Karpukhin A. I., Ilakhun A., Torshin S. P. *Koordinatsionnyye soyedineniya organicheskikh veschestv pochv s ionami metallov i vliyaniye kompleksonov na ikh dostupnost'* [Coordination compounds of soil organic matter with metal ions and the effect of complexones on their availability]. Moscow: Publishing house All-Russian Research Institute of Agrochemistry, 2010, 272 p.

Kokotov Yu. A. *Ionity i ionnyy obmen* [Ionites and ion exchange]. Leningrad: Khimiya, 1980, 198 p.

Koshkin Ye. I. *Fiziologiya ustoychivosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur* [The physiology of crop stability]. Moscow: Drofa, 2010, 638 p.

Naumov V. D. *Pochvenno-ekologicheskiye usloviya zabolevaniya yabloni rozetochnost'yu* [Soil-ecological conditions of the rosettes disease of apple trees]. Moscow: Publishing house Russian State Agrarian University, 2012, 444 p.

Nikitochkin D. N., Savich V. I., Naumov V. D., Baybekov R. F. *Modeli plodorodiya pochv pod yablonyu vo vremeni i v prostranstve* [Models of soil fertility under an apple trees in time and in extent]. Moscow: Publishing house Russian State Agrarian University and All-Russian Research Institute of Agrochemistry, 2015, 272 p.

Priputina I. V. *Zagryazneniye pochvennogo pokrova soyedineniyami svintsa kak faktor ekologicheskogo riska // Sovremennyye problemy zagryazneniya* [Soil contamination with lead compounds as an environmental risk factor. Modern problems of pollution]. Moscow: Publishing house Moscow State University, 2004, pp. 264–267.

Pinskiy D. L. *Ionoobmennyye protsessy v pochvakh* [Ion-exchange processes in soils]. Puschino: Puschino Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1997, 165 p.

Savich V. I., Bulgakov D. S. *Integral'naya otsenka plodorodiya pochv* [Integral assessment of soil fertility]. Moscow: Publishing house Russian State Agrarian University, 2011, 347 p.

Savich V.I. *Fiziko-khimicheskiye osnovy plodorodiya pochv* [Physicochemical fundamentals of soil fertility]. Moscow: Publishing house Russian State Agrarian University, 2013, 431 p.

Savich V. I., Belopukhov S. L., Gukalov V. V. Vliyaniye effektov protonirovaniya i gidratoobrazovaniya na vytesneniye margantsa za schet kompleksoobrazovaniya iz dernovo-podzolistykh pochv [The effect of protonation and hydrate formation on the displacement of manganese from sod-podzolic soils due to complexation] // *Butlerovskiye soobscheniya*, 2017, vol. 52, no. 12, pp. 46–51.

Uskova N. V., Chernikov V. A., Belopukhov S. L. Agroekologicheskaya otsenka vliyaniya dlitel'nogo primeneniya udobreniy na gumusovoye sostoyaniye dernovo-podzolistoy pochvy [Agroecological assessment of the impact of prolonged use of fertilizers on the humus state of sod-podzolic soil] // *Izvestia TSKHA*, 2018, no. 2, pp. 18–33.

Kolar L. Thermodynamica klasifikate sorpene – uontovymennych vlastnosty pud a jeje practiche applicate // Acta scientifica Ceshe Budejovice, 1982, no. 1, 106 p.

Fertilite des sols du Mali, Mali-Sud / Veldkamp M. J., Traore A., N'Diaye M. K., Keita M. K., Keita B., Bagayoko M. // Office de Niger. Interpretation des donnees analytiques des sols et des plantes, Cellue agro-pedologie projet «Assistance an laboratoire des sols/AGP», Institut Royal des Tropiques Amsterdam, Pays-Bas, 1991. 149 p.

УДК 504.73.062 : 631.41 DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.02

НАКОПЛЕНИЕ КАДМИЯ И РТУТИ В ПШЕНИЦЕ ПРИ ИЗВЕСТКОВАНИИ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ

М. А. Ефремова, В. В. Митрофанов, А. А. Лохматова, А. А. Акатова

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601, Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, д. 2
E-mail: marina_efremova@mail.ru

Поступила в редакцию 23 октября 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

Яровая пшеница в условиях полевого мелкоделяночного опыта выращивалась на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве со слабым уровнем загрязнения кадмием и содержанием ртути в диапазоне фоновых концентраций. В опыте установлено влияние известкования кислой дерново-подзолистой почвы различными дозами доломитовой муки на физико-химические свойства почвы, урожайность яровой пшеницы и накопление растениями кадмия и ртути. При увеличении дозы доломитовой муки от 1,0 до 9,0 т га$^{-1}$ обменная кислотность дерново-подзолистой почвы изменилась от кислой до нейтральной, достоверно уменьшилось (в 2,2 раза) содержание в почве подвижных соединений фосфора и повысилась урожайность пшеницы. При известковании почвы доломитовой мукой в дозе 3 т га$^{-1}$, составляющей 60% от полной дозы, отмечено максимальное снижение гидролитической кислотности (в три раза) и достоверное увеличение урожайности яровой пшеницы (в два раза). Известкование дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой в дозах 0,6 от полной дозы и полной дозы привело к существенному снижению содержания кадмия в зерне и соломе яровой пшеницы. Известкование почвы доломитовой мукой в дозах, превышающих полную дозу мелиоранта, способствовало увеличению концентрации Cd в зерне пшеницы по сравнению с достигнутым в опыте минимумом. Установлена достоверная корреляционная связь между коэффициентами накопления Cd в соломе пшеницы и показателями

кислотности почвы. Снижение кислотности почвы способствовало некоторому увеличению коэффициентов накопления Hg в соломе пшеницы.
Ключевые слова: дерново-подзолистая почва, известкование, кадмий, ртуть, пшеница.

