

УДК 633.11«321»:631.445.24:631.821:57.014

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РАСТЕНИЙ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ НА КИСЛОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ, ПРОИЗВЕДСТВЕННОЙ КАЛЬЦИЙСОДЕРЖАЩИМИ ОТХОДАМИ ПРОМЫШЛЕННОСТИ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСЛОКАЦИИ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ВЕГЕТАТИВНЫЕ И ГЕНЕРАТИВНЫЕ ОРГАНЫ РАСТЕНИЙ

© 2023 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², А. О. Ковлева^{1,2}, В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург—Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

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

Поступила в редакцию 02.08.2022 г.

После доработки 09.09.2022 г.

Принята к публикации 14.10.2022 г.

В 2-х вегетационных опытах, заложенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, проведено сравнительное изучение удобрительной ценности и мелиоративных свойств тонкоизмельченных частиц доломита (ДМ), используемых для дорожного строительства, и доменного шлака (ДШ) металлургического завода. Установлено, что спустя 1 год после известкования ДМ, внесенная в эквивалентных с ДШ по нейтрализующей способности дозах, способствовала большему сдвигу pH_{KCl} и большему накоплению суммы обменных оснований $Ca^{2+} + Mg^{2+}$. По влиянию на продуктивность соломы пшеницы варианты с ДШ, внесенном в равных с ДМ количествах, не уступали последней. Влияние известкования ДМ на урожайность зерна пшеницы было более значимо, чем с ДШ. Выявлена связь между содержанием подвижных катионов $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в мелиорированной почве и продуктивностью зерна пшеницы. Разработаны эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход кальция, магния, цинка, железа и марганца в солому и зерно растений. Сделан вывод, что на первом этапе растворения мелиорантов их химическая природа была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения известковых материалов имела второстепенное значение.

Ключевые слова: химический состав растений, яровая пшеница, кислая дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, известкование, кальцийсодержащие отходы промышленности, эмпирические модели, транслокация макро- и микроэлементов, вегетативные и генеративные органы растений.

DOI: 10.31857/S0002188123010052, EDN: FEOMBE

ВВЕДЕНИЕ

В лаборатории мелиорации почв АФИ (бывшая лаборатория агроэкологических исследований ВНИПТИМ) с 1987 г. проводили исследования, направленные на установление возможности использования отходов промышленных производств в качестве удобрений и мелиорантов [1–8].

Сложившиеся в настоящее время экономические условия в сельском хозяйстве, дороговизна проведения известкования, терриконы кальцийсодержащих отходов около металлургических

предприятий и многочисленные известковые отвалы вблизи бывших и существующих карьеров по добыче щебня для дорожного строительства заставляют вернуться к этому вопросу.

К настоящему времени существуют достаточно полные представления о механизме растворения кальцийсодержащих мелиорантов в почвах. Например, при растворении известняковой муки кальций, который содержится в отдельных полисинтетических двойниковых зернах, исчезает почти полностью. Остаются реликты зерен кальцита, окруженные мелкозернистыми новообразова-

Таблица 1. Изменение кислотно-основных свойств почвы под действием возрастающих доз доломитовой муки и доменного шлака

Вариант	pH _{KCl}	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ , ммоль(экв)/100 г
Опыт 1		
1. Фон (NPK)	4.14	1.45
2. Фон + ДМ по 0.375 H _г	4.52	3.71
3. Фон + ДМ по 0.75 H _г	4.97	5.36
4. Фон + ДМ по 1 H _г	5.38	6.63
Опыт № 2		
1. Фон (NPK)	4.14	1.45
5. Фон + ДШ по 0.1 H _г	4.30	2.06
6. Фон + ДШ по 0.25 H _г	4.39	2.54
7. Фон + ДШ по 0.375 H _г	4.42	3.05
8. Фон + ДШ по 0.75 H _г	4.69	3.84
9. Фон + ДШ по 1 H _г	4.83	4.71

Примечание. ДМ — доломитовая мука, ДШ — доменный шлак. То же в табл. 2–5.

ниями Ca₃(C₆H₅O₇)₃, которые препятствуют дальнейшему растворению, но с увеличением продолжительности взаимодействия с почвой так же полностью исчезают.

Доломитовая порода, сложенная исключительно чистым доломитом — Ca,Mg(CO₃)₂ — встречается очень редко. Чаше она состоит из кальцита, магнезита и, собственно, доломита. Обычно избыток CaCO₃ образует кальциевый цемент, скрепляющий ромбоэдрические кристаллы двойного карбоната. Растворение среднего доломита — результирующая 2-х параллельно идущих процессов: 1 — растворение кальцита (или магнезита), цементирующего кристаллы двойной соли, 2 — растворение зерен собственно двойной соли. Растворимость чистого кальцита или чистого магнезита выше, чем растворимость двойной соли, поэтому избирательное растворение имеет своим результатом процесс с характерными конечными продуктами. Происходит измельчение доломита в процессе химического выветривания с образованием порошковидного доломита [9].

