

УДК 631.559:633.16:631.811:631.415.1:631.821

ПРОДУКТИВНОСТЬ РАСТЕНИЙ ЯЧМЕНЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЦИНКА, КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ В СИСТЕМЕ ПОЧВА–РАСТЕНИЕ ПРИ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ПОЧВЕННОЙ КИСЛОТНОСТИ ДОЛОМИТОВОЙ МУКОЙ

© 2020 г. С. Е. Витковская^{1,2,*}, К. Ф. Шаврина¹, О. Н. Яковлев¹

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

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

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

Поступила в редакцию 21.03.2019 г.

После доработки 15.04.2019 г.

Принята к публикации 10.10.2019 г.

В многолетнем микрополевом эксперименте установлено, что в интервале доз доломитовой муки 0–0.9 H_r урожайность зерна, соломы и половы ячменя линейно возрастала. Установлена тесная корреляционная связь между величинами дозы мелиоранта и соотношения зерно : солома ($r = 0.925$). Выявлено, что при известковании дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой конкурентные взаимодействия Mg–Zn в системе почва–растение проявлялись интенсивнее, чем взаимодействия Ca–Zn. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы мелиоранта, возрастанием pH и увеличением содержания обменных соединений Ca^{2+} , Mg^{2+} в почве. Содержание Mg в зерне, соломе и полове ячменя линейно возрастало в интервале доз доломитовой муки 0–1.5 H_r , а содержание Ca практически не зависело от дозы.

Ключевые слова: ячмень, продуктивность, взаимодействие цинка, кальция, магния, почвенная кислотность, нейтрализация, доломитовая мука.

DOI: 10.31857/S0002188120010135

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к взаимодействию макро- и микроэлементов-аналогов при переходе из почвы в растения направлен на решение экологических и методических задач, связанных с управлением качеством продукции растениеводства. Химическое сродство элементов-аналогов предопределяет сходство их биологического поведения в системе почва–растение: интенсивность сорбции почвой и растениями микро- и ультрамикроэлементов зависит от интенсивности сорбции макроэлемента-аналога [1, 2].

Цинк, кальций и магний, элементы II группы периодической системы химических элементов – неполные химические аналоги. Поглощение Zn растениями должно зависеть от концентрации и распределения Ca и Mg в среде. Так как Ca и Mg относятся к основным элементам питания растений, то его химические аналоги, относящиеся к жизненно важным элементам или/и представля-

ющие опасность для здоровья человека, требуют особого внимания.

Цинк относится к числу эссенциальных (жизненно необходимых) химических элементов [3]. Среднее содержание Zn в поверхностных слоях различных почв изменяется в пределах 17–125 мг/кг. При дефиците Zn подавляется деление клеток, накапливаются редуцирующие сахара, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, увеличивается накопление органических кислот, снижается содержание ауксина, нарушается синтез белка [4, 5]. Цинк поступает в растения как катион Zn^{2+} или в форме хелатных соединений через корни и листья. Признаком недостатка Zn у зерновых культур являются мелколистность и крайчатый хлороз [6].

Цинк – один из важнейших микроэлементов в организме человека. Он входит в состав более двухсот ферментов и гормонов, участвует в основных жизненных процессах: кроветворения, обмене углеводов, жиров и белков, энергетиче-

ских и редокс-процессах. Этот элемент обнаружен в гипофизе и половых железах, т.е. участвует в процессах размножения, роста и развития. Как недостаток, так и избыток цинка в организме приводит к заболеваниям: анемии, сахарному диабету, нефриту, циррозу печени и другим. Содержание цинка в организме человека составляет 2–3 г, в том числе в крови 0.8–0.9 г, а также в железах внутренней секреции, в мышцах, в печени. Суточная потребность в цинке равна 15–20 мг [7]. Известкование кислых почв может приводить к дефициту Zn для растений, а также рассматривается как прием снижения поступления элемента в растении при повышенном содержании в почвах [8].

Существует взаимосвязь между содержанием Ca, Mg и Zn в растениях [9]. В полевом эксперименте установлено [10], что содержание Zn в зерне, соломе и соломе озимой ржи линейно снижалось с увеличением содержания обменного кальция в почве. Выявлено, что конкурентные взаимодействия Mg–Zn в системе почва–растение проявлялись интенсивнее, чем взаимодействия Ca–Zn.

