

ВЛИЯНИЕ ФОРМ ИЗВЕСТКОВЫХ УДОБРЕНИЙ НА КИСЛОТНОСТЬ ПОЧВЫ, СОДЕРЖАНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ПОЧВЕ И ЗЕРНЕ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ

О. И. МИШУРА, М. Л. РАДКЕВИЧ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407, e-mail: agrohim_bgsha@mail.ru*

(Поступила в редакцию 21.01.2026)

В статье представлены результаты исследования по влиянию доломитовой муки и отходов цементного производства «Белорусский цементный завод» (байпасная пыль и пыль электрофильтра ЦПИ) на кислотность почвенной среды, содержание в почве подвижных соединений меди, цинка, марганца, свинца и кадмия, валовое содержание меди, цинка, марганца, свинца, кадмия в зерне ярового ячменя. В 2022 году известкование доломитовой мукой снижало обменную кислотность пахотного горизонта на 1,06 единицы (с $pH_{kcl} = 5,48$ до $pH_{kcl} = 6,54$), байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ до $pH_{kcl} = 6,72$ и $pH_{kcl} = 6,75$ соответственно. В 2025 году применение доломитовой муки, снизило обменную кислотность пахотного горизонта на 0,23 единицы (с $pH_{kcl} = 5,58$ до $pH_{kcl} = 5,81$), байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ на 0,27 и 0,65 единиц (с $pH_{kcl} = 5,58$ до $pH_{kcl} = 5,85$ и $pH_{kcl} = 6,23$ соответственно). Известковые материалы не оказывали влияния на содержание в почве и зерне ярового ячменя меди, цинка, свинца и кадмия, но снижали содержание марганца в почве. Их содержание в зерне находилось в пределах гигиенических нормативов, а в почве ниже ОДК. По действию байпасная пыль и пыль электрофильтра ЦПИ при возделывании ярового ячменя в 2022 году были равнозначными и повышали урожайность зерна ячменя на 7,52 и 8,53 ц/га, но они несколько по эффекту уступали активности доломитовой муке. В 2025 году известкование почвы байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ оказало практически такое же влияние на урожайность зерна ярового ячменя, как и общепринятое известкование доломитовой мукой.

Ключевые слова: ячмень, кислотность почвы, известковые удобрения, микроэлементы, тяжелые металлы.

This article presents the results of a study on the influence of dolomite flour and cement production waste from the Belarusian Cement Plant (bypass dust and CPP electrostatic precipitator dust) on soil acidity, the content of mobile copper, zinc, manganese, lead, and cadmium compounds in the soil, and the total content of copper, zinc, manganese, lead, and cadmium in spring barley grain. In 2022, liming with dolomite flour reduced the exchangeable acidity of the arable horizon by 1.06 units (from $pH_{kcl} = 5.48$ to $pH_{kcl} = 6.54$), bypass dust and dust of the CPI electrostatic precipitator to $pH_{kcl} = 6.72$ and $pH_{kcl} = 6.75$, respectively. In 2025, the use of dolomite flour reduced the exchangeable acidity of the arable horizon by 0.23 units (from $pH_{kcl} = 5.58$ to $pH_{kcl} = 5.81$), bypass dust and dust of the CPI electrostatic precipitator by 0.27 and 0.65 units (from $pH_{kcl} = 5.58$ to $pH_{kcl} = 5.85$ and $pH_{kcl} = 6.23$, respectively). Lime-based materials had no effect on the copper, zinc, lead, and cadmium content of spring barley soil and grain, but they reduced manganese content in the soil. Grain manganese content was within hygienic standards, while in the soil it was below the maximum permissible concentration. Bypass dust and CPI electrostatic precipitator dust were equivalent in their effects during spring barley cultivation in 2022, increasing barley grain yield by 0.752 and 0.853 t/ha, respectively, but were slightly less effective than dolomite flour. In 2025, soil liming with bypass dust and CPI electrostatic precipitator dust had virtually the same effect on spring barley grain yield as conventional liming with dolomite flour.

Key words: barley, soil acidity, lime fertilizers, microelements, heavy metals.