ACCUMULATION OF CADMIUM AND MERCURY IN WHEAT UNDER LIMING OF SOD-PODZOLIC SOIL

M. A. Efremova, V. V. Mitrofanov, A. A. Lokhmatova, A. A. Akatova

Saint-Petersburg State Agrarian University
2, Peterburgskoye highway, Pushkin, Saint-Petersburg, 196601
E-mail: marina_efremova@mail.ru

In a field experiment spring wheat was grown on sod-podzolic medium loamy soil with a low level of cadmium and mercury content in the range of background concentrations. The effect of liming of the acidic sod-podzolic soil with various rates of dolomite flour on the physical and chemical properties of the soil, the productivity of spring wheat and the accumulation of cadmium and mercury in plants was established in the experiment. With an increase in the rate of dolomite flour from 1.0 to 9.0 t ha^{-1}, the exchange acidity of the soil changed from acidic to neutral, the content of mobile phosphorus compounds in the soil significantly decreased (by 2.2 times) and wheat productivity increased. When liming the soil with dolomite flour at a rate of 3 t ha^{-1}, which is 60% of the total dose, a maximum (3-time), decrease in hydrolytic acidity and a significant (2-time) increase in spring wheat productivity were noted. Liming of the soil with dolomite flour in rates of 0.6–1.0 of the total dose led to a significant decrease in the cadmium content in grain and straw of spring wheat. Liming of the soil with dolomite flour in doses exceeding the total dose of ameliorant contributed to an increase in the concentration of Cd in wheat grain in comparison ещ the minimum achieved in the experiment. A significant correlation between the coefficients of Cd accumulation in wheat straw and the indicators of soil acidity was established in the experiment. The decrease in soil acidity contributed to a slight increase in coefficients of Hg accumulation in wheat straw.
Key words: sod-podzolic soil, liming, cadmium, mercury, wheat.

ВВЕДЕНИЕ

Подвижность тяжелых металлов в системе почва-растение зависит от физико-химических свойств элементов, почвы, климатических особенностей и генетических свойств растений (Зырин, Садовникова, 1985; Пинский, 1992; Водяницкий, 2009). Искусственное загрязнение почвы нарушает природное равновесие между труднорастворимыми и подвижными формами тяжелых металлов в почве, изменяя скорости их геохимической миграции и накопления в пищевых цепях (Christensen, 1984; Krishamutry, 2005; Jia, 2018; Xu, 2014). Согласно положению в периодической системе химических элементов, кадмий и ртуть являются химическими аналогами. Это позволяет предположить существование общих закономерностей их распределения в почве и накопления растениями.

Согласно имеющимся данным, среднее содержание Cd в верхних горизонтах незагрязненных почв не превышает 0,5 мг $кг^{-1}$ (Зырин, Садовникова, 1985; Krishamutry, 2005), Hg – 0,1–0,2 мг $кг^{-1}$ (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989; Szymczak, 1992). Концентрация ртути и кадмия в верхнем слое почвы в несколько раз выше, чем в подпочвенных горизонтах, что, по всей вероятности, связано с повышенным содержанием в них органического углерода и серы (Зырин, Садовникова, 1985). Основная часть ртути и значительная доля кадмия депонирована в гуминовых кислотах и гумине (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1985; Xu, 2014). Увеличение содержания гумусовых кислот в почве приводит к снижению количества усваиваемых растениями Hg и Cd из-за формирования устойчивых металлорганических комплексов.

Подвижность металлов в системе почва-растение также зависит от кислотности почвы, её окислительно-восстановительного потенциала, минералогического и гранулометрического состава (Пинский, 1992; Hu, 2018). Данные о влиянии почвенной кислотности на поведение ртути и кадмия в системе почва-растение неоднозначны. Cd наиболее подвижен в почве по сравнению с другими тяжелыми металлами (Кабата-Пендиас, Пендиас, 1985). Согласно данным T.H. Cristensen (1984), твердая фаза загрязненной почвы прочно удерживает Cd при pH 6,0, при этом коэффициенты распределения металла в системе твердая фаза почвы-почвенный раствор составляют 200–250. По другим данным (Tarradellas, 1997), при pH почвы 5,5–5,7 и значениях окислительно-восстановительного потенциала около 325 мВ отмечается наибольшая растворимость соединений кадмия в почве, которая постепенно снижается при изменении указанных условий в любую сторону.

Сложная почвенная химия ртути не позволяет получить однотипные данные о миграции элемента в почвах разного генезиса и поступлении ртути в растения из почв разной степени окультуренности. Согласно некоторым данным, наибольшее количество ртути сорбируется твердой фазой почвы при pH в диапазоне 4,5–5,5 (Зырин, Садовникова, 1985), по другим данным, Hg наиболее подвижна в почве при pH 5,0 и наименее подвижна при pH 3,0 (Xu, 2014).