Цель работы – в многолетнем микрополевым эксперименте установить влияние возрастающих доз доломитовой муки (ДМ) на продуктивность растений ячменя и распределение Zn, Ca и Mg в системе почва–растение, выявить закономерности конкурентного взаимодействия указанных элементов-аналогов при переходе из почвы растения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Влияние возрастающих доз ДМ на продуктивность растений ячменя (*Hordeum L.*) и взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение изучали в условиях многолетнего микрополевого эксперимента, заложенного в мае 2012 г. в Меньковском филиале Агрофизического института в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина 25 см, $\approx 300 \text{ кг}$ почвы/сосуд) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве [11, 12]. Перед закладкой опыта из каждой деланки (сосуда) была вынута почва на глубину пахотного слоя (25 см). По периметру деланок размещали полиэтиленовые сосуды без дна, которые наполняли кислой дерново-подзолистой почвой ($\approx 300 \text{ кг}$ почвы/сосуд): $\text{pH}_{\text{KCl}} 4.64 \pm 0.04$, $H_r - 4.11 \pm 0.08$, Ca^{2+} , $\text{Mg}^{2+} - 2.68 \pm 0.14$ и 0.36 ± 0.06 1/2 ммоль/100 г соответственно. Схема опыта, варианты: 1 – контроль, 2 – фон + ДМ 0.2 H_r , 3 – фон + ДМ 0.3 H_r , 4 – фон + ДМ 0.4 H_r , 5 – фон + ДМ 0.5 H_r , 6 – фон + ДМ 0.6 H_r , 7 – фон +

+ ДМ 0.7 H_r , 8 – фон + ДМ 0.8 H_r , 9 – фон + ДМ 0.9 H_r , 10 – фон + ДМ 1.5 H_r . Размещение деланок систематическое, 2-рядное, без повторностей. Фон – минеральные удобрения (АФК и N_{aa}) – вносили ежегодно в каждый сосуд. Доза ДМ ($\text{CaCO}_3 - 50.4$, $\text{MgCO}_3 - 48.9\%$) по 1 H_r составляла 5.54 т/га. Смешанные почвенные пробы отбирали 2 раза в год из каждого сосуда тростевым буром: 1-й отбор до внесения удобрений и мелиоранта – 22 мая 2012 г., далее – через 63, 359, 414, 713, 841 сут после закладки опыта. В период наблюдения в опыте выращивали следующие сельскохозяйственные культуры: викоовсяную смесь (2012 г.), рапс (2013 г.), овощные бобы (2014 г.).

В 2015 г. опытной культурой был ячмень сорта Ленинградский. Посев и внесение минеральных удобрений проводили 5 мая (500 семян/деланку или м^2). Минеральные удобрения (нитроаммофоска (15:15:15) и аммиачная селитра) были внесены в дозе N120P100K100. Суммарная за 2012–2015 гг. доза внесенных минеральных удобрений составила N330P250K250. Почвенные пробы отбирали до внесения удобрений 5 мая.

В процессе вегетации растений ячменя определяли динамику высоты растений – 10 замеров за вегетацию (через 15, 22, 28, 35, 42, 49, 56, 70, 77 и 84 сут после посева), объем выборки – 30 растений. Уборку урожая проводили в фазе восковой спелости, через 87 сут после посева. Проводили сплошной учет урожая с каждой деланки.

В почве определяли pH_{KCl} – потенциометрическим методом, гидролитическую кислотность – по Каппену, содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} – согласно [13]. В почвенных и растительных пробах содержание Zn определяли атомно-абсорбционным методом. Содержание подвижных соединений Zn в почве определяли в вытяжке ААБ $\text{pH} 4.8$, содержание кислоторастворимых соединений устанавливали после химического разложения проб 5M HNO_3 . Повторность измерений трехкратная. Математическую обработку данных проводили в программе ORIGIN 7.5.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полевые эксперименты, схемы которых включают широкий диапазон доз мелиоранта, позволяют установить зависимости доза–ответ, количественно характеризующие влияние мелиоранта на параметры плодородия почвы, продуктивность и элементный состав сельскохозяйственных культур. Влияние возрастающих доз ДМ на рост и развитие растений ячменя оценивали по следующим критериям: всхожесть (%), скорость

увеличения высоты растений (см/сут), биомасса зерна, соломы и половы (т/га), соотношение массы зерно : солома. Всхожесть растений ячменя в вариантах опыта, установленная через 10 сут после посева, изменялась от 86 ± 5 до $94 \pm 6\%$ и не зависела от дозы мелиоранта. Коэффициенты вариации (v) данного показателя не превышали 2–10% (для расчета величины v (%) использовали показатели всхожести в каждом рядке (10 рядков в варианте)).

Динамику высоты растений изучали в период от 0 до 81 сут с момента высева семян (10 замеров за вегетацию). Для описания указанного процесса хорошо логистическая (сигмоидная) модель [14, 15]:

$$H(t) = \frac{H_1 - H_2}{1 + e^{(t-t_0)/dt}} + H_2,$$

где H_1 – начальная высота, см (равна нулю), H_2 – максимальная высота растений (см), t_0 – точка перегиба, в момент которой $H = 1/2(H_1 + H_2)$, dt – крутизна кривой (угол наклона) – постоянная величина для данной кривой. Скорость роста в высоту (см/сут) достигала максимума в момент $t = t_0$. Отношение $(H_2 - H_1)/4dt$ характеризовало скорость на момент времени t_0 (максимальную), см/сут (V_{max}) (табл. 1).