Введение

Избыточная кислотность часто является фактором, лимитирующим нормальный рост и развитие растений, и единственным кардинальным путем оптимизации кислотности является известкование. Оно улучшает питательный режим, снижает действие токсичных и радиоактивных элементов, активизирует микробиологическую деятельность, а в ряде случаев улучшает физические свойства почв.

При производстве цемента накапливается большое количество таких пылевидных отходов, как байпасная пыль и пыль электрофильтров ЦПИ. Эти отходы содержат большое количество $CaCO_3$ и их можно использовать как известковые удобрения. Однако отходы промышленности могут содержать тяжелые металлы и следует, наряду с изучением действия их на урожайность зерновых и других культур, исследовать их применение на накопление в почве и растениеводческой продукции тяжелых металлов. Не только дозы, но и формы известковых удобрений неодинаково влияют на динамику кислотности, на содержание подвижных форм макро- и микроэлементов в почве [1].

Цель исследований – установить влияние доломитовой муки и отходов цементного производства «Белорусский цементный завод» (байпасная пыль и пыль электрофильтра ЦПИ) на кислотность почвы, содержание в почве подвижных соединений меди, цинка, марганца, свинца и кадмия, валовое содержание меди, цинка, марганца, свинца, кадмия в зерне ярового ячменя.

Известкование кислых почв – важнейший агрохимический прием повышения эффективного и потенциального плодородия почв. Повышенная кислотность почв создает неблагоприятные условия для роста и развития культурных растений [2].

Негативное влияние повышенной кислотности обусловлено рядом причин, основные из которых: недостаток Ca^{2+} , повышенная концентрация токсичных Al^{3+} , Mn^{4+} , H^+ , пониженная доступность для растений элементов питания, неблагоприятные физические свойства почв.

Единственным радикальным путем устранения избыточной кислотности является известкование почв, которое способствует устранению токсичности ионов Al и Mn , улучшению условий гумусообразования и деятельности микроорганизмов; формированию структуры и более благоприятных физико-механических свойств почв; снижению поступления радионуклидов и тяжелых металлов; повышению качества урожая. Известь – превентивная мера от разрушения наиболее важной части – почвенного поглощающего комплекса. По дешевизне, эффективности и ресурсообеспеченности известкованию нет альтернативы [2, 3, 4].

Большинство сельскохозяйственных культур положительно реагируют на известкование сильно- и среднекислых дерново-подзолистых почв и дают высокие прибавки урожая. Из зерновых культур наиболее отзывчивы на известкование озимая и яровая пшеница, ячмень.

Известкование улучшает также качество растениеводческой продукции. Под влиянием известкования повышается содержание сахаров в корнеплодах, белка и жира в семенах, больше накапливается каротина и аскорбиновой кислоты в травах и корнеплодах. Известкование кислых почв положительно влияет на посевные качества семян. В последующем такие семена дают более высокие урожаи [4, 5, 6].

Известкование представляет собой мощный фактор мобилизации питательных веществ почвы. С одной стороны, это объясняется интенсивной деятельностью различных групп микробов, с другой – переходом труднодоступных соединений в легкодоступные под влиянием изменения реакции среды. Под влиянием извести значительно увеличиваются подвижность фосфатов почвы и коэффициент использования их растениями. Поэтому при известковании почвы дозы внесения фосфорных удобрений можно несколько уменьшить.

В связи с интенсификацией микробиологической деятельности увеличивается содержание нитратов в почве. В растениях при этом накапливается большее количество азота.

При известковании улучшается и калийное питание растений в связи с мобилизацией труднорастворимых соединений калия. Содержание калия в растениях под влиянием известкования увеличивается незначительно, а иногда даже уменьшается. Объясняется это тем, что мобилизация калия в почве при внесении извести идет не так интенсивно, как мобилизация азота и фосфора. В тоже время под влиянием известкования может снизиться доступность для растений бора, меди, цинка и других микроэлементов [5, 6, 7].

В связи с изменением реакции среды известкование кислых дерново-подзолистых почв по-разному проявляется на урожае сельскохозяйственных культур.