Результаты петрографических исследований доменных шлаков показали, что доминирующим минералом в их составе является мелинит (2CaO · MgO · 2SiO₂) · (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂), состоящий на 10% из окерманита (2CaO · MgO · 2SiO₂) и на 90% из геленита (2CaO · Al₂O₃ · SiO₂). Отмечено постепенное равномерное растворение мелинита по

трещинам по всей поверхности его соприкосновения с почвой [10].

Использование отходов в качестве мелиорантов имеет свои особенности. Каждый обладает только ему присущим набором макро- и микро-элементов. При их внесении в почву важную роль играет не только прямое увеличение концентрации примесных элементов, которые могут поглощать растения непосредственно, но и сложные процессы адсорбции, комплексообразования, ионного обмена, соосаждения между отдельными элементами, в результате чего подвижность (доступность) их для растений будет меняться. При повышении уровня обеспеченности одним элементом у растений, как правило, изменяется потребность в других.

Цель работы — изучить особенности химического состава растений яровой пшеницы, выращенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной возрастающими дозами доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева доломитовой крошки, и тонкоизмельченного доменного шлака (ДШ) металлургического предприятия.

Задачи исследования: изучить изменения кислотно-основных свойств дерново-подзолистой почвы спустя 1 год после известкования ДМ и ДШ в широком интервале доз; определить продуктивность и химический состав генеративных и вегетативных органов яровой пшеницы; выявить связь между содержанием подвижных катионов (Ca²⁺ + Mg²⁺) в мелиорируемой почве и продуктивностью зерна пшеницы; разработать эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход кальция, магния, марганца, железа и цинка в солому и зерно растений; на основе проведенных исследований дать сравнительную оценку удобрительной ценности и мелиоративных свойств известковых материалов карбонатной и силикатной природы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение проводили в 2-х параллельных вегетационных опытах. Схема опыта с ДМ (опыт 1) включала 4 варианта, с ДШ (опыт 2) — 6 вариантов. Контролем в обоих опытах служил вариант без известкования, удобренный минеральными удобрениями (табл. 1).

Выращивание растений проводили в вегетационных сосудах, вмещающих 5 кг почвы. Перед посевом почву удобряли азофоской (NPK = 16 : 16 : 16) в количестве 0.2 г д.в./кг почвы. Культура — яровая пшеница (*Triticum*) сорта Ленинградская-97. Пшеницу в опыте выращивали до полной спелости.

Таблица 2. Валовой химический состав дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, % на бескарбонатную и безгумусную почву

Потеря при прокаливании	SiO ₂	R ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	Σ
4.75	82.27	9.12	1.89	8.38	0.29	0.30	0.09	0.38	1.47	99.82

Таблица 3. Содержание элементов-загрязнителей и тяжелых металлов в доменном шлаке и доломитовой муке, мг/кг

As	Hg	Pb	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni
Доменный шлак							
0.14	0.018	27.2	9.0	4.1	1105	<0.01	11.6
Доломитовая мука							
<1.0	<0.015	9.76	1.46	8.50	Не определяли	<0.05	6.20

В опытах использовали сильноокислую дерново-подзолистую легкосуглинистую почву со следующими физико-химическими показателями: pH_{KCl} 4.1, гидролитическая кислотность (H_r) и сумма поглощенных оснований (S) — 4.75 и 1.5 ммоль(экв)/100 г почвы соответственно, гумус — 1.75%, содержание фракции <0.01 мм — 24.1%. Валовой химический состав почвы приведен в табл. 2.

В качестве мелиорантов применяли доломитовую муку, приготовленную из отсева доломита, используемого для дорожного строительства (месторождение Елизаветино, Гатчинский р-н Ленинградской обл.) и доменный шлак Череповецкого металлургического комбината.

Перед применением мелиорантов их размалывали до тонкодисперсного (порошкообразного) состояния, пропуская через сито с диаметром ячеек 0.25 мм. Нейтрализующая способность ДМ — 93, ДШ — 85%. При внесении в почву мелиоранты выравнивали по нейтрализующей способности. Доза ДМ, рассчитанная по 1 H_r , составила 12.6, ДШ — 13.8 г/сосуд. Содержание CaCO₃ в отсеве — 48.1, MgCO₃ — 36.4%, в доменном шлаке: CaO — 39.73, MgO — 19.7, SiO₂ — 38.43, Al₂O₃ — 6.7, MnO — 0.32%. Содержание примесных элементов в мелиорантах приведено в табл. 3.

ДШ Череповецкого завода является известково-силикатным, а доломитовая мука — известково-карбонатным удобрением. По содержанию тяжелых металлов, присутствующих в отходах, они не представляют угрозы загрязнения почв и растений.

Физико-химические показатели почвы устанавливали общепринятыми методами. Микроэлементный состав почв, растений и мелиорантов определяли на атомно-адсорбционном спектрофотометре. Извлечение суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ из почв проводили ацетатно-аммонийным буфером

(pH 4.8). Полученные данные обработаны методами математической статистики [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты свидетельствовали, что во всех вариантах с известкованием применение мелиорантов способствовало росту величины pH, измеренной в растворе 1 н. KCl. Чем больше была доза применения, тем показатель pH был выше. Использование одних минеральных удобрений не вызвало подкисления (табл. 1).