В связи с этим вопрос о влиянии известкования на снижение подвижности ртути и кадмия в системе почва-растение остается нерешенным, так как результаты отдельных исследований противоречивы. Имеются данные о снижении поступления тяжелых

металлов в растения при нейтрализации почвы известью (Hakeem, 2014; Овчаренко, 1996). Им противоречат результаты вегетационных опытов, которые свидетельствуют о неэффективности приема известкования почвы по отношению к детоксикации ртути и кадмия в почве (Sorteberg, 1974; Литвинович, 2014).

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния известкования на накопление в яровой пшенице Hg и Cd, поступающих из дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, в которой данные металлы содержатся в фоновых или близких к ним концентрациях. Изучение проводилось в рамках мелкоделяночного полевого опыта, поставленного в условиях учебно-опытного поля Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. В задачи исследования входила оценка изменения физико-химических свойств почвы при внесении в нее различных доз доломитовой муки и их взаимосвязи с показателями накопления Cd и Hg в надземных органах пшеницы.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Полевой опыт был заложен на дерново-подзолистой среднесуглинистой остаточно-карбонатной почве. В течение нескольких лет, предшествующих закладке опыта, на участке выращивались многолетние травы, под которые вносились комплексные минеральные удобрения. Схема полевого опыта включала шесть вариантов. Опыт проведен в четырехкратной повторности. Доломитовая мука вносилась в почву в возрастающих дозах (Д) на фоне применения комплексного удобрения азофоски (N:P:K = 16:16:16). Доза азофоски обеспечивала внесение каждого из указанных питательных веществ в количестве 90 кг га$^{-1}$. Схема опыта: 1) азофоска – фон; 2) фон + 0,2 Д; 3) фон + 0,6 Д; 4) фон + 1,0 Д; 5) фон + 1,4 Д; 6) фон + 1,8 Д. Полная доза мелиоранта (1,0 Д), равная 5 т га$^{-1}$, была эквивалентна количеству карбонатов кальция и магния, необходимому для нейтрализации гидролитической кислотности почвы плотностью 1,2 г см$^{-3}$ в слое 0,25 см. Таким образом, доза доломитовой муки в опыте варьировалась в диапазоне от 1,0 до 9,0 т га$^{-1}$. Площадь опытной делянки составляла 6 м^2 (2×3 м). Доломитовая мука вносилась на поверхность почвы и распределялась в слое 0–10 см культиватором за две недели до посева культуры.

В опыте выращивалась яровая пшеница сорта Сударыня. Посев пшеницы был произведен зерновой сеялкой, норма высева семян составляла 5,5 млн штук га$^{-1}$. Растения были убраны в фазу полной спелости на 84-е сутки роста.

Физико-химический анализ смешанного образца почвы, отобранного со всей территории опытного участка на глубине пахотного горизонта (0–25 см), проводился до закладки опыта. После уборки опыта почва для анализа отбиралась с каждой делянки на той же глубине.

Валовое содержание в почве углерода и азота определено на элементном анализаторе органических материалов LECO CHN628S, сумма поглощенных оснований (S) – методом Каппена (ГОСТ 27821-88), обменная кислотность почвы (pH_{KCl}) – потенциометрически в вытяжке 1,0 М KCl с pH = 5,4–5,6 (соотношение почва:раствор = 1:5), гидролитическая кислотность почвы (Hг) – потенциометрическим методом (ГОСТ 26212-91), содержание подвижных соединений фосфора (в пересчете на P_2O_5) и калия (в пересчете на K_2O) в почве – фотоколориметрически в вытяжке 0,2 М HCl (соотношение почва:раствор = 1:5).

Содержание Hg в почве и растениях определено методом электротермической атомной абсорбции на анализаторе Lumex PA915M (Прямое определение содержания ртути..., 2007), содержание Cd в почве и растениях – на атомно-абсорбционном спектрометре Shimadzu AAC-7000G. Почвенные пробы были подготовлены к анализу в соответствии с рекомендованными методиками (Методика количественного анализа..., 2005; ПНД Ф 16.1:2:2.2.80-2013). Пробы растений для определения содержания кадмия были подготовлены способом мокрой минерализации в смеси концентрированных кислот HNO_3 и $HClO_4$ (соотношение 4:1).

Физико-химические свойства почвы опытного участка определялись условиями ее формирования и эксплуатации. Почва являлась среднекислой и характеризовалась повышенным содержанием углерода органического вещества ($C_{орг}$), подвижных соединений фосфора и калия, а также повышенной степенью насыщенности основаниями (V) (табл. 1). Таким образом, для увеличения урожайности сельскохозяйственных культур необходимо было провести известкование почвы.

Валовое содержание ртути в почве опытного участка не превышало средние значения ее содержания в почвах (Зырин, Садовникова, 1985; Szymczak, 1992; Кабата-Пендиас, Пендиас, 1989) (табл. 1). Валовое содержание кадмия было близким к показателю ориентировочно-допустимой концентрации металла в суглинистой почве с pH < 5,5 (ОДК = 1,0 мг кг$^{-1}$).

Результаты эксперимента обработаны при помощи методов вариационной статистики и корреляционного анализа на уровне значимости 5% (p = 0,95) (Доспехов, 1985).