Известкование оказывает большое влияние и на эффективность удобрений. По данным РУП «Институт почвоведения и агрохимии» НАН Беларуси, на дерново-подзолистых почвах с $\text{pH}_{\text{KCl}} < 5,5$ 1 кг азота давал прибавку 7,6 кг зерна ячменя, 39 кг – клубней картофеля, 31 кг – корнеплодов сахарной свеклы, а на почвах с $\text{pH}_{\text{KCl}} 5,6-6$ – соответственно 20,2, 53 и 107 кг.

Таким образом, известкование кислых почв в сочетании с применением удобрений является не только непременным условием получения высоких урожаев на кислых почвах, но и мероприятием, способствующим рациональному, более экономному использованию минеральных и органических удобрений.

Основная часть

Исследования проводили на территории УНЦ «Опытные поля БГСХА» с яровым ячменем в 2022 г. с сортом Ладный и в 2025 г. с сортом Колдун. Почва опытного участка дерново-подзолистая легкосуглинистая, развивающаяся на лессовидном суглинке, подстилаемом моренным суглинком с глубины около 1 м. Перед закладкой опыта в 2022 году имела кислую реакцию среды ($\text{pH}_{\text{KCl}}=5,48$), низкое содержание гумуса (1,2 %), высокое содержание подвижных соединений фосфора (302,3 мг/кг) и калия (324,3 мг/кг). В 2025 году перед закладкой опыта пахотный горизонт имел слабокислую реакцию среды ($\text{pH}_{\text{KCl}}=5,6$), характеризовался низким содержанием гумуса (1,46 %), повышенным содержанием фосфора (174,2 мг/кг) и высоким содержанием обменного калия (343,5 мг/кг).

В этом опыте на удобренном ($\text{N}_{70}\text{P}_{60}\text{K}_{60}$) фоне изучалась эффективность известкования дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой, байпасной пылью и пылью электрофилтра ЦПИ. Контролем служил вариант без известкования. Осенью под зяблевую вспашку применяли аммофос и хлористый калий, весной под предпосевную культивацию – карбамид. Азотные подкормки вегетирую-

щих посевов не проводились. Почва перед проведением предпосевной культивации была известкована. С учетом содержания в известковых материалах CaCO_3 и их плотности сложения в 2022 году было внесено 5,3 т/га физической массы доломитовой муки, 4,4 т/га байпасной пыли и 5,6 т/га пыли электрофильтра ЦПИ. В 2025 году с учетом содержания в известковых материалах CaCO_3 было внесено 4,7 т/га физической массы доломитовой муки, 4,2 т/га байпасной пыли и 7,7 т/га пыли электрофильтра ЦПИ.

Посев ячменя в 2022 и 2025 гг. был проведен в третьей декаде апреля. Агротехника возделывания общепринятая для Беларуси. Норма высева 5 млн всхожих семян на гектар. Исследования проводились в трехкратной повторности. Площадь делянок – 21 м², учетная – 16,5 м². Учет урожая зерна и соломы проводился сплошным обмолотом в фазу полного созревания. Образцы почвы для анализа на агрохимические показатели отбирали после уборки. В почвенных и растительных образцах определяли содержание подвижных соединений меди, цинка, марганца, кадмия, свинца. Результаты исследований подвергнуты дисперсионному анализу по Б. А. Доспехову.

Изучение реакции пахотного горизонта в образцах почвы, отобранных после уборки ярового ячменя в 2022 г., показало, что известкование, проведенное доломитовой мукой, снизило обменную кислотность пахотного горизонта на 1,06 единицы (с $\text{pH}_{\text{kcl}} = 5,48$ до $\text{pH}_{\text{kcl}} = 6,54$) (табл. 1). На фоне известкования байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ обменная кислотность почвы снизилась соответственно до $\text{pH}_{\text{kcl}} = 6,72$ и $\text{pH}_{\text{kcl}} = 6,75$. При этом различия в значении данного показателя, полученными при применении в качестве известкового материала доломитовой муки, байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ оказались несущественными.