Эффект от применения мелиорантов карбонатной и силикатной природы был различен. Если при использовании ДМ рост pH в варианте с использованием полной дозы мелиоранта (1 H_r) достигал 5.38 ед. pH, то при применении ДШ в эквивалентной дозе величина pH_{KCl} составила 4.83 ед.

Изменение величины pH_{KCl} в мелиорированной почве коррелировало с изменением суммы поглощенных оснований Ca²⁺ + Mg²⁺. В опыте с ДМ изменения содержания составили от 1.45 (вариант NPK) до 6.63 ммоль(экв)/100 г почвы (вариант с доломитовой мукой, рассчитанной по полной дозе H_r). Коэффициент корреляции был равен $r = 0.99$. В опыте с ДШ размах изменений содержания суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ составил 1.45—4.71 ммоль(экв)/100 г почвы. Коэффициент корреляции между величинами pH_{KCl} и суммы Ca²⁺ + Mg²⁺ был равен 0.99. Таким образом, в обоих опытах в результате известкования уже в год применения был достигнут мелиоративный эффект. Использование ДМ более значимо повлияло на кислотно-основные свойства почвы. Следовательно, химическая природа мелиоранта была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения имела второстепенное значение.

Таблица 4. Продуктивность и химический состав растений яровой пшеницы

Вариант	Урожай, г/сосуд		Ca		Mg		Fe		Mn		Zn	
			%				мг/кг					
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Опыт 1												
1. Фон (NPK)	2.2	4.7	0.066	0.418	0.125	0.056	56.3	82.1	194.7	419.3	45.1	17.3
2. Фон + ДМ по 0.375 H _г	9.7	10.8	0.053	0.425	0.162	0.181	62.9	82.5	54.4	206.1	41.2	12.7
3. Фон + ДМ по 0.75 H _г	11.9	11.4	0.047	0.488	0.167	0.190	60.2	77.0	42.3	141.0	30.6	6.9
4. Фон + ДМ по 1 H _г	12.5	11.6	0.049	0.470	0.170	0.190	64.0	67.4	41.7	101.9	27.2	5.1
Опыт 2												
1. Фон (NPK)	2.2	4.7	0.066	0.418	0.125	0.056	56.3	82.1	194.7	419.3	45.1	17.3
2. Фон + ДШ по 0.1 H _г	6.0	7.3	0.047	0.403	0.145	0.092	42.9	72.9	126.6	347.7	39.3	10.6
3. Фон + ДШ по 0.25 H _г	8.8	8.7	0.058	0.407	0.130	0.078	49.3	66.1	69.1	246.5	32.9	8.6
4. Фон + ДШ по 0.375 H _г	8.4	10.0	0.048	0.433	0.147	0.091	52.8	78.7	65.5	219.7	34.5	16.0
5. Фон + ДШ по 0.75 H _г	9.2	11.8	0.051	0.435	0.140	0.150	61.4	76.7	50.6	198.4	45.4	9.0
6. Фон + ДШ по 1 H _г	9.4	12.7	0.048	0.460	0.136	0.172	55.0	81.1	40.6	185.3	25.7	7.9

Примечание. В графе 1 – зерно, 2 – солома.

Данные о влиянии известкования на урожайность и химический состав растений пшеницы приведены в табл. 4. Минимальный выход соломы растений в опытах был характерен для контрольного варианта. В вариантах, удобренных ДМ в дозах 0.375–1 H_T , урожайность соломы была в 2.3–2.5 раза больше, чем в контроле. Применение ДШ в эквивалентных с ДМ дозах было не менее эффективным.

Влияние известкования ДМ на выход зерна пшеницы оказалось более значимо, чем ДШ. Прибавки урожая в сосудах с использованием ДМ в дозах, соответствующих 0.75 и 1 H_T , были больше, чем в аналогичных вариантах со шлаком.

Эмпирическая модель (1), описывающая влияние содержания суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, мелиорированной ДМ, на урожайность зерна пшеницы имеет следующий вид:

$$y_1 = 0.4558 + 2.01x, \quad (1)$$

для доменного шлака:

$$y_2 = 1.669 + 1.93x, \quad (2)$$

где x – содержание суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, y – урожайность зерна.

Для опыта 1: $p = 0.051$ (p – value по критерию Фишера), $R^2 = 0.901$, для опыта 2: $p = 0.046$, $R^2 = 0.67$. Ожидаемое изменение показателя y при увеличении x на одну единицу в интервале измерений в опыте 1 – $v_1 = 2.01$, в опыте 2 –

$v_2 = 1.93$. График эмпирической зависимости (1) приведен на рис. 1.

Зависимости величины урожая зерна в опыте 1 и опыте 2 от содержания суммы $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве были статистически значимыми на высоком уровне значимости. Таким образом, использование мелиорантов как карбонатной, так и силикатной природы, привело к увеличению урожая зерна пшеницы. Величины ожидаемых изменений v_1 и v_2 были практически одинаковыми. На рис. 1 графики моделей (1) и (2) почти параллельны. Более высокий уровень урожая зерна, достигнутый в опыте 1, по-видимому, объясняется более высоким содержанием доступных для растений $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ в почве, мелиорированной ДМ, чем ДШ в год применения.