Установлено, что величина V_{max} , характеризующая рост растений ячменя в высоту, не зависела от дозы ДМ, варьировалась в пределах 2.6–2.8 см/сут. Полученные в ходе исследования величины V_{max} практически совпадали с показателями для указанной сельскохозяйственной культуры, установленными ранее [15].

Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя районированного сорта Ленинградский представлено в табл. 2. Максимальная урожайность зерна, отмеченная в интервале доз ДМ 0.5–0.9 H_T , варьировалась в пределах 4.5–4.9 т/га, что на 29–39% больше, чем в контрольном варианте. Известно [16], что максимальный урожай ячменя данного сорта (5.24 т/га), был получен в Ленинградской обл. в 2006 г.

Влияние ДМ в дозах 0.5–0.6 H_T на урожайность зерна ячменя было практически идентично влиянию доз 0.8–0.9 H_T . При внесении ДМ в дозе 1.5 H_T наблюдали снижение биомассы ячменя: прибавка урожая зерна по отношению к контролю не превысила 11% [8]. В интервале доз мелиоранта 0–0.9 H_T зависимости урожайности зерна, соломы и половы ячменя от дозы характеризовались коэффициентами корреляции (r) 0.830, 0.606 и 0.760, соответственно (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна 0.666).

Таблица 1. Параметры логистической модели, характеризующие динамику высоты растений ячменя

Вариант	r^2	H_1 , см	H_2 , см	t_0 , сут	dt	V_{max} , см/сут
1. Контроль	0.98	0	94 ± 5	46 ± 2	9.2 ± 1.5	2.6
2. ДМ 0.2 H_T	0.98	0	96 ± 5	46 ± 2	8.5 ± 1.4	2.8
3. ДМ 0.3 H_T	0.98	0	96 ± 4	45 ± 2	8.6 ± 1.4	2.8
4. ДМ 0.4 H_T	0.98	0	97 ± 4	44 ± 2	9.2 ± 1.3	2.6
5. ДМ 0.5 H_T	0.98	0	99 ± 4	45 ± 2	8.7 ± 1.3	2.8
6. ДМ 0.6 H_T	0.99	0	98 ± 4	45 ± 1	8.8 ± 1.2	2.8
7. ДМ 0.7 H_T	0.99	0	98 ± 4	46 ± 2	8.8 ± 1.2	2.8
8. ДМ 0.8 H_T	0.98	0	99 ± 5	45 ± 2	8.8 ± 1.4	2.8
9. ДМ 0.9 H_T	0.98	0	100 ± 5	45 ± 2	8.9 ± 1.4	2.8
10. ДМ 1.5 H_T	0.99	0	94 ± 4	45 ± 1	8.8 ± 1.2	2.7

Таблица 2. Влияние возрастающих доз ДМ на урожайность растений ячменя, т/га [8]

Вариант	Зерно	Солома	Полова	Зерно : солома
1. Контроль	3.49	3.97	0.71	0.88
2. ДМ 0.2 H_T	4.37	4.55	0.83	0.96
3. ДМ 0.3 H_T	4.29	4.69	0.82	0.91
4. ДМ 0.4 H_T	4.19	4.26	0.79	0.98
5. ДМ 0.5 H_T	4.70	4.63	0.85	1.01
6. ДМ 0.6 H_T	4.87	4.84	0.86	1.00
7. ДМ 0.7 H_T	4.52	4.44	0.81	1.01
8. ДМ 0.8 H_T	4.74	4.75	0.93	1.00
9. ДМ 0.9 H_T	4.76	4.62	0.86	1.03
10. ДМ 1.5 H_T	3.86	3.51	0.67	1.10

Установлена тесная корреляционная связь между дозой ДМ и соотношением массы зерно : солома в урожае ячменя ($r = 0.925$, при критической величине r на 5%-ном уровне значимости равной 0.632).

При известковании кислых почв доломитовой мукой изменение кислотно-основных свойств почвы, насыщение ППК кальцием и магнием приводит к усилению конкурентных взаимодействий в системе почва–растение между указанными химическими элементами и другими ионами, присутствующими в почвенном растворе. Влияние возрастающих доз ДМ на содержание Са, Mg и Zn в растениях ячменя характеризуют экспериментальные данные, представленные в табл. 3. Содержание Zn в зерне, соломе и половине ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ (табл. 4). Внесение повышенной (1.5 H_T) дозы

Таблица 3. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание цинка (мг/кг), кальция и магния (% а.с.в) в растениях ячменя

