, -0.841 и -0.733 соответственно (рис. 1, табл. 2). В отличие от цинка, максимальное содержание марганца отмечено в корнях растений (рис. 1). По уменьшению содержания Mn (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (391–224) > солома (112–21) > колос (64–20).

В варианте 10 (доза ДМ 1.0 H_r) последствие мелиоранта привело к снижению содержания Mn по отношению к контролю в колосе, соломе и корнях на 65, 69 и 52% соответственно. Существенным было последствие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r): по отношению к контролю содержание Mn в колосе и соломе снизилось на 35% (рис. 1).

Содержание подвижных соединений Mn и Fe в почве линейно снижалось в интервале величин pH 4.2–6.4 ($r = -0.802$ и -0.877 соответственно)

(табл. 1, 2). Наибольшую интенсивность указанного процесса наблюдали в интервале pH почвы 5.0–6.4 ед. Максимальное по отношению к контролю снижение содержания подвижных соединений указанных химических элементов составило: Mn – 66 (вариант 10), Fe – 78% (вариант 12) (табл. 1).

Железо преимущественно накапливалось в корнях растений (табл. 3). По убыванию среднего в вариантах содержания Fe (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (2260 ± 470) > солома (75 ± 24) $\geq$ колос (75 ± 7).

В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание Fe в соломе и колосе ячменя линейно убывало, в корнях наблюдали устойчивую тенденцию указанного эффекта (табл. 2, 3). Максимальное снижение по отношению к контролю содержания Fe в колосе составило 27% (доза ДМ 2.0 H_r), в соломе – 55% (доза ДМ 0.7 H_r).

Известно [10, 12, 13], что поглощение и перенос Fe в растительных органах во многом зависят от величины pH, окислительно-восстановительного

потенциала (Eh) почвы, содержания кальция и фосфора, а также соотношения некоторых тяжелых металлов в почвенном растворе. Основным следствием острого или хронического дефицита железа у человека является железодефицитная анемия [15]. Для профилактики дефицита железа ВОЗ рекомендует обогащать Fe пищевые продукты массового потребления, например, пшеничную муку [17].

Медь является жизненно важным для человека и животных элементом, который входит в состав витаминов, гормонов, ферментов, дыхательных пигментов, участвует в процессах обмена веществ, в тканевом дыхании и т.п. [15]. Большинство почв в достаточной степени обеспечено подвижной медью. Наименьшее количество подвижных соединений Cu характерно для дерново-подзолистых песчаных и супесчаных почв, а также многих торфяных почв [12].

Содержание подвижных соединений Cu в почве опыта (варианты 1–12) варьировалось в пределах 0.15 ± 0.04 мг/кг (табл. 1), что, согласно группировке почв по содержанию подвижных форм микроэлементов, определяемых в вытяжке ацетатно-аммонийного буферного раствора (рН 4.8) [18], соответствует низкому содержанию. Считается [13], что содержания Cu в почве <2 мг/кг неблагоприятны для большинства видов растений.

Корреляционная связь между содержанием подвижных соединений Cu в почве, дозой ДМ и реакцией почвы отсутствовала. Наблюдала тенденцию к снижению содержания Cu в растениях в интервале доз мелиоранта $0\text{--}2.0 H_r$ (табл. 2). Содержание Cu в органах растений ячменя можно характеризовать как равномерное, мг/кг: колос — 1.3 ± 0.3 , солома, корни — 1.5 ± 0.7 (табл. 3). Вероятно, отсутствие выраженного эффекта последействия известкования

на содержание Cu в растениях обусловлено низким содержанием элемента в почве.

Кадмий — один из самых опасных экотоксикантов внешней среды, в организм человека поступает в основном с продуктами растительного происхождения. Достоверные доказательства эссенциальности Cd для человека и животных отсутствуют. Это кумулятивный яд, который может вызывать острое и хроническое отравление [19–22].