Таблица 1. **Физико-химическая характеристика дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы перед закладкой опыта**

$C_{орг}$	pH_{KCl}	Hг	S	V	P_2O_5	K_2O	Hg	Cd
					подвижная форма		валовое содержание	
%	–	ммоль100 г$^{-1}$		%	мг кг$^{-1}$			
4,89	4,91	3,3	18,8	85,0	153,5±23,0	220,0±29,8	0,06±0,01	0,71±0,15

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При увеличении дозы доломитовой муки в диапазоне 1,0–9,0 т га$^{-1}$ гидролитическая кислотность почвы снизилась в 3 раза по сравнению с контролем (табл. 2), а обменная реакция дерново-подзолистой почвы изменилась от кислой до нейтральной. Статистическая обработка позволила выявить тесную корреляционную связь между показателями кислотности почвы и дозой мелиоранта (табл. 2). Однако существенное снижение гидролитической кислотности по сравнению с контролем отмечено только в вариантах с незначительными дозами доломитовой муки 0,2–0,6 Д (1–3 т га$^{-1}$ в пересчете на действующее вещество).

Увеличение дозы мелиоранта привело к незначительному снижению содержания в почве валового азота и подвижного калия (табл. 2, рис. 1). Содержание в почве подвижных соединений фосфора достоверно уменьшилось (в 2,2 раза) (рис. 1), что, вероятно, связано со снижением растворимости минеральных фосфатов при уменьшении кислотности почвы.

Таблица 2. **Физико-химическая характеристика дерново-подзолистой почвы после уборки опыта**

Варианты	Доза $CaCO_3$	pH_{KCl}	Hг	$N_{вал}$	$C_{орг}$	Hg	Cd
	т·га$^{-1}$	–	ммоль·100 г$^{-1}$	%	%	мг·кг$^{-1}$	
1. NPK – фон (контроль)	–	5,17	2,29±0,43	0,30±0,02	4,38±0,06	0,06[a] / 0,01[b]	0,47[a] / 0,11[b]
2. Фон + 0,2 Д	1,0	5,81	1,48±0,28	0,32±0,03	4,82±0,11	0,06 / 0,01	1,13 / 0,30
3. Фон + 0,6 Д	3,0	6,11	0,88±0,22	0,31±0,01	4,98±0,17	0,06 / 0,01	0,50 / 0,15
4. Фон + 1,0 Д	5,0	6,08	0,79±0,13	0,30±0,04	4,68±0,12	0,06 / 0,01	0,76 / 0,15
5. Фон + 1,4 Д	7,0	6,26	0,79±0,11	0,30±0,03	4,59±0,09	0,05 / 0,01	0,61 / 0,12
6. Фон + 1,8 Д	9,0	6,24	0,75±0,13	0,29±0,03	4,33±0,02	0,06 / 0,01	0,78 / 0,13
Корреляция с дозой извести (R)	–	0,86*	–0,85*	–0,75	–0,23	–0,003	0,516

Примечание: [a] – среднее значение; [b] – стандартное отклонение; * – значение существенно при p = 0,95.

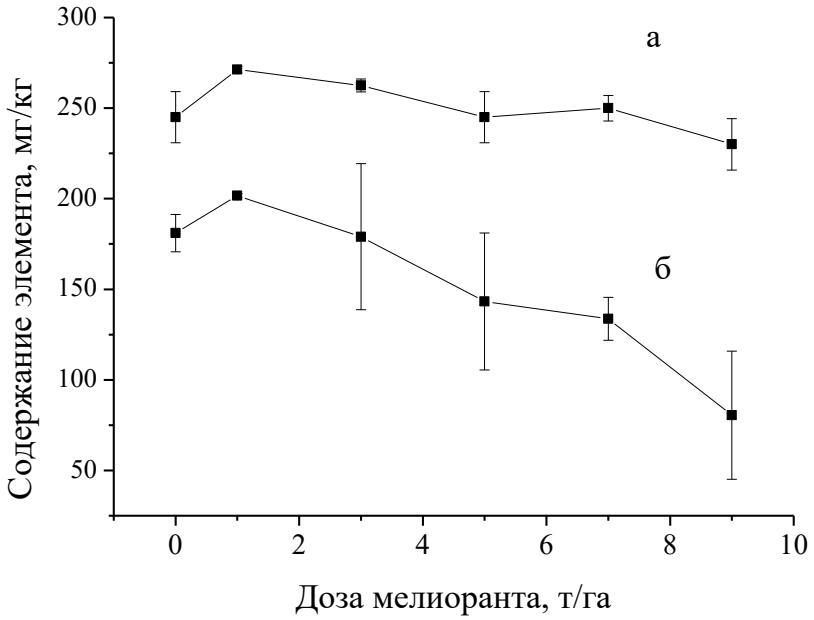

Рис. 1. Зависимость содержания в почве подвижных соединений фосфора и калия от дозы доломитовой муки: а – K_2O (R = –0,58); б – P_2O_5 (R = –0,91)

Корреляционный анализ показал, что масса пшеницы тесно связана с кислотностью почвы и не зависит от содержания подвижных форм фосфора и калия (табл. 3)

Известкование почвы способствовало увеличению массы пшеницы (рис. 2, 3). Оптимальной дозой доломитовой муки в сложившихся в опыте полевых условиях следует считать 3,0 т га$^{-1}$, т. к. дальнейшее увеличение дозы мелиоранта не оказало существенного влияния на урожайность культуры.

Таблица 3. **Коэффициенты корреляции линейной зависимости между продуктивностью пшеницы и физико-химическими показателями почвы**

Показатели	pH_{KCl}	Нг	Подвижный фосфор	Подвижный калий
Общая сухая биомасса (зерно и солома)	0,893*	–0,914*	–0,454	–0,051
Масса зерна (абсолютно сухая)	0,809	–0,837*	0,391	0,028

Примечание: * – данные достоверны при p = 0,95.