Вариант	Ca	Mg	Zn	Ca	Mg	Zn
Зерно			Солома			
1. Контроль	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.01	42 ± 2	0.50 ± 0.03	0.04 ± 0.0	10 ± 0.3
2. ДМ 0.2 Н _Г	0.08 ± 0.01	0.06 ± 0.01	32 ± 1	0.47 ± 0.03	0.06 ± 0.01	8.3 ± 0.3
3. ДМ 0.3 Н _Г	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01	29 ± 1	0.43 ± 0.01	0.06 ± 0.01	5.8 ± 0.4
4. ДМ 0.4 Н _Г	0.06 ± 0.01	0.08 ± 0.01	29 ± 1	0.37 ± 0.02	0.06 ± 0.01	6.2 ± 0.1
5. ДМ 0.5 Н _Г	0.07 ± 0.01	0.09 ± 0.01	28 ± 1	0.47 ± 0.01	0.07 ± 0.01	4.6 ± 0.5
6. ДМ 0.6 Н _Г	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	25 ± 1	0.43 ± 0.02	0.14 ± 0.0	4.4 ± 0.3
7. ДМ 0.7 Н _Г	0.09 ± 0.01	0.09 ± 0.01	23 ± 1	0.43 ± 0.01	0.10 ± 0.01	3.2 ± 0.1
8. ДМ 0.8 Н _Г	0.09 ± 0.01	0.08 ± 0.01	24 ± 1	0.43 ± 0.01	0.07 ± 0.01	3.2 ± 0.1
9. ДМ 0.9 Н _Г	0.08 ± 0.01	0.09 ± 0.01	23 ± 1	0.46 ± 0.02	0.08 ± 0.01	5.6 ± 0.5
10. ДМ 1.5 Н _Г	0.08 ± 0.01	0.11 ± 0.01	7 ± 0.5	0.46 ± 0.02	0.11 ± 0.01	2.9 ± 0.1
Полова			Корни			
1. Контроль	0.54 ± 0.02	0.22 ± 0.02	17 ± 2	0.19 ± 0.03	0.40 ± 0.02	14 ± 1
2. ДМ 0.2 Н _Г	0.57 ± 0.03	0.22 ± 0.02	9.5 ± 0.5	0.39 ± 0.02	0.82 ± 0.01	13 ± 1
3. ДМ 0.3 Н _Г	0.61 ± 0.02	0.29 ± 0.01	9.8 ± 0.5	0.36 ± 0.03	0.50 ± 0.03	11 ± 0.5
4. ДМ 0.4 Н _Г	0.59 ± 0.04	0.26 ± 0.01	9.3 ± 0.4	0.39 ± 0.02	0.45 ± 0.03	13 ± 1
5. ДМ 0.5 Н _Г	0.73 ± 0.04	0.32 ± 0.02	6.0 ± 0.5	0.45 ± 0.02	0.74 ± 0.04	11 ± 1
6. ДМ 0.6 Н _Г	0.57 ± 0.05	0.30 ± 0.01	5.8 ± 0.2	0.46 ± 0.03	0.54 ± 0.02	12 ± 1.5
7. ДМ 0.7 Н _Г	0.61 ± 0.03	0.32 ± 0.02	5.7 ± 0.4	0.41 ± 0.01	0.40 ± 0.01	12 ± 1
8. ДМ 0.8 Н _Г	0.47 ± 0.03	0.28 ± 0.02	6.7 ± 0.5	0.55 ± 0.02	0.47 ± 0.01	13 ± 1
9. ДМ 0.9 Н _Г	0.58 ± 0.04	0.30 ± 0.01	5.9 ± 0.5	0.42 ± 0.03	0.48 ± 0.02	9 ± 0.5
10. ДМ 1.5 Н _Г	0.52 ± 0.02	0.43 ± 0.04	4.3 ± 0.2	0.49 ± 0.01	0.59 ± 0.02	12 ± 0.5

мелиоранта привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и полове ячменя по отношению к контрольному варианту в 6, 3 и 4 раза соответственно. Известно [4], что среднее содержание Zn в зерне ячменя в разных странах варьируется от 15 до 51 мг/кг, содержание элемента при его дефиците оценивается в 10–20 мг/кг сухой массы. Установлено, что при внесении ДМ в дозе 1.5 Н_Г содержание Zn в зерне ячменя снизилось до 7.0 мг/кг, в остальных вариантах опыта находилось в пределах нормы.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции, характеризующие зависимости содержания Zn, Ca и Mg в растениях ячменя от дозы доломитовой муки

Зависимость	Зерно	Солома	Полова	Корни
Ca(f) = Доза ДМ	0.334	-0.093	-0.273	0.711
Mg(f) = Доза ДМ	0.887	0.604	0.903	-0.036
Zn(f) = Доза ДМ	-0.972	-0.794	-0.787	-0.468
Zn(f) = Ca	-0.236	0.394	-0.127	-0.402
Zn(f) = Mg	-0.884	-0.682	-0.745	-0.057

Содержание Mg в зерне, соломе и полове растений ячменя линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.5 Н_Г, а содержание Ca практически не зависело от дозы мелиоранта. Коэффициент корреляции (*r*), характеризующий зависимость Ca(f) = доза, в корнях растений составил 0.711 (табл. 4).