Таблица 1. Реакция среды пахотного горизонта после уборки ярового ячменя, возделываемого на фоне известкования почвы доломитовой мукой и отходами цементного производства

Варианты опыта	Реакция почвенной среды после уборки			
	2022 г.		2025 г.	
	pH_{kcl}	\pm фон	pH_{kcl}	\pm фон
Без известкования (фон)	5,48		5,58	–
Доломитовая мука	6,54	1,06	5,81	0,23
Байпасная пыль	6,72	1,24	5,85	0,27
Пыль электрофильтра ЦПИ	6,75	1,27	6,23	0,65
НСР ₀₅	0,289		0,18	

В 2025 г. известкование, проведенное доломитовой мукой, снизило обменную кислотность пахотного горизонта на 0,23 единицы (с $\text{pH}_{\text{kcl}} = 5,58$ до $\text{pH}_{\text{kcl}} = 5,81$) (табл. 1). На фоне известкования байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ обменная кислотность почвы снизилась соответственно до $\text{pH}_{\text{kcl}} = 5,85$ и $\text{pH}_{\text{kcl}} = 6,23$. Различия кислотности почвы, полученные при применении в качестве известкового материала доломитовой муки, байпасной пыли находились в пределах ошибки опыта.

Под влиянием известкования доломитовой мукой, байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ содержание в зерне меди и цинка также, как и марганца, не изменялось (табл. 2). Не обнаружено при применении пыли электрофильтра ЦПИ увеличения содержания в зерне тяжелых металлов (свинца и кадмия).

Таблица 2. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в зерне ярового ячменя, возделываемого на фоне известкования почвы доломитовой мукой и отходами цементного производства (2022 г.)

Варианты опыта	Микроэлементы, мг/кг			Тяжелые металлы, мг/кг	
	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Без известкования (фон)	2,20	15,05	10,50	0,00	0,00
Доломитовая мука	1,80	11,45	9,50	0,12	0,00
Байпасная пыль	2,15	12,10	8,50	0,00	0,00
Пыль электрофильтра ЦПИ	2,55	15,60	9,50	0,00	0,00
НСР ₀₅	0,727	4,169	3,779		

Под влиянием известкования почвы доломитовой мукой в 2025 году содержание меди, цинка и марганца в зерне ярового ячменя снижалось относительно фонового варианта – на 0,4 мг/кг, 2,4 мг/кг и 2 мг/кг соответственно (табл. 3).

Наибольшее содержание меди было при применении байпасной пыли и составило 2,85 мг/кг. При применении пыли электрофильтра ЦПИ в зерне ярового ячменя было наибольшее содержание цинка (16,5 мг/кг). Содержание марганца в зерне колебалось от 12,5 мг/кг в варианте с применением доломитовой муки до 17,5 мг/кг в варианте с применением пыли электрофильтра ЦПИ.

При применении различных известковых материалов содержание свинца в зерне ярового ячменя находилось в пределах 0,18–0,43 мг/кг, содержание кадмия отмечено только в варианте с приме-

нием электрофилтра ЦПИ, которое составило 0,04 мг/кг. Таким образом, содержание меди, цинка, свинца и кадмия при применении всех известковых материалов было ниже установленных гигиенических нормативов.

Таблица 3. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в зерне ярового ячменя, возделываемого на фоне известкования почвы доломитовой мукой и отходами цементного производства (2025 г.)

Варианты опыта	Микроэлементы, мг/кг			Тяжелые металлы, мг/кг	
	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Без известкования (фон)	2,45	15,10	14,50	0,42	0,00
Доломитовая мука	2,05	12,70	12,50	0,18	0,00
Байпасная пыль	2,85	14,95	16,00	0,00	0,00
Пыль электрофилтра ЦПИ	2,30	16,50	17,50	0,43	0,04
НСР ₀₅	0,84	1,43	1,99		

Содержание подвижной меди в почве по всем вариантам опыта в 2022 и 2025 гг. было средним (табл. 4, 5), а подвижного цинка высоким. Под влиянием известкования доломитовой мукой, байпасной пылью и пылью электрофилтра ЦПИ содержание подвижной меди и цинка не изменялось. В тоже время в 2022 г. под влиянием известкования доломитовой мукой, байпасной пылью и пылью электрофилтра ЦПИ содержание марганца снизилось от среднего до низкого по сравнению с вариантом опыта без известкования (таб. 4).

