

Научная статья

УДК 631.89/95:631.45

doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-1-81-88

ВЛИЯНИЕ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА АККУМУЛЯЦИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВАХ В УСЛОВИЯХ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Наталья Михайловна Троц¹, Анна Алексеевна Бокова²✉

^{1, 2}Самарский государственный аграрный университет, Усть-Кинельский, Самарская область, Россия

¹troz_shi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3774-1235>

²anuta1998b@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5193-364X>

Резюме. Цель исследований – разработка приемов повышения продуктивности ярового ячменя и минимализации содержания тяжелых металлов за счет применения комплексных органоминеральных удобрений на черноземе обыкновенном центральной агроклиматической зоны Самарской области. В 2022 и 2023 гг. были заложены полевые опыты по изучению действия различных норм органоминеральных удобрений (ОМУ) на содержание тяжелых металлов в почве. Валовое содержание и концентрация подвижных форм тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Mn, Fe) находились ниже принятых ОДК и ПДК. Наибольшее значение валового содержания Pb, Zn, Fe и Mn, а также подвижных форм Fe, выявлено на вариантах с внесением в почву ОМУ в норме $N_{150}P_{150}$, что превышает контроль в 3,6, 1,5, 1,6, 2,8 и 1,3 раза, соответственно. Наибольшее значение валовой меди, 7,2 мг/кг, отмечено на варианте МУ $N_{100}P_{100}$, а подвижных форм Cu, Mn и Zn – на фоне аммиачной селитры. Валовое содержание и концентрация подвижного кадмия на всех вариантах опыта составили менее 1,0 мг/кг. На основании значений валового содержания тяжелых металлов в почве были вычислены кларки концентрации (K_k) и рассеяния (K_p) элементов, а также коэффициент концентрации (K_c). Марганец на всех вариантах опыта имел наибольшие значения коэффициента концентрации K_c 0,34–0,96 среди изученных элементов. Далее по уменьшению значений относительной концентрации расположились цинк, свинец и медь, на контроле K_c , соответственно, равен 0,15, 0,12, 0,11. Коэффициент концентрации железа варьирует от 0,10 до 0,17, элемент является наиболее рассеивающимся. Расчет геохимического индекса почвы показал, что накапливающийся элемент – кадмий, а марганец, цинк, свинец, медь и железо являются рассеивающимися.

Ключевые слова: тяжелые металлы, органоминеральные удобрения, кларк концентрации, коэффициент концентрации, черноземные почвы.

Для цитирования: Троц Н. М., Бокова А. А. Влияние органоминеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в черноземных почвах в условиях Среднего Поволжья // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2024. №1. С. 81–88. doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-1-81-88

Original article

INFLUENCE OF ORGANOMINERAL FERTILIZERS ON THE ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN CHERNOZEM SOILS UNDER CONDITIONS OF THE MIDDLE VOLGA REGION

Natalya M. Trots¹, Anna A. Bokova²✉

^{1, 2}Samara State Agrarian University, Ust-Kinelsky, Samara region, Russia

¹troz_shi@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3774-1235>

²anuta1998b@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-5193-364X>

Abstract. The purpose of the research is to develop methods for increasing the productivity of spring barley and minimizing the content of heavy metals through the use of complex organomineral fertilizers on ordinary chernozem in the central agroclimatic zone of the Samara region. In 2022 and 2023, field experiments were carried out to study the effect of various rates of organomineral fertilizers (OMF) on the content of heavy metals in the soil. The gross content and concentration of mobile forms of heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, Mn, Fe) were below the accepted APC and MPC. The highest value of the gross content of Pb, Zn, Fe and Mn, as well as mobile forms of Fe, was found in

the variants with the addition of OMF to the soil at a rate of $N_{150}P_{150}$, which exceeds the control by 3.6, 1.5, 1.6, 2.8 and 1.3 times respectively. The highest value of gross copper, 7.2 mg/kg, was observed in the $N_{100}P_{100}$ variant, and the mobile forms of Cu, Mn and Zn were observed against the background of ammonium nitrate. The gross content and concentration of mobile cadmium in all variants of the experiment was less than 1.0 mg/kg. Based on the values of the gross content of heavy metals in the soil, the clarks of concentration (Kк) and dispersion (Kp) of elements, as well as the concentration coefficient (Kc), were calculated. In all variants of the experiment, manganese had the highest values of the concentration coefficient Kc of 0.34-0.96 among the studied elements. Next in decreasing relative concentration values are zinc, lead and copper; in the control, Kc is respectively equal to 0.15, 0.12, 0.11. The concentration coefficient of iron varies from 0.10 to 0.17, the element is the most dissipative. Calculation of the soil geochemical index showed that the accumulating element is cadmium, while manganese, zinc, lead, copper and iron are dissipating.

Key words: heavy metals, organomineral fertilizers, clark concentration, concentration coefficient, chernozem soils.

For citation: Trots, N. M. & Bokova, A. A. (2024). Influence of organomineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in chernozem soils under conditions of the Middle Volga region. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 1, 81–88 (in Russ.). doi: 10.55170/1997-3225-2024-9-1-81-88

Одной из основных задач агропромышленного комплекса страны является производство экологически безопасных продуктов питания. В настоящее время возросло антропогенное воздействие на биосферу, в связи с чем необходимо контролировать содержание различных веществ. Особую угрозу для агробиоценозов представляют тяжелые металлы (ТМ), т.к. они накапливаются в агросистемах и включаются в метаболические циклы живых организмов, образуя канцерогенные соединения, обладающие высокой токсичностью [1].

Загрязнение почв тяжелыми металлами является одним из факторов уменьшения плодородия почв и ценности земель, что обусловлено падением биопродуктивности угодий. Качество сельскохозяйственной продукции падает, вода и воздушная среда загрязняются тяжелыми металлами. Все это приводит к экономическим убыткам [2].