Взаимодействия Mg–Zn и Ca–Zn в вегетативных и генеративных органах растений ячменя также аппроксимирует линейная модель. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением содержания Mg, и практически не зависело от содержания Ca.

Опыт показал, что при внесении ДМ увеличение содержания Mg в растениях оказывало значительно более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca, что, вероятно, связано с соотношением содержания данных макроэлементов в почве. На момент закладки опыта содержание обменного Ca²⁺ в почве составляло 2.7 ± 0.1, обменного Mg²⁺ – 0.36 ± 0.06 $\frac{1}{2}$ ммоль/100 г, что, согласно градации почв по содержанию элементов пита-

Таблица 5. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на содержание обменных Ca^{2+} и Mg^{2+} (1/2 ммоль/100 г) и подвижных соединений Zn (мг/кг) в почве*

Вариант	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Zn
1. Контроль	3.4 ± 0.3	1.2 ± 0.02	0.66 ± 0.05
2. ДМ 0.2 H_T	3.4 ± 0.2	1.6 ± 0.05	0.67 ± 0.04
3. ДМ 0.3 H_T	3.4 ± 0.2	2.4 ± 0.1	0.47 ± 0.04
4. ДМ 0.4 H_T	3.7 ± 0.3	2.7 ± 0.1	0.57 ± 0.02
5. ДМ 0.5 H_T	3.8 ± 0.1	3.1 ± 0.2	0.31 ± 0.01
6. ДМ 0.6 H_T	4.0 ± 0.2	3.0 ± 0.2	0.39 ± 0.01
7. ДМ 0.7 H_T	4.1 ± 0.1	3.3 ± 0.3	0.32 ± 0.01
8. ДМ 0.8 H_T	4.0 ± 0.1	3.3 ± 0.3	0.36 ± 0.02
9. ДМ 0.9 H_T	4.8 ± 0.1	3.4 ± 0.2	0.34 ± 0.01
10. ДМ 1.5 H_T	4.7 ± 0.1	3.5 ± 0.1	0.29 ± 0.01

*На момент уборки опыта, 1211-е сут взаимодействия мелиоранта с почвой.

ния [17], соответствует низкому и очень низкому содержанию элементов соответственно. Известно [18], что обменного Mg^{2+} в почвах содержится в 2–8 раз меньше, чем обменного Ca^{2+} . Особенно бедны обменными основаниями кислые дерново-подзолистые почвы легкого гранулометрического состава. В почве опыта до внесения ДМ содержание Ca^{2+} превышало содержание Mg^{2+} в 7.5 ± 1.4 раза [11]. То есть, при внесении мелиоранта в почву увеличение содержания Mg^{2+} было гораздо более существенным для растений, чем увеличение содержания Ca^{2+} .

Влияние возрастающих доз ДМ на содержание обменных соединений Ca^{2+} , Mg^{2+} и подвижных соединений Zn в почве на момент уборки растений (1211-е сут взаимодействия мелиоранта с почвой) представлено в табл. 5.

Таблица 6. Коэффициенты корреляции (r)*, характеризующие взаимодействие цинка, кальция и магния в системе почва–растение

Зависимость	Зерно	Солома	Полова	Корни
Ca(почва)–Ca(растения)	0.487	0.257	–0.214	0.550
Ca(почва)–Mg(растения)	0.712	0.572	0.731	–0.150
Ca(почва)–Zn(растения)	–0.814	–0.623	–0.709	–0.612
Mg(почва)–Ca(растения)	0.207	–0.384	–	0.823
Mg(почва)–Mg(растения)	0.806	0.667	0.777	–0.117
Mg(почва)–Zn(растения)	–0.825	–0.936	–0.914	–0.668
Zn(почва)–Zn(растения)	0.770	0.905	0.836	0.673

*Критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна –0.632.

Известно [19], что растворимость и доступность растениям соединений цинка возрастает с подкислением среды. Минимальную растворимость соединений Zn отмечают при pH 5.5–6.9, дальнейшее повышение pH ведет к увеличению растворимости, т.к. Zn как амфотерный элемент образует в щелочной среде цинкаты типа $\text{Zn}(\text{ONa})_2$ (или Na_2ZnO_2). Однако в присутствии достаточных количеств Ca подвижность соединений Zn и в слабощелочной среде мала ввиду малой растворимости цинкатов кальция. Имеется информация [4], что растворимость и доступность Zn в почвах обнаруживают отрицательную корреляционную связь со степенью насыщенности кальцием. Низкое содержание доступного для растений Zn наблюдается в карбонатных почвах, особенно легкого гранулометрического состава [20].

Установлено, что в интервале доз ДМ 0–1.5 H_T на момент уборки урожая (1211-е сут взаимодействия ДМ с почвой) содержание подвижных соединений Zn линейно зависело от содержаний обменных Ca^{2+} , Mg^{2+} в почве: зависимости $\text{Zn}(f) = \text{Ca}$ и $\text{Zn}(f) = \text{Mg}$ характеризовались коэффициентами корреляции (r) –0.736 и –0.928 соответственно.