Разная растворимость мелиорантов в почве различных вариантов опыта неизбежно сказалась на количестве поглощенного пшеницей магния. Концентрация магния в соломе во всех изученных вариантах опыта с ДМ была больше, чем в аналогичных вариантах опыта с ДШ. При использовании ДМ в дозе 0.375 H_T содержание магния в соломе было равно 0.181% от абсолютно сухой массы растений, в варианте с эквивалентной дозой ДШ – 0.091%, т.е. в 2 раза меньше. Изменения содержания магния в вариантах опыта с ДМ составили 0.056–0.190% (разница в 3.4 раза), в вариантах с ДШ – от 0.056 до 0.172% (разница в 3.0 раза).

По мере увеличения дозы применения мелиорантов установлен рост содержания магния в со-

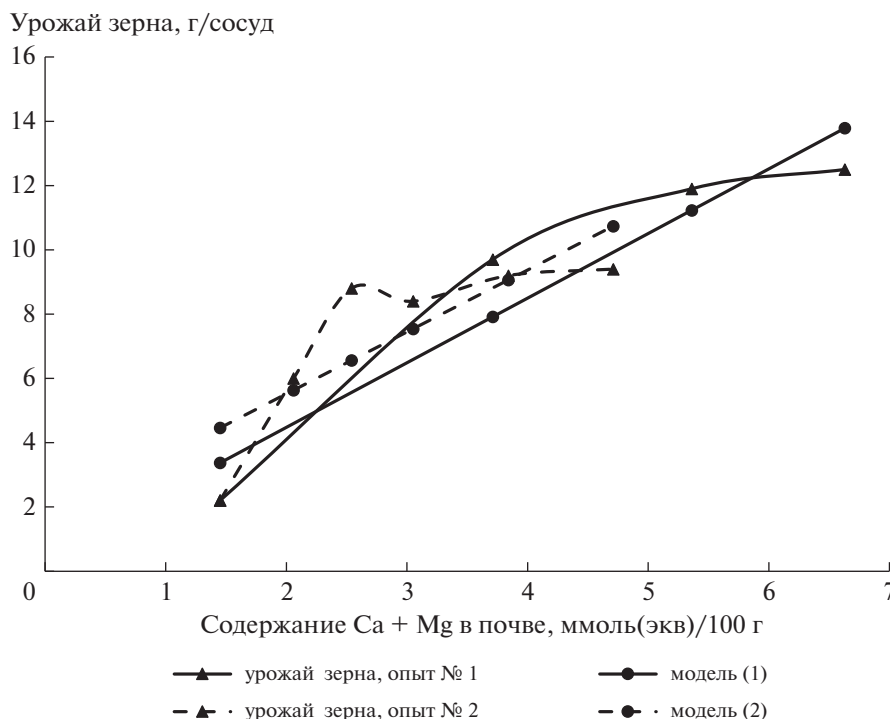


Рис. 1. Зависимость продуктивности зерна пшеницы от концентрации доступных соединений $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве.

ломе пшеницы. Статистическая значимость моделей (5) и (6), описывающих влияние дозы применения мелиорантов на переход магния в солому, в опыте с ДМ была низкой, в опыте с ДШ — высокой (табл. 5).

Изменение содержания магния в зерне пшеницы на почве, мелиорированной ДМ, составило 0.165–0.170, в опыте с ДШ — 0.125–0.147%. Разница в опыте с ДМ составила 1.03 раза, в опыте с ДШ — 1.2 раза. Таким образом, можно говорить об определенной стабильности концентрации магния в генеративных органах пшеницы.

Известно, что в растения пшеницы основная масса минеральных элементов поступает до колошения, а репродуктивные органы обеспечиваются элементами питания за счет оттока из листьев и стебля. Наряду с неодинаковой растворимостью мелиорантов, именно перераспределением магния из вегетативных органов в зерно следует объяснять низкую вариабельность его содержания в зерне пшеницы и высокую — в вегетативных органах. В этом убеждает следующее обстоятельство. Содержание магния в соломе пшеницы во всех известкованных вариантах опыта с ДМ было больше, чем в зерне. В опыте с ДШ подобная закономерность установлена только в вариантах с применением шлака в невысоких дозах (0.1–0.375 H_r). При известковании ДШ в дозе 0.75–1.0 H_r

количество магния в соломе резко возросло и было больше, чем в зерне. При этом изменение содержания магния в зерне пшеницы в вариантах опыта с известкованием низкими дозами мелиоранта и дозой, соответствующей 1 H_r , было незначительным (0.136–0.145%).

Согласно современным представлениям, формирование элементного состава растений проходит под влиянием генетически обусловленных и экологических факторов. Не все органы растений в одинаковой мере отражают через элементный состав химическую ситуацию в почве. Между элементным составом семян и вегетативных органов существует значительная разница. Содержание и соотношение основных элементов питания в семенах более постоянно. Очевидно, что химический состав генеративных органов в большей степени следует рассматривать как наследственное свойство. Можно утверждать, что растения осуществляют более жесткий генетический контроль за содержанием элементов питания в генеративных органах. Это обеспечивает нормальное функционирование растений на начальном этапе их развития.