Кадмий характеризуется как элемент высокой биологической доступности для растений. В отличие от большинства других тяжелых металлов, он способен накапливаться в генеративных органах (зерне) до опасных уровней концентраций. Содержание Cd в растениях зависит от его содержания в почве, физико-химических свойств почвы и видовых и сортовых особенностей растений. Реакция почвы, наряду с видовыми особенностями растений, считается одним из основных факторов, определяющих распределение Cd в системе почва–растение. По данным [23–26], известкование кислых почв может привести к загрязнению кадмием зерновых культур, даже при низком (кларковом) уровне содержания элемента в почве.

Содержание подвижных соединений Cd в почве опыта варьировалось в диапазоне 0.019 ± 0.007 мг/кг (коэффициент вариации $v = 37\%$). Минимальное содержание подвижного Cd в почве соответствовало величинам рН 5.9 и 6.4. Наблюдала тенденцию к снижению содержания подвижных соединений Cd в почве в интервале доз ДМ $0\text{--}2.0 H_r$ ($r = 0.465$ при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576) (табл. 1).

Таблица 3. Влияние последействия возрастающих доз ДМ на содержание Cu, Cd, Pb и Fe в растениях ячменя (через 9 лет после внесения мелиоранта), мг/кг абсолютно сухого вещества

Вариант	Колос				Солома				Корни			
	Cu	Cd	Pb	Fe	Cu	Cd	Pb	Fe	Cu	Cd	Pb	Fe
1. Контроль	1.3	0.09	0.6	88.6	1.5	0.06	1.0	128.8	1.3	0.14	<0.10	2400
2. ДМ $0.2 H_r$	1.1	0.06	1.0	75.3	3.6	0.09	1.3	106.2	1.4	0.21	1.31	1690
3. ДМ $0.3 H_r$	1.8	0.07	1.1	76.4	1.8	0.14	1.4	98.0	2.1	0.41	<0.10	2210
4. ДМ $0.4 H_r$	1.3	0.05	2.0	78.7	1.4	0.15	1.4	72.8	1.4	0.29	<0.10	2310
5. ДМ $0.5 H_r$	1.4	0.08	1.5	77.0	1.3	0.13	0.8	71.8	2.4	0.48	<0.10	1870
6. ДМ $0.6 H_r$	1.2	0.02	1.6	67.7	1.2	0.15	0.5	53.0	2.3	0.36	<0.10	2490
7. ДМ $0.7 H_r$	1.9	0.09	3.6	85.7	0.8	0.19	<0.1	52.1	1.7	0.48	0.55	1960
8. ДМ $0.8 H_r$	1.5	0.19	1.9	68.5	1.2	0.23	0.6	59.5	0.2	0.50	1.20	1680
9. ДМ $0.9 H_r$	1.3	0.14	2.0	67.0	1.3	0.24	<0.1	53.7	2.4	0.36	1.28	2870
10. ДМ $1.0 H_r$	0.8	0.14	1.7	71.6	1.0	0.21	<0.1	68.3	<0.1	0.38	0.71	2590
11. ДМ $1.5 H_r$	0.9	0.09	0.8	76.7	0.9	0.15	<0.1	68.6	0.9	0.36	0.54	1930
12. ДМ $2.0 H_r$	1.3	0.17	2.0	64.8	1.9	0.09	1.1	64.5	0.7	0.32	<0.10	3180

По убыванию содержания Cd (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: корни (0.36 ± 0.11) > солома (0.15 ± 0.06) > колос (0.1 ± 0.05) (табл. 3).

Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимость содержания Cd в органах растений ячменя от дозы ДМ и реакции почвы в интервале доз мелиоранта 0–2.0 H_r , представлены в табл. 2. Выявлено, что в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r (рН_{KCl} почвы 5.2–6.4 ед. (табл. 1)) увеличение содержания Cd в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза (табл. 3). В соломе и корнях растений ячменя содержание Cd линейно возрастало в интервалах доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$) и 0–0.8 H_r ($r = 0.872$) соответственно, затем несколько снижалось (табл. 2, 3). Максимальное содержание Cd в колосе и корнях соответствовало дозе ДМ 0.8 H_r (рН почвы 5.2 ед. (табл. 1)). МДУ Cd для грубых и сочных кормов и зернофуража составляет 0.3 мг/кг [27].