Содержание Zn в зерне, соломе, полове и корнях растений ячменя линейно снижалось с увеличением содержания обменных соединений Ca^{2+} , Mg^{2+} в почве (табл. 6), (рис. 1).

Общепринято [21], что реакция почвы оказывает наибольшее влияние на содержание цинка в растениях: в почвах с $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ 6.0 большая часть цинка находится в недоступной для растений форме, с увеличением кислотности почвы доступность Zn резко возрастает. Экспериментально установлено [22], что поглощение Zn растениями (*Zea mays* L.) значительно возросло, когда pH почвы снизился с 7.4 до 6.3.

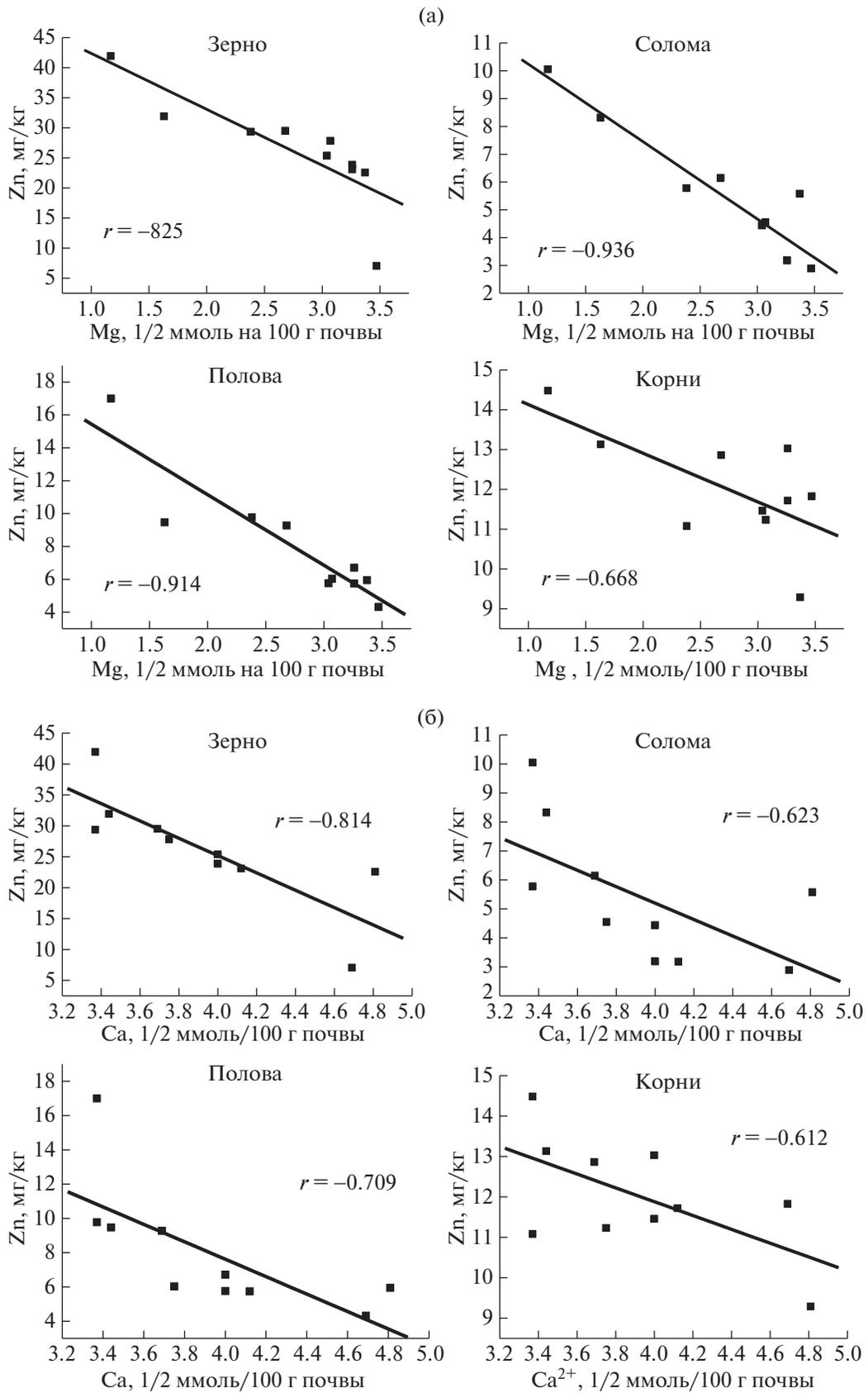


Рис. 1. Зависимость содержания цинка в растениях ячменя от содержания: (а) — обменного магния и (б) — обменного кальция в почве.