Статистическая значимость моделей (3) и (4), описывающих влияние дозы мелиорантов на переход Mg в зерно пшеницы в опыте 1 была не высокой, в опыте 2 — низкой. Ожидаемое изменение

Таблица 5. Эмпирические модели транслокации макро- и микроэлементов в генеративные и вегетативные органы пшеницы

	Модель, №	Модель	<i>p</i> -value	<i>v</i> *	<i>R</i> ^{2**}
Опыт 1 (Mg, зерно)	3	$y_3 = 0.133 + 0.043x$	0.1	0.043	0.79
Опыт 2 (Mg, зерно)	4	$y_4 = 0.135 + 0.0048x$	0.67	0.0048	0.04
Опыт 1 (Mg, солома)	5	$y_5 = 0.087 + 0.126x$	0.15	0.126	0.71
Опыт 2 (Mg, солома)	6	$y_6 = 0.061 + 0.111x$	0.0019	0.111	0.92
Опыт 1 (Ca, зерно)	7	$y_7 = 0.063 - 0.018x$	0.1	-0.018	0.8
Опыт 2 (Ca, зерно)	8	$y_8 = 0.057 - 0.01x$	0.28	-0.01	0.278
Опыт 1 (Ca, солома)	9	$y_9 = 0.415 + 0.067x$	0.138	0.067	0.74
Опыт 2 (Ca, солома)	10	$y_{10} = 0.406 + 0.048x$	0.019	0.048	0.78
Опыт 1 (Mn, зерно)	11	$y_{11} = 160.2 - 144.8x$	0.1	-144.8	0.72
Опыт 2 (Mn, зерно)	12	$y_{12} = 141.8 - 122.7x$	0.05	-122.7	0.65
Опыт 1 (Mn, солома)	13	$y_{13} = 380.2 - 307.1x$	0.05	-307.1	0.9
Опыт 2 (Mn, солома)	14	$y_{14} = 353.7 - 204.1x$	0.03	-204.1	0.7
Опыт 1 (Fe, зерно)	15	$y_{15} = 57.7 + 5.94x$	0.23	5.94	0.58
Опыт 2 (Fe, зерно)	16	$y_{16} = 49.5 + 8.51x$	0.288	8.51	0.27
Опыт 1 (Fe, солома)	17	$y_{17} = 84.7 - 14.01x$	0.12	-14.01	0.76
Опыт 2 (Fe, солома)	18	$y_{18} = 74.5 + 4.26x$	0.59	4.26	0.07
Опыт 1 (Zn, зерно)	19	$y_{19} = 46.14 - 19.06x$	0.017	-19.06	0.96
Опыт 2 (Zn, зерно)	20	$y_{20} = 41 - 9.36x$	0.3	-9.36	0.22
Опыт 1 (Zn, солома)	21	$y_{21} = 17.25 - 12.7x$	0.006	-12.7	0.99
Опыт 2 (Zn, солома)	22	$y_{22} = 14.16 - 6.28x$	0.2	-6.28	0.36

**v* — ожидаемое изменение показателя содержания элемента питания при увеличении концентрации Ca + Mg в почве на одну единицу.

***R*² — коэффициент детерминации.

концентрации Mg в зерне пшеницы от дозы применения мелиорантов: опыт 1 — $v_3 = 0.043$, опыт 2 — $v_2 = 0.0048$; в соломе: опыт 1 — $v_5 = 0.126$, опыт 2 — $v_6 = 0.111\%$ от абсолютно сухой массы растений.

Из неравенств $v_3 = 0.043 > v_4 = 0.0048$ и $v_5 = 0.126 > v_6 = 0.111$ можно сделать вывод, что применение ДМ способствовало большему обогащению магнием как генеративных, так и вегетативных органов пшеницы, чем ДШ.

Кальций преимущественно накапливался в вегетативных органах пшеницы (табл. 4). Его концентрация в соломе менялась в зависимости от варианта опыта с ДМ от 0.418 до 0.488%. Максимальным уровнем накопления характеризовался вариант с использованием доломитовой муки в дозе 0.75 Н_г. В варианте, удобренном доломитовой мукой в полной дозе, рассчитанной по 1 Н_г, содержание кальция было меньше (0.47%). Эмпи-

рическая значимость моделей (9) и (10), описывающих влияние дозы ДМ на концентрацию кальция в соломе пшеницы, была низкой (табл. 5).

В опыте с применением ДШ наблюдали постепенный рост содержания кальция в соломе пшеницы. В большинстве вариантов с ДШ содержание кальция было меньше, чем в аналогичных вариантах с ДМ. Изменение составило от 0.403 до 0.460%. Статистическая значимость модели, описывающая зависимость накопления кальция в соломе от дозы применения ДШ, была высокой.

Содержание кальция в зерне растений было на порядок меньше, чем в соломе. Изменение концентрации в зерне в опыте с ДМ составило от 0.047 до 0.053%, в опыте с ДШ — от 0.047 до 0.058%. Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием дозы применения мелиоранта на накопление кальция в зерне пшеницы, выявить не удалось.