Содержание подвижного кадмия по вариантам опыта было в пределах от 5,02 до 5,72 мг/кг (табл. 4). Под влиянием известкования доломитовой мукой, байпасной пылью и пылью электрофилтра ЦПИ содержание свинца в почве по сравнению с не известкованной почвой существенно не изменялось. Под влиянием всех выше названных известковых материалов в почве не увеличивалось содержание кадмия (табл. 4). Содержание в почве при применении доломитовой муки, байпасной пыли и пыли электрофилтра ЦПИ свинца и кадмия было значительно ниже ОДК [6].

Таблица 4. Содержание микроэлементов и подвижных соединений тяжелых металлов в почве при возделывании ярового ячменя на фоне известкования почвы доломитовой мукой и отходами цементного производства (2022 г.)

Варианты опыта	Микроэлементы, мг/кг			Тяжелые металлы, мг/кг	
	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Без известкования (фон)	1,96	6,78	34,0	5,72	0,00
Доломитовая мука	1,93	6,55	16,0	5,11	0,00
Байпасная пыль	1,92	6,68	13,0	5,02	0,00
Пыль электрофилтра ЦПИ	1,93	6,74	11,6	5,61	0,00
НСР ₀₅	0,134	0,270	2,977	0,72	

Внесение в 2025 году доломитовой муки, байпасной пыли и пыли электрофилтра ЦПИ при проведении исследований с яровым ячменем снижало в почве содержание подвижной меди, цинка и марганца по сравнению с вариантом без внесения известковых материалов (табл. 5).

Различия по содержанию микроэлементов, полученные при применении в качестве известкового материала доломитовой муки, байпасной пыли и пыли электрофилтра ЦПИ находились в пределах ошибки опыта.

Содержание в почве свинца в опыте с яровым ячменем колебалось в пределах от 4,47 до 4,85 мг/кг и наибольшим было с применением байпасной пыли. Содержание кадмия находилось в пределах 0,04–0,05 мг/кг. Содержание тяжелых металлов во всех вариантах опыта соответствовало нормативам ОДК. Таким образом, байпасная пыль и пыль электрофилтра ЦПИ с точки зрения загрязнения тяжелыми металлами не представляют опасности.

Урожайность зерна ярового ячменя в 2022 году варьировала в опыте в пределах от 19,3 ц/га в варианте без известкования до 32,01 ц/га при известковании доломитовой мукой. Наименьшее значение данного показателя было отмечено на не известкованных делянках. Применение доломитовой муки увеличило урожайность зерна на 12,71 ц/га.

Несколько меньшую прибавку обеспечили байпасная пыль (7,52 ц/га) и пыль электрофилтра ЦПИ (8,53 ц/га). И если различия в урожайности зерна ярового ячменя на фоне известкования байпасной пылью и пылью электрофилтра ЦПИ оказались не существенными, то по сравнению с вариантом с применением доломитовой муки они оказались меньше на 5,19 и 4,14 ц/га при НСР₀₅ = 2,34 ц/га. В данном случае можно сказать, что применение доломитовой муки оказало более высокое влияние на урожайность зерна ячменя.

Таблица 5. Содержание микроэлементов и подвижных соединений тяжелых металлов в почве при возделывании ярового ячменя на фоне известкования почвы доломитовой мукой и отходами цементного производства (2025 г.)