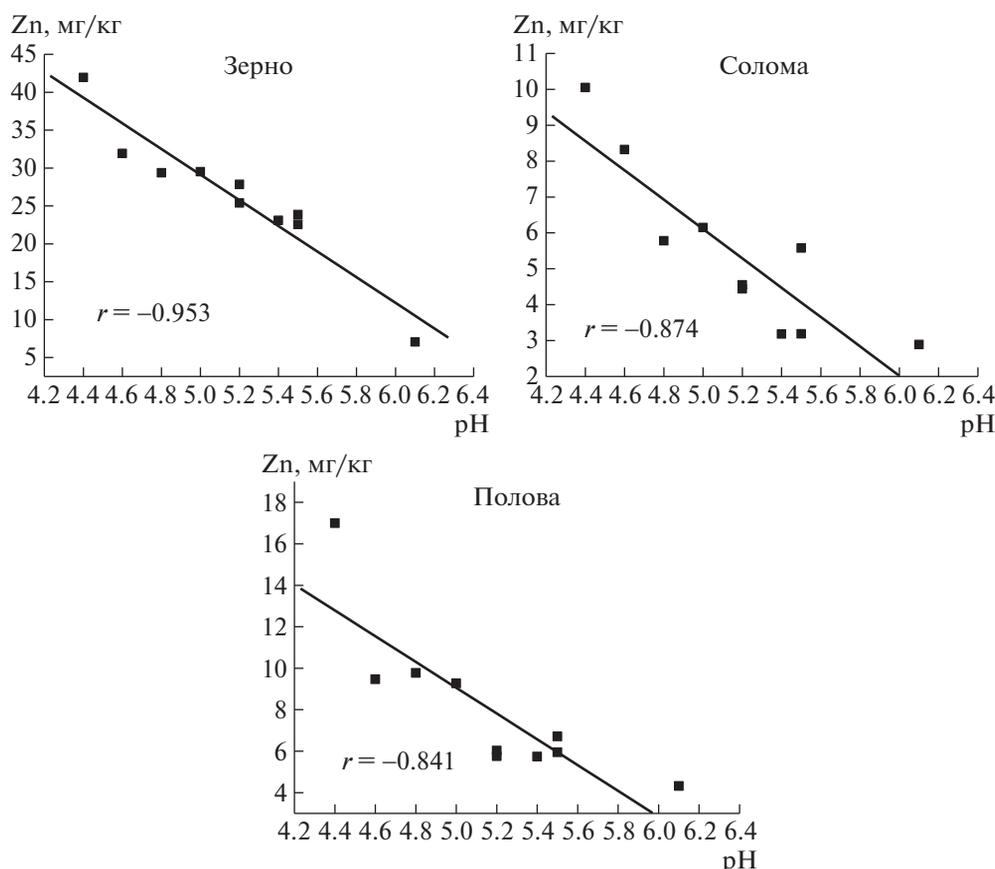


Рис. 2. Зависимость содержания цинка в растениях ячменя от величины pH_{KCl} почвы.

Опыт показал, что с увеличением pH_{KCl} почвы линейно снижалось содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя. Наиболее тесной корреляционной связью ($r = -0.953$) характеризовалась зависимость Zn(зерно)— pH (почва) (рис. 2). Коэффициент корреляции, характеризующий зависимость Zn(корни)— pH (почва) не превысил -0.496 (критическая величина r на 5%-ном уровне значимости равна -0.632).

ВЫВОДЫ

1. Для описания динамики высоты растений ячменя хорошо подходит логистическая (сигмоидная) модель. Величины максимальной скорости роста растений ячменя в высоту (V_{max}) не зависели от дозы доломитовой муки, варьировались в пределах 2.6–2.8 см/сут.

2. В интервале доз доломитовой муки (ДМ) 0–0.9 H_r урожайность зерна, соломы и полвы ячменя линейно возрастала (коэффициенты корреляции (r) были равны 0.830, 0.606 и 0.760 соответственно). Максимальная урожайность зерна ячменя установлена в интервале доз ДМ 0.5–0.9 H_r

(4.5–4.9 т/га, что на 29–39% больше, чем в контрольном варианте).

3. При известковании кислых почв доломитовой мукой изменение кислотно-основных свойств почвы, насыщение ППК кальцием и магнием приводили к усилению конкурентных взаимодействий в системе почва—растение между ионами Ca, Mg, Zn, присутствующими в почвенном растворе.

4. Содержание Zn в зерне, соломе и полове ячменя линейно снижалось с увеличением дозы ДМ, возрастанием pH почвенного раствора и увеличением содержания обменных соединений Ca^{2+} и Mg^{2+} в почве. Внесение повышенной (1.5 H_r) дозы мелиоранта привело к снижению содержания Zn в зерне, соломе и полове ячменя по отношению к контрольному варианту в 6, 3 и 4 раза соответственно.

5. Содержание Mg в зерне, соломе и полове растений ячменя линейно возрастало в интервале доз ДМ 0–1.5 H_r , содержание Ca практически не зависело от дозы мелиоранта.