Реакция растений на накопление кальция в тканях при внесении доломитовой муки была выражена сильнее, чем на доменный шлак:

$$\text{abs}(v_7) = 0.018 > \text{abs}(v_8) = 0.01,$$

$$v_9 = 0.067 > v_{10} = 0.048.$$

Физиологическая роль марганца связана с его участием в окислительно-восстановительных процессах. В качестве элемента, входящего в состав ферментов, он задействован в процессах дыхания, азотном и нуклеиновых обменах. Марганец содержится в тканях всех растений, однако отдельные органы существенно различаются между собой. Известкование, в целом, приводит к осаждению в почвах доступных для растений соединений марганца [12–14].

Данные табл. 4 свидетельствуют, что марганец преимущественно накапливался в вегетативных органах растений. Максимальным уровнем накопления характеризовался вариант с использованием одних минеральных удобрений (419 мг/кг воздушно-сухой массы растений).

Вне зависимости от вида использованного мелиоранта известкование привело к снижению содержания марганца в соломе пшеницы. В большинстве изученных вариантов содержание марганца в опыте с ДМ было меньше, чем в опыте с ДШ. Размах изменений содержания в вариантах опыта с ДМ составил от 419 до 102 мг/кг абсолютно сухой массы растений, т.е. отличался в 4.1 раза, в опыте с ДШ — от 419 до 185 мг/кг. Разница составила 2.3 раза. Коэффициент корреляции между величиной содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и содержанием марганца в соломе в опыте 1 был равен $r = -0.97$, в опыте 2 — $r = -0.90$.

Эмпирические модели (13) и (14), описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на переход марганца в солому пшеницы, приведены в табл. 5.

Содержание марганца в зерне растений было меньше, чем в соломе. В зависимости от варианта в опыте с ДМ, его содержание варьировало от 41.7 до 54.4 мг/кг, т.е. различалось в 1.3 раза. В опыте с ДШ изменения составили от 40.6 до 127 мг/кг, т.е. отличались в 3.1 раза. Коэффициент корреляции между величинами содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и содержания марганца в зерне в опыте 1 был равен $r = -0.97$, в опыте 2 — $r = -0.90$. Согласно литературным данным [15], оптимальная величина содержания марганца в зерне меняется от 15–25 до 80 мг/кг сухой массы растений. Таким образом, полученные данные свидетельствовали, что изменения содержания марганца в зерне большинства вариантов с известкованием

укладывались в диапазон нормальных концентраций, позволяющих обеспечить нормальное функционирование растений пшеницы.

Сопоставление изменения содержания марганца в генеративных и вегетативных органах в опытах показало, что реакция растений на внесение ДМ оказалась сильнее, чем на ДШ:

$$\text{abs}(v_{11}) = 144.8 > \text{abs}(v_{12}) = 122.7 \text{ (в зерне)},$$

$$\text{abs}(v_{13}) = 307.1 > \text{abs}(v_{14}) = 204.1 \text{ (в соломе)}.$$

Железо — необходимый элемент для роста и развития растений. Участие железа в процессах обмена веществ в растительном организме чрезвычайно обширно и отражается на активности и характере метаболизма потребляемых растениями элементах питания. Этот элемент участвует в переносе электронов и окислительно-восстановительных реакциях, таких как окисление углеводов, восстановление сульфатов и нитратов. Большую роль играет железо в фотосинтезе растений, являясь незаменимым компонентом в составе хлоропластов [16].

Показано (табл. 4), что железо присутствовало как в генеративных, так и вегетативных органах пшеницы. Сравнительный анализ данных содержания железа в зерне и соломе растений позволил установить, что содержание железа в соломе было больше, чем в зерне. В соломе пшеницы, выращенной в опыте с ДМ, изменение его содержания в вариантах составило от 82.1 (контроль) до 67.4 мг/кг в варианте с максимальной дозой мелиоранта. В опыте с ДШ содержание железа в вариантах варьировало от 82.1 до 66.1 мг/кг абсолютно сухой массы. В зерне изменение содержания железа в опыте 1 составило от 56.3 до 62.9 мг/кг, в опыте 2 — от 42.9 до 61.4 мг/кг абсолютно сухой массы.

Согласно литературным данным [16], содержание железа в органах пшеницы, обеспечивающее нормальное функционирование растений меняется от 25 до 80 мг/кг сухой массы растений. Таким образом, содержание железа в зерне в известкованных вариантах укладывалось в оптимальный интервал, необходимый для роста и развития растений пшеницы.

Статистически значимых изменений содержания железа в среднем во всем интервале доз мелиорантов в опытах с ДМ и ДШ не происходило ни в зерне — модели (15) и (16), ни в соломе — модели (17) и (18).

Цинк играет важную роль в азотном, углеродном и фосфорных обменах. Он способствует синтезу нуклеиновых кислот и белка. При недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органиче-

ские 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. Возрастание рН почвенного раствора, а также увеличение содержания в почве обменных соединений кальция и магния способствует снижению содержания цинка в растениях.

Из всех изученных элементов цинк характеризовался наименьшим накоплением в растениях пшеницы. Вне зависимости от дозы и вида примененного мелиоранта содержание цинка в соломе растений было в 2.6–5.3 раза (опыт 1) и в 2.2–5.0 раза меньше (опыт 2), чем в зерне. Максимальным накоплением цинка характеризовались растения контрольного варианта. Известкование способствовало снижению содержания этого элемента в растениях. Коэффициент корреляции между величинами содержания $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве и Zn в растениях в опыте 1 был равен $r = 0.95$ (зерно) и $r = 0.89$ (солома), в опыте 2 – $r = 0.82$ (зерно), $r = 0.98$ (солома).