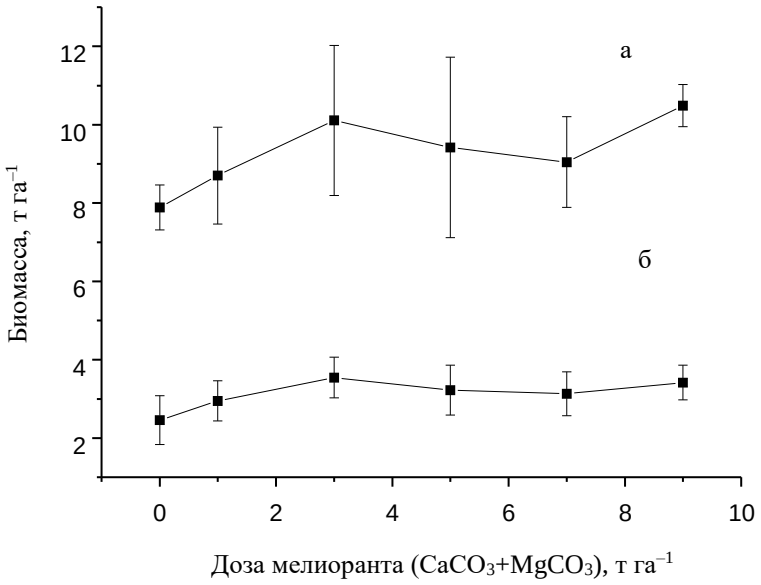

Рис. 2. **Зависимость надземной биомассы пшеницы от дозы доломитовой муки:**
а – сырая масса (R = 0,723); б – сухая масса (R = 0,645)

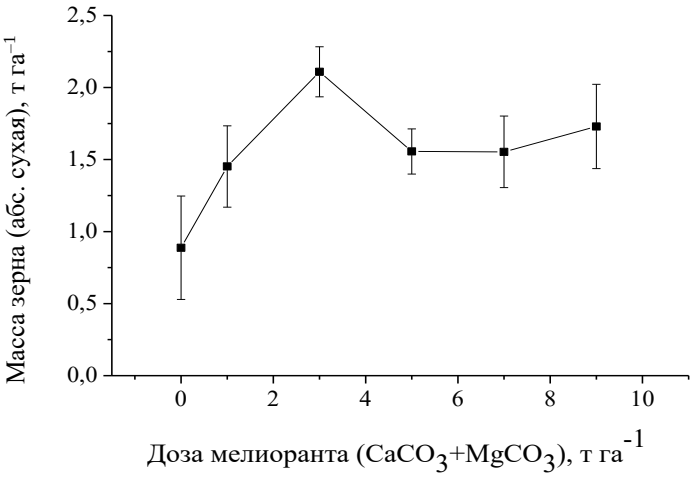

Рис. 3. Зависимость абсолютно сухой массы зерна пшеницы от дозы доломитовой муки (R = 0,475)

Согласно литературным данным, оптимальная для роста и развития пшеницы кислотность почвенной среды составляет pH_{KCl} = 6–7, допустимая – pH_{KCl} = 5–8 (Анспок, 1981). После известкования почвы её кислотность соответствовала оптимальной для выращиваемой культуры в вариантах с дозами мелиоранта 3,0–9,0 т га$^{-1}$ (табл. 2). В указанных вариантах продуктивность пшеницы была значительно выше по сравнению с контролем и существенно не изменялась (рис. 2).

При повышении дозы доломитовой муки выявлена тенденция к увеличению концентрации Hg в соломе пшеницы (табл. 4). Содержание данного элемента в зерне пшеницы было ниже предела обнаружения атомно-абсорбционного спектрометра (< 2,5 мкг кг$^{-1}$). Полученные данные согласуются с результатами вегетационного эксперимента с овсом (Sorteberg, 1974), в процессе проведения которого установлено, что известкование загрязненной почвы до pH 6–7 привело к увеличению содержания Hg в растениях в 7–12 раз по сравнению с контролем.

Результаты настоящего исследования позволили выявить общую тенденцию к снижению концентрации Cd в соломе и зерне пшеницы при увеличении дозы мелиоранта (табл. 4). Однако влияние доломитовой муки на накопление Cd в зерне пшеницы является неоднозначным. Так, при внесении в почву мелиоранта в дозах 1,0–3,0 т га$^{-1}$ содержание кадмия в зерне уменьшилось в пять раз по сравнению с контролем, что согласуется с результатами опытов М. М. Овчаренко с соавт. (1996). При дальнейшем повышении дозы доломитовой муки установлено статистически значимое увеличение содержания кадмия в зерне пшеницы по отношению к достигнутому минимуму, что согласуется с результатами экспериментов А. В. Литвиновича с соавт. (2014).