6. Увеличение содержания Mg в почве и растениях при внесении ДМ оказывало более существенное влияние на содержание Zn в растениях, чем увеличение содержания Ca.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дричко В.Ф., Цветкова В.В. Сорбционная модель поступления радионуклидов из почвы в растения // Почвоведение. 1990. № 10. С. 35–40.
2. Витковская С.Е. Взаимодействие фосфора и радиосурьмы в системе почва–растение: Дис. ... канд. биол. наук, Обнинск, 1996. 171 с.
3. Исидоров В.А. Введение в химическую экотоксикологию: Уч. пособ. СПб.: Химиздат, 1999. 144 с.
4. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
5. Mousavi S.R., Galavi M., Rezaei M. The interaction of zinc with other elements in plants: a review // Inter. J. Agr. Crop Sci. 2012. V. 4(24). P. 1881–1884.
6. Вильдфлуш И.Р. Эффективность применения микроудобрений и регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур. Минск: Бел. наука, 2011. 293 с.
7. Ткаченко А.В., Маковкина Д.В., Дробышева О.М. Элемент здоровья – цинк и его определение в различных компонентах // Здоровье и образование в XXI веке. 2017. Т. 19. № 10. С. 264–266.
8. Шаврина К.Ф., Витковская С.Е. Влияние возрастающих доз доломитовой муки на распределение цинка в растениях ячменя // Мат-лы Всерос. науч. конф. с международ. участием “Агроэко-системы в естественных и регулируемых условиях: от теоретической модели к практике прецизионного управления” (с семинаром “Полужетовские чтения – 2016”), 21–23 сентября 2016 г. СПб.: АФИ, 2016. С. 382–386.
9. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю. Взаимодействие магния, кальция и калия при поступлении в молодые растения льна-долгунца // Агрохимия. 2007. № 3. С. 28–33.
10. Витковская С.Е., Шаврина К.Ф. Влияние различных доз органических и минеральных удобрений на накопление цинка растениями озимой ржи // Агрофизика. 2017. № 3. С. 4–12.
11. 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.
12. 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.
13. ГОСТ 26487-85. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. Введ. 26.03.85 // Сб. гос. стандартов. М.: Изд-во стандартов, 1985. С. 21–33.
14. Витковская С.Е., Дричко В.Ф., Хофман О.В. Оценка скорости нарастания биомассы сельскохозяйственных культур // Докл. РАСХН. 2014. № 1. С. 50–53.
15. Витковская С.Е. Закономерности формирования биомассы и элементного состава растений ячменя в полевом опыте // Агрохимия. 2015. № 1. С. 63–72.
16. ФГБНУ “Ленинградский НИИСХ Белогорка”. <http://lniish.ru/sorts/grain/leningradskiy.html>
17. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М., 2003. 195 с.
18. Воеводина Л.А., Воеводин О.В. Магний для почвы и растений // Научн. журн. Рос. НИИ проблем мелиорации. 2015. № 2(18). С. 70–81.
19. Возбуцкая А.Е. Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 429 с.
20. Ефимов В.Н., Калинин В.Г., Горлова М.Л. Применение микроэлементов при выращивании сельскохозяйственных культур (овощные, кормовые корнеплоды, многолетние травы) на почвах Северо-Запада Нечерноземной зоны РСФСР: Уч. пособ. Л.: ЛГАУ, 1991. 36 с.
21. Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах / Под ред. Зырина Н.Г. и Садовниковой Л.К. М.: Изд-во МГУ, 1985. 208 с.
22. Amrani M., Westfall D.G., Petersen G.A. Zinc plant availability as influenced by zinc fertilizer sources and zinc water-solubility // Technic. Bul. TB97-4, Agricult. Exp. Station, Department of soil and crop sciences. September. 1997. 17 p.

Productivity of Plants of Barley and Interaction of Zinc, Calcium and Magnesia in the Soil–Plant System at Neutralization of the Soil Acidity Dolomitic Flour

S. E. Vitkovskaya^{a,b,#}, K. F. Shavrina^a, and O. N. Yakovlev^a

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

^b Agrophysics Research Institute Gragdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

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

It was established under the conditions of a multiyear micro-field experiment, that in the dose range of dolomite flour 0–0.9 H_a the grain yield, straw and barley chaff increased linearly. A close correlation was established between the ameliorant dose and the grain : straw ratio ($r = 0.925$). It was revealed that during the liming of sod podzolic soil by dolomite flour, the competitive Mg–Zn interactions in the soil–plant system were manifested more intensively than the Ca–Zn interactions. The Zn content in the grain, straw, and barley of the barley decreased linearly with an increase in the ameliorant dose, a growth in pH, and an increase in the content of exchangeable compounds Ca^{2+} , Mg^{2+} in the soil. The Mg content in the grain, straw and barley ruder linearly increased in the dose range of dolomite flour 0–1.5 H_a , and the Ca content was almost independent of dose.

Key words: barley, productivity, interaction of zinc, calcium, magnesium, soil acidity, neutralization, dolomite flour.