Ранее в условиях данного эксперимента было установлено [4], что через 3 года после внесения ДМ в интервале доз 0–2.0 H_r содержание Cd в зерне ячменя сорта Ленинградский линейно возрастало ($r = 0.857$ при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576), при внесении ДМ в дозах 1.0 и 2.0 H_r содержание Cd в зерне превысило содержание в контроле в 5.4 и 10.0 раз соответственно.

Содержание подвижных соединений Pb в почве вариантов 1–12 (9-й год последействия ДМ) варьировалось в диапазоне 0.08 ± 0.07 мг/кг (коэффициент вариации $v = 88\%$) (табл. 1). Коэффициенты корреляции (r), характеризующие зависимости содержания подвижных соединений Pb в почве от дозы ДМ и реакции почвы (в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r), составили соответственно 0.744 и –0.783 (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости = 0.576) (табл. 2). Резкое снижение содержания подвижных соединений Pb наблюдали при рН почвы >5.0 ед., что соответствовало интервалу доз ДМ 0.6–2.0 H_r (табл. 1).

Известно [13], что при взаимодействии известковых мелиорантов с почвой растворимость Pb снижается: при высоких уровнях рН происходит его осаждение в виде гидроксида, фосфата, карбоната, а также создаются благоприятные условия для образования Pb-органических комплексов.

Свинец – канцероген и тератоген. Роль Pb в жизнедеятельности организма человека изучена недостаточно, однако известно, что он участвует в обменных процессах костной ткани, а основной путь поступления в организм – через желудочно-кишечный тракт [15]. Имеются данные о стимулирующем действии низких концентраций $Pb(NO_3)_2$ на рост растений [13]. Диапазон нормальных концентраций Pb в растениях (мг/кг

сухого вещества), варьируется в пределах 0.1–5.0 [28], МДУ Pb для грубых и сочных кормов и зернофуража составляет 5.0 мг/кг [27].

По убыванию среднего в вариантах содержания свинца (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд (табл. 3): колос (1.6 ± 0.8) > солома (0.7 ± 0.5) ≥ корни (0.5 ± 0.5).

В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание Pb в колосе и соломе растений ячменя слабо зависело от дозы мелиоранта и реакции почвы, в корнях не зависело от указанных показателей (табл. 2). Однако следует отметить тесную положительную корреляционную связь ($r = 0.821$) между дозой ДМ и содержанием Pb в колосе в интервале доз 0–0.7 H_r (табл. 3), что соответствовало интервалу величин рН_{KCl} 4.2–5.1 (табл. 1). Известно [13], что некоторые факторы (например, низкий рН почв, низкое содержание P в почве, присутствие органических лигандов) способствуют поглощению Pb корнями или перемещению его в надземные органы растений.

В заключение следует отметить, что эффективность известкования как приема снижения поступления в культурные растения такого опасного экотоксиканта, как свинец, будет зависеть от физико-химических свойств почвы, гранулометрического состава и уровня ее плодородия, дозы известкового мелиоранта и продолжительности его взаимодействия с почвой, а также в значительной степени – от видовых и сортовых особенностей растений.

ВЫВОДЫ

Известкование кислых дерново-подзолистых почв оказывало длительное последствие на микроэлементный состав сельскохозяйственных культур. Эффект зависел от дозы и продолжительности контакта известкового мелиоранта с почвой, видовых особенностей растений и свойств химических элементов. От свойств химических элементов существенно зависело также их распределение в органах растений.

В условиях многолетнего микрополевого эксперимента установлен выраженный эффект длительного последствия доломитовой муки (ДМ) через 9 лет после внесения мелиоранта на элементный состав растений ячменя. Выявлено, что из тестируемых микроэлементов (Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb) наиболее чувствительными к изменению кислотно-основных свойств почвы были Zn и Mn, содержание которых в органах растений ячменя достоверно линейно снижалось в интервале доз ДМ 0–2.0 H_r , существенным было последствие даже минимальной дозы ДМ (0.2 H_r). На 9-й год после внесения ДМ в дозе 1.0 H_r содержание в колосе, соломе и корнях цинка снизилось по отношению

к контролю на 46, 77 и 29% соответственно, марганца — на 65, 69 и 52%.