Таблица 4. **Содержание тяжелых металлов в пшенице, мкг·кг$^{-1}$**

Варианты	Солома		Зерно
	Hg	Cd	Cd
1. NPK – фон	7,5 ± 0,8	62,2 ± 13,7	35,6 ± 9,2
2. Фон + 0,2 Д	11,7 ± 1,8	63,0 ± 13,2	33,0 ± 6,1
3. Фон + 0,6 Д	8,8 ± 1,9	33,4 ± 7,7	31,8 ± 6,8
4. Фон + 1,0 Д	11,3 ± 2,7	40,1 ± 8,9	7,7 ± 2,2
5. Фон + 1,4 Д	9,8 ± 3,4	45,0 ± 8,8	12,0 ± 2,9
6. Фон + 1,8 Д	10,9 ± 3,4	41,9 ± 9,4	16,4 ± 3,6
R (от дозы $CaCO_3$)	0,390	–0,629	–0,805

После уборки опыта в [illegible] существенно различалось по [illegible] среднем по опыту составило 0,71 ± 0,24 мг кг$^{-1}$, что соответствует диапазону значений данного показателя [illegible] Доза мелиоранта ($CaCO_3$+$MgCO_3$), т га$^{-1}$ [illegible] . Валовое содержание Hg в [illegible] не изменилось.

На основании полученных данных были рассчитаны коэффициенты накопления (КН) тяжелых

металлов в растениях пшеницы как отношение содержания элементов в растениях к их валовому содержанию в почве. Коэффициенты накопления Cd в зерне пшеницы в 1,7–6,9 раза (в среднем в 4,8 раза) меньше, чем коэффициенты его накопления в соломе (рис. 4). Значения коэффициентов накопления Cd близки к ожидаемым для пшеницы, произрастающей на дерново-подзолистой почве (Ефремова, 2013), а КН Hg примерно в 10 раз выше ожидаемых показателей (Huangetal, 2011).

Установлена тесная корреляционная связь между показателями кислотности дерново-подзолистой почвы и коэффициентами накопления Cd в соломе пшеницы (табл. 5). Снижение кислотности почвы в целом способствовало уменьшению коэффициентов накопления металла в зерне пшеницы, однако корреляционная связь оказалась недостоверной. При увеличении дозы доломитовой муки коэффициенты накопления Cd в зерне пшеницы снижались. Наименьший КН кадмия в зерне отмечен при внесении доломитовой муки в дозе 5,0 т га$^{-1}$ (полная доза извести). Дальнейшее повышение дозы извести способствовало заметному увеличению коэффициентов накопления металла в растениях пшеницы по сравнению с достигнутым минимумом.

Таблица 5. **Коэффициенты корреляции прямолинейной зависимости между КН тяжелых металлов в растениях и показателями кислотности почвы**

	Hг	pH_{KCl}
КН Cd (зерно)	0,686	–0,703
КН Cd (солома)	0,836*	–0,843*
КН Hg (солома)	–0,534	0,553

Примечание: * – данные достоверны при p = 0,95.

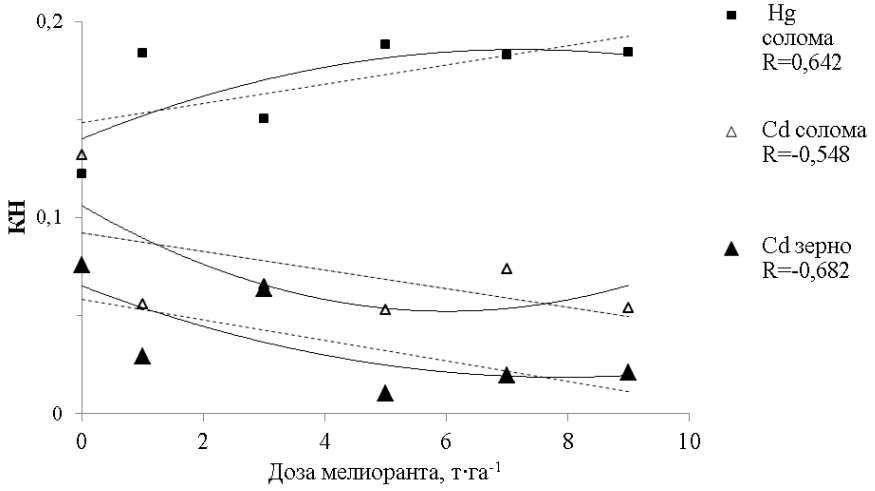

Рис. 4. Зависимость КН Hg и Cd в растениях пшеницы от дозы доломитовой муки

Повышение дозы доломитовой муки от 1,0 до 9,0 т га$^{-1}$ привело к изменению обменной реакции почвенной среды (pH_{KCl}) от 5,8 до 6,3 (табл. 2). Анализ корреляционной зависимости между КН Hg в соломе пшеницы и показателями обменной реакции почвы позволил выявить тенденцию к увеличению накопления ртути в растениях при снижении кислотности почвенной среды (табл. 5). Согласно данным Н. Г. Зырина и Л. К. Садовниковой (1985), при такой реакции почвенной среды возможно снижение сорбции Hg в твердой фазе почвы за счет разрушения комплексных металлорганических соединений под действием щелочных растворов. Кроме того, при улучшении кислотно-основных свойств почвы увеличивается её микробиологическая активность. Известно (Jia, 2018), что деятельность микроорганизмов может способствовать метилированию ртути и, таким образом, увеличению подвижности токсиканта в системе «почва – растение».

ВЫВОДЫ

При увеличении дозы доломитовой муки от 1,0 до 9,0 т га$^{-1}$ реакция дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы изменилась от среднекислой до нейтральной. При известковании почвы мелиорантом в дозе, составляющей 60% от полной дозы, установлено максимальное снижение гидролитической кислотности почвы (в три раза) и достоверное увеличение урожайности зерна яровой пшеницы (в два раза). Применение доломитовой муки в более высоких дозах не оказало существенного влияния на данные показатели.