Эмпирические зависимости, описывающие переход Zn в зерно и солому пшеницы в зависимости от вида и дозы примененных мелиорантов приведены в табл. 5. Статистическая значимость моделей (19) и (21) перехода цинка в зерно и солому растений в опыте с ДМ была очень высокой, в опыте с ДШ – модели (20) и (22) – низкой. Влияние ДМ на накопление цинка в зерне и соломе пшеницы было значительно сильнее, чем ДШ:

$$\text{abs}(v_{19}) = 19.06 > \text{abs}(v_{20}) = 9.36 \text{ (зерно)},$$

$$\text{abs}(v_{21}) = 12.7 > \text{abs}(v_{22}) = 6.28 \text{ (солома)}.$$

В целом показано, что как ДМ, приготовленная из отсева доломита, так и тонкоразмолотый шлак являются высокоэффективными мелиорантами. Их использование устраняет почвенную кислотность и приводит к обогащению почвы доступными для растений соединениями кальция и магния уже в год применения. Чем больше доза внесения известковых материалов, тем мелиоративный и удобрительный эффекты больше. Силикатная форма мелиоранта (ДШ), внесенная в эквивалентной с ДМ дозах, по влиянию на почву и растения в год применения уступала ДМ.

Возникает вопрос, какова продолжительность растворения мелиорантов карбонатной и силикатной природы. В работах [17–22] было показано, что тонкоизмельченные материалы карбонатной природы довольно активно взаимодействуют с почвой. Например, спустя 1 год после мелиора-

ции доломитовой и известняковой мукой в дозе 1 H_r остаточное количество непрореагировавших карбонатов изменялось от 15.1 до 15.5% от внесенного количества, а полное растворение заканчивалось на 7-й год после известкования [18].

Растворение доменного шлака проходило медленнее. В опытах [23] продолжительность действия полной по H_r дозы металлургического шлака составила 34 года. Действие металлургического шлака на кислотность почвы было слабее, чем известняковой и доломитовой муки, продуктивность сельскохозяйственных культур была больше.

В опытах [24] проведено изучение мелиоративных свойств мелкоразмолотого доменного шлака. Установлено, что даже спустя 39 лет после применения мелкоразмолотого ДШ, он продолжал оказывать положительное действие на почву. Основываясь на данных опытов [23, 24] и в нашем случае следует ожидать длительного последствия ДШ.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, использование доломитовой муки (ДМ) и доменного шлака (ДШ) привело к росту показателя pH_{KCl} в кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве. Чем больше была доза применения мелиорантов, тем больший сдвиг величины рН достигнут в опытах. Карбонатная форма мелиоранта в год применения более значимо повлияла на изменение рН, чем силикатная форма.

2. Применение мелиорантов способствовало обогащению почвы доступными для растений катионами кальция и магния. Почва, мелиорированная доломитовой мукой спустя 1 год после применения, характеризовалась более высоким содержанием обменных оснований, чем почва, удобренная ДШ.

3. Известкование привело к росту продуктивности растений пшеницы. В вариантах, удобренных ДМ, урожай соломы пшеницы был в 2.3–2.5 раза больше, чем в контроле. Варианты с ДШ, внесенном в равных с ДМ количествах, не уступали вариантам с ДМ. Влияние известкования ДМ на урожай зерна было более значимо, чем доменного шлака. Зависимость урожайности зерна в опытах с ДМ и ДШ от содержания суммы $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в почве были статистически значимыми на высоком уровне значимости. Более высокая продуктивность зерна в опыте с доломитовой мукой объясняется большей концентрацией в почве опыта доступных для растений катионов кальция и маг-

ния, достигнутой при применении карбонатной формы мелиоранта.

4. Изменения содержания магния в соломе в вариантах опыта с ДМ составили 0.056–0.190%, разница – в 3.4 раза, в вариантах опыта с ДШ – 0.056–0.172%, разница – в 3.1 раза. В зерне, выращенном в опыте с ДМ, содержание магния варьировало от 0.125 до 0.170% (в 1.36 раза), в опыте с ДШ – 0.125–0.147% (в 1.18 раза).

5. Кальций преимущественно накапливается в вегетативных органах пшеницы. Его концентрация в соломе менялась в зависимости от вариантов опыта с ДМ от 0.418 до 0.488%. В большинстве вариантов с ДШ содержание кальция было меньше, чем в аналогичных вариантах с ДМ. Изменения составили от 0.403 до 0.460%. Содержание кальция в зерне было на порядок меньше, чем в соломе. В опыте с доломитовой мукой размах изменений установлен в интервале от 0.047 до 0.053%, в опыте с ДШ – от 0.047 до 0.058%.

6. Во всех опытах известкование способствовало уменьшению поступления марганца и цинка в растения пшеницы. Это было связано как с изменением подвижности микроэлементов при изменении реакции почвенного раствора, так и с конкурентным характером поступления марганца, цинка и $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ в корни растений.