Достоверного влияния последействия доломитовой муки на содержание Си в растениях ячменя не выявлено. Содержание элемента в органах растений можно характеризовать как равномерное: в колосе — 1.3 ± 0.3 , соломе, корнях — 1.5 ± 0.7 мг/кг.

Железо преимущественно накапливалось в корнях растений ячменя. В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r наблюдали тенденцию к снижению содержания Fe в соломе и колосе ($r = -0.572$ и -0.570 соответственно, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости, равной 0.576). Максимальное снижение по отношению к контролю содержания Fe в колосе составило 27% (доза ДМ 2.0 H_r), в соломе — 55% (доза ДМ 0.7 H_r).

Полученные данные подтвердили, что известкование может приводить к увеличению содержания Cd в зерновых культурах: в интервале доз ДМ 0.8–2.0 H_r увеличение содержания элемента в колосе по отношению к контрольному варианту опыта достигало 1.6–2.0 раза, а в соломе линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.0 H_r ($r = 0.945$). Максимальное содержание Cd в колосе и корнях соответствовало дозе ДМ 0.8 H_r (рН почвы 5.2 ед.).

По убыванию среднего в вариантах содержания свинца (мг/кг) органы растений ячменя располагались в ряд: колос (1.6 ± 0.8) > солома (0.7 ± 0.5) ≥ корни (0.5 ± 0.5). В интервале доз ДМ 0–2.0 H_r содержание свинца в колосе и соломе растений ячменя слабо зависело от дозы мелиоранта и реакции почвы, в корнях не зависело от указанных показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шильников И.А., Сычёв В.Г., Зеленов Н.А., Аканова Н.И., Федотова Л.С. Известкование как фактор урожайности и почвенного плодородия. М.: ВНИИА, 2008. 340 с.
2. Булатова Н.В., Чеботарёв Н.Т., Регорчук Н.В. Влияние длительного последействия извести и внесения минеральных удобрений на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы и продуктивность многолетних трав // Перм. аграрн. вестн. 2018. № 3(23). С. 35–41.
3. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Шаврина К.Ф. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на кислотно-основные свойства дерново-подзолистой почвы // Агрохимия. 2016. № 7. С. 3–11.
4. Витковская С.Е. Методы оценки эффективности и экологической безопасности химических мелиорантов. СПб.: АФИ, 2017. 76 с.
5. Тармаева И.Ю., Боева А.В. Минеральные вещества, витамины: их роль в организме. Проблемы микронутриентной недостаточности: учеб. пособ. Иркутск: ИГМУ, 2014. 89 с.
6. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород: учеб. пособ. Пермь: Перм. ГСХА, 2009. 30 с.
7. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф., Яковлев О.Н. Продуктивность растений ячменя и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение при нейтрализации почвенной кислотности доломитовой мукой // Агрохимия. 2020. № 1. С. 50–57.
8. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние известкования дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы доломитовой мукой на урожайность сельскохозяйственных культур (результаты многолетнего микрополевого эксперимента) // Агрохимия. 2022. № 4. С. 52–59.
9. Витковская С.Е., Яковлев О.Н., Оглуздин А.С., Дубовицкая В.И. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на поведение тяжелых металлов в системе почва–растение // Пробл. агрохим. и экол. 2014. № 3. С. 31–34.
10. Витковская С.Е., Яковлев О.Н. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение марганца и железа в системе почва–растение // Агрохимия. 2017. № 11. С. 44–51.
11. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка, кальция и магния в растениях овощных бобов // Мат-лы IV Междунар. научн.-практ. конф. молод. ученых “Актуальные вопросы наук о Земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств”. Ч. 2. Гомель, 2018. С. 151–154.
12. Возбуцкая А.Е. Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. 3-е изд. испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 426 с.
13. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 439 с.
14. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на распределение цинка в системе “дерново-подзолистая почва–растения озимой ржи” // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4–12.
15. Радыш И.В., Скальный А.В., Нотова С.В., Маршинская О.В., Казакова Т.В. Введение в элементологию: учеб. пособ. Оренбург: ОГУ, 2017. 183 с.
16. Бурдуковский М.Л. Влияние длительной химизации почв юга Дальнего Востока на биологический круговорот и содержание макро- и микроэлементов: Дис. ... канд. биол. наук. Владивосток, 2014. 134 с.
17. Гальченко А.В., Назарова А.М. Эссенциальные микро- и ультрамикроэлементы в питании вегетарианцев и веганов. Ч. 1. Железо, цинк, медь, марганец // Микроэл-ты в медицине. 2019. Т. 20(4). С. 14–23.
18. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель

- сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформартех, 2003. 240 с.
19. *Оберлис Д., Харланд Б., Скальный А.* Биологическая роль макро- и микроэлементов у человека и животных / Под ред. А.В. Скального. Пер. с англ. Оренбург, 2018. 658 с.
 20. *Каплин В.Г.* Основы экотоксикологии. М.: КолосС, 2006. 232 с.
 21. *Исидоров В.А.* Введение в химическую экотоксикологию. Учеб. пособ. СПб.: Химиздат, 1999. 144 с.
 22. *Кожина Л.Ф.* Металлы подгруппы цинка и их соединения. Учеб.-метод. пособ. для студентов направления подготовки "Педагог. образ-е", профиль "Химия". Саратов, 2018. 49 с.
 23. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в агроландшафте. СПб.: ПИЯФ РАН, 2008. 216 с.
 24. *Алексеев Ю.В., Литвинович А.В., Маслова А.И.* Экологическая проблема, возникающая при известковании почв в зерновых севооборотах // Продукционный процесс растений: теория и практика эффективного и ресурсосберегающего управления. Тр. Всерос. конф. с междунаро. участием. СПб.: АФИ, 2009. С. 207–211.
 25. *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.
 26. *Титов А.Ф., Казнина Н.М., Таланова В.В.* Устойчивость растений к кадмию (на примере семейства злаков): учеб. пособ. Петрозаводск: Карел. НЦ РАН, 2012. 55 с.
 27. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М., 1987. 4 с.
 28. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.

Long-Term Effects of Liming Sod-Podzolic Soil by Dolomite on the Microelement Composition of Plants *Hordeum* L.

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#}

^aRussian State Hydrometeorological University,
Voronezhskaya ul. 79, Saint-Petersburg 192007, Russia

^bAgrophysics Research Institute,
Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

[#]E-mail: s.vitkovskaya@mail.ru

In a long-term precision microfield experiment, the effect of liming acidic sod-podzolic light loamy soil with dolomite flour (DF, dose range 0–2.0 H_a , 9th year of the aftereffect) on the soil reaction, the content of mobile compounds Zn, Cu, Mn, Fe, Cd, Pb in the soil, and the trace element composition of barley plants (*Hordeum* L.) was studied. It was revealed that the most sensitive to changes in the acid-base properties of the soil were Zn and Mn, the content of which in the organs of barley plants significantly decreased linearly in the dose range of DF 0–2.0 H_a . The consequence was significant even at the minimum dose of DF (0.2 H_a). There was a tendency to a decrease in the Fe content in straw and ear of plants ($r = -0.572$ and -0.570 , respectively) in the indicated dose range. The data obtained confirmed that precipitation can lead to an increase in the Cd content in grain crops: in the dose range of DF 0.8–2.0 H_a , the increase in the element content in the ears of plants relative to the control variant of the experiment reached 1.6–2.0 times, and in straw increased linearly in the dose range of DM 0–1.0 H_a ($r = 0.945$), the content of Cu and Pb in barley plants was weakly dependent on the dose of liming agent.

Keywords: sod-podzolic soil, liming, dolomite flour, aftereffect, barley plants, microelement composition of plants, soil reaction.