Известкование дерново-подзолистой почвы доломитовой мукой в дозах 0,6–1,0 от полной дозы привело к существенному снижению содержания кадмия в соломе и зерне яровой пшеницы. Применение мелиоранта в более высоких дозах способствовало увеличению концентрации Cd в зерне пшеницы по сравнению с достигнутым в опыте минимумом.

Корреляционный анализ позволил выявить достоверную связь между величиной почвенной кислотности и коэффициентами накопления Cd в соломе пшеницы. Снижение кислотности почвы способствовало заметному, но несущественному уменьшению коэффициентов накопления Cd в зерне пшеницы и увеличению коэффициентов накопления Hg в соломе.

Список литературы

Анспок П. И., Штиканс Ю. А., Визла Р. Р. Справочник агрохимика Нечерноземной полосы. Л.: Колос, 1981. 328 с.

Водяницкий Ю. Н. Свойства тяжелых металлов и металлоидов в почвах // Агрохимия. 2009. № 8. С. 85–94.

Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.

Ефремова М. А., Сладкова Н. А., Вяльшина А. С. Динамика накопления кадмия и калия растениями пшеницы на дерново-подзолистой и торфяной низинной почвах // Агрохимия. 2013. № 11. С. 86–96.

Зырин Н. Г., Садовникова Л. К. (ред.) Химия тяжелых металлов, мышьяка и молибдена в почвах. М.: МГУ, 1985. 208 с.

Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.

Литвинович А. В., Ковлева А. О., Хомяков А. В., Лаврищев А. В., Павлова О. Ю. Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2014. № 4. С. 80–87.

Овчаренко М. М., Шильников И. А., Полякова Д. К. Влияние известкования и кислотности почвы на поступление в растения тяжелых металлов // Агрохимия. 1996. № 1. С. 74–84.

Пинский Д. Л. Закономерности сорбции цинка и кадмия почвами и почвенными компонентами // Цинк и кадмий в окружающей среде. М.: Наука, 1992. С. 106–118.

Прямое определение содержания ртути в пищевых продуктах, продовольственном сырье, кормах, комбикормах и сырье для производств. Методика количественного анализа М 04-46-2007. СПб., 2007.

Определение тяжелых металлов в почвах и донных отложениях атомно-абсорбционным методом. Методика количественного анализа М 02-902-125-2005. СПб., 2005. 32 с.

Christensen T. H. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium // Water, Air, and Soil Pollution, 1984, v. 21, issue 1–4, pp. 105–114.

Hu W., Huang B., Borggard Ole K., Ye M., Tian K., Zhang H., Holm P. E. Soil threshold values for cadmium based on paired soil-vegetable content analyses of greenhouse vegetable production systems in China: Implication for safe food production // Environ. Pollut., 2018, v. 241, pp. 922–929.

Jia Q., Zhu X., Hao Y., Yang Z., Wang Q., Fu H., Yu H. Mercury in soil, vegetable and human hair in a typical miningarea in China: Implication for human exposur // J. Environ. Sciences. 2018. Vol. 68. pp. 73–82.

Krishamurty G. S. R., McArthur D. F. E., Wang M. K., Huang P. M. Biogeochemistry of soil cadmium and the impact on terrestrial food chain contamination // Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere. Ed.: G. R. Gobran, D. M. Huang. Elsevier Science, Amsterdam, 2005, pp. 197–257.

Lagerwerff J. V. Lead, mercury and cadmium in environmental contaminants // Micronutrients in Agriculture. 1972. pp. 593–636.

Soil remediation and plant: Prospects and challenges. Ed.: K. Hakeem, M. Sabir, M. Ozturk, A. Mermut. Academic Press, 2014. 752 p.

Sorteberg A. The effect of some heavy metals on oats in pot experiments with three different soil types // Agricultural and Food Science, 1974, v. 46 (3), pp. 277–278.

Szymczak J., Grajeta H. Mercury contents in soil and plant material // Polish J. Food nutr. Science, 1992, v. 1, no. 2, pp. 31–39.

Tarradellas J., Bitton G. Chemical pollutants in soil. In: Soil ecotoxicology. Ed.: J. Tarradellas, G. Bitton, D. Rossel. Boca Raton: CRS Press, 1997, pp. 3–33.

Xu J., Kleja D. B., Biester H., Lagerkvist A., Kumpiene J. Influence of particle size distribution, organic carbon, pH and chlorides on washing of mercury contaminated soil // Chemosphere, 2014, v. 109, pp. 99–105.

References

Anspok P. I., SHtikans YU. A., Vizla R. R. *Spravochnik agrohimika Nechernozemnoj polosy.* [Handbook of agricultural chemist non-Chernozem zone]. Leningrad.: Kolos, 1981. 328 p.

Vodyanickij YU. N. Svojstva tyazhelyh metallov i metalloidov v pochvah. [Properties of heavy metals and metalloids in soils]. *Agrohimiya,* 2009, no. 8, pp. 85–94.

Dospekhov B.A. *Metodika polevogo opyta.* [Field Experiment Technique]. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p.

Efremova M.A., Sladkova N.A., Vyal'shina A.S. Dinamika nakopleniya kadmiya i kaliya rasteniyami pshenicy na dernovo-podzolistoj i torfyanoj nizinnoj pochvah. [Dynamics of the accumulation of cadmium and potassium by wheat plants on sod-podzolic and peat lowland soils]. *Agrohimiya,* 2013, no. 11, pp. 86–96.