7. В соломе пшеницы, выращенной в опыте с ДМ, изменение содержания железа в вариантах составило от 82.1 (контроль) до 67.4 мг/кг (вариант с максимальной дозой мелиоранта – 1 H_r). В опыте с ДШ накопление железа в вариантах варьировало от 82.1 до 66.1 мг/кг абсолютно сухой массы. В зерне изменение его содержания в опыте 1 составило от 56.3 до 63.9 мг/кг, в опыте 2 – от 42.9 до 61.4 мг/кг абсолютно сухой массы. Статистически значимых изменений содержания железа в среднем во всем интервале доз мелиорантов в опытах с ДМ и ДШ ни в зерне, ни в соломе не происходило.

8. Содержания Mn и Fe в тканях растений, выращенных на почве известкованных вариантов, укладывались в оптимальный диапазон для роста и развития растений пшеницы.

9. Растения осуществляли более жесткий генетический контроль за содержанием элементов питания в генеративных органах. Содержание и соотношение основных элементов питания в зерне было более постоянным.

10. Разработаны эмпирические зависимости, описывающие влияние возрастающих доз мелиорантов на транслокацию кальция, магния, железа, цинка и марганца в зерно и солому пшеницы.

11. Химическая природа мелиорантов была ведущим фактором при достижении эффекта от известкования. Степень измельчения известковых материалов имела второстепенное значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л.: Агропромиздат, 1987. 142 с.
2. Алексеев Ю.В., Вялушкина Н.И. Вопросы загрязнения почв хромом при известковании феррохромовыми шлаками // Химизация сел. хоз-ва. 1991. № 7. С. 21.
3. Алексеев Ю.В., Вялушкина Н.И., Игамбердиев В.М. Экологические аспекты известкования феррохромовым шлаком // Химизация сел. хоз-ва. 1991. № 9. С. 29.
4. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В. Накопление стабильного стронция сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистых почв конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 9. С. 80–88.
5. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Бирюков В.А. Разложение конверсионного мела в дерново-подзолистой почве в связи с угрозой ее загрязнения стабильным стронцием // Агрохимия. 2001. № 11. С. 64–68.
6. 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.
7. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Витковская С.Е. Экологические аспекты известкования почв конверсионным мелом // Плодородие. 2005. № 1(22). С. 23–26.
8. 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.
9. Якуч Л. Морфогенез карстовых областей. М.: Прогресс, 1979. 388 с.
10. Шильников И.А., Васильева С.И. Эффективность металлургических шлаков, как известковых удобрений в зависимости от их структуры // Агрохимия. 1974. № 9. С. 86–94.
11. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.
12. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Лаврищев А.В. Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почве при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 10–15.
13. 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.
14. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В. Динамика со-

- держания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита // *Агрохимия*. 2018. № 8. С. 52–63.
15. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 440 с.
 16. Шеуджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1028 с.
 17. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.
 18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 31–41.
 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.
 20. 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.
 21. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Влияние различных по размеру фракций доломита на показатели почвенной кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2017. № 12. С. 27–37.
 22. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорируемой различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 50–61.
 23. Зеленов Н.А., Шильников И.А., Аканова Н.И., Швырков Д.А. Резерв химических мелиорантов и их агроэкологическая эффективность // *Современные проблемы и перспективы известкования кислых почв*. СПб., 2010. С. 30–34.
 24. Небольсин А.И., Небольсина З.П. Теоретические основы известкования почв. СПб., 2005. 252 с.

Chemical Composition of Spring Wheat Plants on Acidic Sod-Podzolic Light Loamy Soil, Calcified by Calcium-Containing Industrial Waste. Empirical Models of Translocation of Macro- and Microelements into Vegetative and Gene-Rative Organs of Plants

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

^a*Agrophysical Research Institute
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg—Pushkin 195220, Russia*

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg—Pushkin 196601, Russia*

^c*Sankt-Petersburg State University
Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia*

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

In 2 vegetation experiments laid on acidic sod-podzolic light loamy soil, a comparative study of the fertilizing value and reclamation properties of finely ground dolomite flour (DF) particles used for road construction and blast furnace slag (FS) of a metallurgical plant was carried out. It was found that 1 year after liming, DF, introduced in doses equivalent to FS in terms of neutralizing ability, contributed to a greater shift in pH_{KCl} and a greater accumulation of the sum of the exchange bases $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$. In terms of the effect on the productivity of wheat straw, variations with FS, introduced in equal amounts with DF, were not inferior to the latter. The effect of liming DF on wheat grain yield was more significant than with FS. The relationship between the content of mobile $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ cations in reclaimed soil and the productivity of wheat grain was revealed. Empirical dependences describing the effect of increasing doses of meliorants on the transition of calcium, magnesium, zinc, iron and manganese into straw and grain of plants have been developed. It is concluded that at the first stage of the dissolution of meliorants, their chemical nature was the leading factor in achieving the effect of curing. The degree of grinding of lime materials was of secondary importance.

Key words: chemical composition of plants, spring wheat, acidic sod-podzolic light loamy soil, liming, calcium-containing industrial waste, empirical models, translocation of macro- and microelements, vegetative and generative organs of plants.