Варианты опыта	Микроэлементы, мг/кг			Тяжелые металлы, мг/кг	
	Cu	Zn	Mn	Pb	Cd
Без известкования (фон)	2,32	5,31	16,3	4,72	0,05
Доломитовая мука	2,30	5,26	14	4,64	0,04
Байпасная пыль	2,26	5,30	12	4,85	0,05
Пыль электрофильтра ЦПИ	2,22	5,08	11	4,47	0,05
НСР ₀₅	0,54	0,33	3,91	0,24	0,03

В 2025 году урожайность зерна ярового ячменя находилась в пределах от 41,4 до 49,7 ц/га. Как и в 2022 году, наименьшее значение данного показателя было отмечено в варианте без известкования. Применение доломитовой муки увеличило урожайность зерна на 6,70 ц/га, байпасная пыль – на 7,50 ц/га и пыль электрофильтра ЦПИ на – 8,30 ц/га. Различия в урожайности зерна ярового ячменя между вариантами с применением доломитовой муки и отходов цементного производства оказались в пределах наименьшей существенной разницы (НСР₀₅ = 2,62 ц/га). Таким образом, известкование почвы в 2025 году байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ оказало практически такое же влияние на урожайность зерна ярового ячменя, как и общепринятое известкование доломитовой мукой.

Заключение

В опыте с яровым ячменем известкование почвы доломитовой мукой в 2022 году снизило обменную кислотность пахотного горизонта на 1,06 единицы (с рН_{kcl} = 5,48 до рН_{kcl} = 6,54), байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ обменная кислотность почвы снизилась соответственно до рН_{kcl} = 6,72 и рН_{kcl} = 6,75. В 2025 году применение доломитовой муки, снизило обменную кислотность пахотного горизонта на 0,23 единицы (с рН_{kcl} = 5,58 до рН_{kcl} = 5,81), байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ на 0,27 и 0,65 единиц (с рН_{kcl} = 5,58 до рН_{kcl} = 5,85 и рН_{kcl} = 6,23 соответственно). При этом различия в значении данных показателей, полученных на фоне изучаемых вариантов, были несущественными.

Применение байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ в качестве известкового материала не способствует накоплению в зерне ячменя меди, цинка, марганца, свинца, кадмия и содержание меди, цинка свинца и кадмия было значительно ниже гигиенических нормативов.

Под влиянием доломитовой муки, байпасной пыли и пыли электрофильтра ЦПИ в почве не изменялось содержание меди, цинка, марганца, свинца, кадмия, но в 2022 году существенно уменьшилось содержание марганца.

Урожайность зерна ярового ячменя в 2022 при известковании доломитовой мукой увеличилась по сравнению с вариантом без известкования на 12,71 при известковании байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ соответственно на 7,52 и 8,53 ц/га. По действию байпасная пыль и пыль электрофильтра ЦПИ при возделывании ярового ячменя в 2022 году были равнозначными, но они несколько по эффекту уступали активности доломитовой муке. В 2025 году известкование почвы байпасной пылью и пылью электрофильтра ЦПИ оказало практически такое же влияние на урожайность зерна ярового ячменя, как и общепринятое известкование доломитовой мукой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агрохимия: учебник / Б. А. Ягодин [и др.]; под ред. Б. А. Ягодина. – М.: Колос, 2002. – 584 с.
2. Агрохимия. Удобрения и их применение в современном земледелии: учебно-методическое пособие / И. Р. Вильдфлуш [и др.]; под ред. И. Р. Вильдфлуша. – Горки: БГСХА, 2019. – 405 с.
3. Минеев, В. Г. Агрохимия: учебник / В. Г. Минеев, В. Г. Сычев. – М: Изд-во ВНИИА им Д. Н. Прянишникова, 2017. – 854 с.
4. Справочник агрохимика / В. В. Лапа [и др.]; под ред В. В. Лапа. – Минск: ИВЦ Минина, 2021. – 260 с.
5. Эффективность применения микроудобрений и регуляторов роста при возделывании сельскохозяйственных культур / И. Р. Вильдфлуш [и др.]. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 293 с.
6. Агрохимия: учебник / И. Р. Вильдфлуш [и др.]; под ред. И. Р. Вильдфлуша. – Минск: ИВЦ Минфина, 2023. – 600 с.
7. Клебанович, Н. В. Известкование почв Беларуси / Н. В. Клебанович, Г. В. Васюк. – Минск: БГУ, 2003. – 322 с.