Zyrin N. G., Sadovnikova L. K. (red.) *Himiya tyazhelyh metallov, mysh'yaka i molibdena v pochvah*. [Chemistry of heavy metals, arsenic and molybdenum in soils]. Moscow: Moscow University Publishing, 1985. 208 p.

Kabata-Pendias A., Pendias H. *Mikroelementy v pochvah i rasteniyah*. [Trace elements in soils and plants]. Moscow: Mir, 1989. 439 p.

Litvinovich A. V., Kovleva A. O., Homyakov A. V., Lavrishchev A. V., Pavlova O. YU. *Vozmozhnost' zagryazneniya kadmiem yarovyh zernovyh kul'tur pri melioracii kislyh pochv.* [The possibility of cadmium contamination of spring crops during the reclamation of acidic soils]. Agrohimiya, 2014, no. 4, pp. 80–87.

Ovcharenko M. M., SHil'nikov I. A., Polyakova D. K. Vliyanie izvestkovaniya i kislotnosti pochvy na postuplenie v rasteniya tyazhelyh metallov. [The effect of liming and soil acidity on heavy metals entering plants]. *Agrohimiya*, 1996, no. 1, pp. 74–84.

Pinskij D. L. Zakonomernosti sorbcii cinka i kadmiya pochvami i pochvennymi komponentami. [Patterns of sorption of zinc and cadmium by soils and soil components]. Cink i kadmij v okruzhayushchej srede [Zinc and cadmium in the environment]. Moscow: Nauka, 1992. P. 106–118.

Pryamoe opredelenie soderzhaniya rtuti v pishchevyh produktah, prodovol'stvennom syr'e, kormah, kombikormah i syr'e dlya proizvodstv. [Direct determination of mercury content in food products, food raw materials, feed, compound feeds and raw materials for production]. Metodika kolichestvennogo analiza. [Quantitative Analysis Technique]. M 04-46-2007. St. Petersburg, 2007.

Opredelenie tyazhelyh metallov v pochvah i donnyh otlozheniyah atomno-absorbcionnym metodom. [Determination of heavy metals in soils and bottom sediments by atomic absorption method]. Metodika kolichestvennogo analiza. [Quantitative Analysis Technique]. M 02-902-125-2005. St. Petersburg, 2005. 32 p.

Christensen T. H. Cadmium soil sorption at low concentrations: I. Effect of time, cadmium load, pH, and calcium // Water, Air, and Soil Pollution, 1984, v. 21, issue 1–4, pp. 105–114.

Hu W., Huang B., Borggard Ole K., Ye M., Tian K., Zhang H., Holm P. E. Soil threshold values for cadmium based on paired soil-vegetable content analyses of greenhouse vegetable production systems in China: Implication for safe food production // Environ. Pollut., 2018, v. 241, pp. 922–929.

Jia Q., Zhu X., Hao Y., Yang Z., Wang Q., Fu H., Yu H. Mercury in soil, vegetable and human hair in a typical miningarea in China: Implication for human exposur // J. Environ. Sciences. 2018. Vol. 68. pp. 73–82.

Krishamurty G. S. R., McArthur D. F. E., Wang M. K., Huang P. M. Biogeochemistry of soil cadmium and the impact on terrestrial food chain contamination // Biogeochemistry of trace elements in the rhizosphere. Ed.: G. R. Gobran, D. M. Huang. Elsevier Science, Amsterdam, 2005, pp. 197–257.

Lagerwerff J. V. Lead, mercury and cadmium in environmental contaminants // Micronutrients in Agriculture. 1972. pp. 593–636.

Soil remediation and plant: Prospects and challenges. Ed.: K. Hakeem, M. Sabir, M. Ozturk, A. Mermut. Academic Press, 2014. 752 p.

Sorteberg A. The effect of some heavy metals on oats in pot experiments with three different soil types // Agricultural and Food Science, 1974, v. 46 (3), pp. 277–278.

Szymczak J., Grajeta H. Mercury contents in soil and plant material // Polish J. Food nutr. Science, 1992, v. 1, no. 2, pp. 31–39.

Tarradellas J., Bitton G. Chemical pollutants in soil. In: Soil ecotoxicology. Ed.: J. Tarradellas, G. Bitton, D. Rossel. Boca Raton: CRS Press, 1997, pp. 3–33.

Xu J., Kleja D. B., Biester H., Lagerkvist A., Kumpiene J. Influence of particle size distribution, organic carbon, pH and chlorides on washing of mercury contaminated soil // Chemosphere, 2014, v. 109, pp. 99–105.

УДК 631.434:631:95 DOI: 10.25695/AGRPH.2020.01.03

ОЦЕНКА АНТРОПОГЕННОГО ВЛИЯНИЯ НА СТРУКТУРУ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АГРОЭКОСИСТЕМ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ

С. И. Зинченко, И. М. Щукин

ФГБНУ «Верхневолжский федеральный аграрный научный центр»
601261, Владимирская обл., Суздальский р-н, п. Новый, ул. Центральная, 3
E-mail: zinchenkosergei@mail.ru

Поступила в редакцию 19 августа 2019 г., принята к печати 25 февраля 2020 г.

В агроэкосистемах на серой лесной и дерново-подзолистых почвах содержание агрономически ценных агрегатов и коэффициент структурности зависят от уровня антропогенного воздействия. Интенсивное механическое рыхление почвы в агроэкосистемах с помощью вспашки приводит к