Ячмень – ценная продовольственная, фуражная и техническая культура. По сравнению с другими зерновыми культурами ячмень обладает высокой биологической ценностью. Для повышения урожая и качества зерна большое значение отводится обработке семян и посевов органоминеральными удобрениями при возделывании ячменя, так как удобрения стимулируют рост и развитие растений, увеличивая продуктивность культуры и устойчивость к стрессам [3]. Одним из современных технологических решений для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства и качества продукции является применение органоминеральных удобрений, содержащих в своем составе полный набор как макро-, так и микроэлементов.

На сегодняшний день проведение исследований по агроэкологической эффективности применения органоминеральных удобрений актуально и является важным элементом в научной системе разработки эффективных и экологически безопасных удобрений для нужд агропромышленного комплекса. В агрохимических и экологических исследованиях необходимы сведения как о концентрации подвижных соединений тяжелых металлов, так и о валовом содержании их в почвах различных типов. Известно, что тяжелые металлы способны оказывать отрицательное воздействие на живые организмы в случае их избытка. В то же время в небольших концентрациях многие из них (цинк, медь, марганец, железо и кобальт) являются жизненно необходимыми [4, 5].

Цель исследований – разработка приемов повышения продуктивности ярового ячменя и минимализации содержания тяжелых металлов за счет применения комплексных органоминеральных удобрений на черноземе обыкновенном центральной агроклиматической зоны Самарской области.

Задачи исследований – установить степень влияния различных норм органоминеральных удобрений на валовое содержание тяжелых металлов в пахотном горизонте на черноземе обыкновенном под посевы ярового ячменя; выявить динамику изменения подвижных форм цинка (Zn), свинца (Pb), железа (Fe), меди (Cu), марганца (Mn) и кадмия (Cd) в пахотном горизонте; рассчитать кларки концентрации и рассеивания, коэффициент концентрации тяжелых металлов.

Материал и методы исследований. Для решения поставленных задач в 2022 и 2023 гг. заложены полевые опыты по изучению действия различных норм органоминеральных удобрений на содержание тяжелых металлов в почве в условиях центральной агроклиматической зоны умеренного увлажнения Самарской области. Экспериментальная работа проводилась с учетом методики опытного дела Б. А. Доспехова [6], методических указаний по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями [7], основ научных исследований в агрономии по В. Ф. Моисейченко [8], основ учета фитопатологических изменений растений (М. К. Хохряков, 2003) [9].

По метеорологическим данным, за 2022 год общее количество выпавших осадков составило 321,6 мм. В апреле выпало 40 мм осадков, что на 10 мм выше среднееголетних значений. Это позволило накопить продуктивную влагу и в последующем успешно пройти фазу кущения. За вегетационный период (май – август) выпало 130 мм осадков, что на 60 мм меньше, чем среднееголетние значения. В 2023 году апрель оказался засушливым и жарким, из-за чего к началу полевых работ в пахотном горизонте не было достаточного количества влаги, а температура воздуха превысила норму в 2 раза. Жаркая погода продолжалась с третьей декады июля и в августе, который оказался засушливым месяцем, но к этому времени опытные растения достигли фазы полной спелости и были убраны. В целом за период январь – июль в районе опытного поля выпало всего 131,8 мм атмосферных осадков, при среднееголетних значениях в 266 мм, или в 2 раза ниже нормы. Таким образом, в 2023 году вегетация ярового ячменя проходила в засушливых и жарких погодных условиях.

Опыт закладывался в 3-кратной повторности, площадь делянки составляла 500 м². Схема полевого опыта включала следующие варианты: 1. Без удобрений (контроль); 2. Удобрение – аммиачная селитра, доза N₂₀. 3. Минеральное удобрение (МУ) сульфоаммофос NP(S) 16:20(12) в дозе N₅₀P₅₀. 4. Комплексное органоминеральное удобрение (ОМУ) аналог сульфоаммофос NP(S) 20:20 (14) в дозе N₅₀P₅₀. 5. МУ в дозе N₁₀₀P₁₀₀. 6. ОМУ в дозе N₁₀₀P₁₀₀. 7. МУ в дозе N₁₅₀P₁₅₀. 8. ОМУ в дозе N₁₅₀P₁₅₀. Агротехника в опыте – общепринятая для ярового ячменя в центральной агроклиматической зоне Самарской области. Осенью проводилась зяблевая вспашка плугом ПЛН8 К744 и Lemken на глубину 24-26 см. Система весенней обработки почвы состояла из боронования. Далее в оптимальные агротехнические сроки производился посев ячменя с одновременной культивацией и внесением удобрений при помощи посевного комплекса Salford. Норма высева семян определялась в расчете 5,3 млн шт. всхожих семян на 1 га (260 кг/га). Следующий этап обработки включал прикапывание посевов. Почвенные образцы для анализа отбирали с использованием общепринятых методов (В. А. Алексеенко) (ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа»). Валовое содержание и концентрацию подвижных форм тяжелых металлов: цинка, свинца, кадмия, железа, марганца и меди определялось методом атомно-абсорбционной спектроскопии (М-МВИ-80-2008).

Результаты исследований. Посев ячменя на всех вариантах полевого опыта производился в один день – 12 апреля при температуре воздуха 10-12 °С и при температуре почвы на глубине заделки семян 6-7°С, что является оптимальным сроком для посева данной культуры.

Проведенные исследования показали, что валовое содержание и концентрация подвижных форм тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Mn, Fe) находились ниже принятых ОДК и ПДК (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания») (табл. 1).

В вариантах опыта: аммиачная селитра N₂₀, МУ N₅₀P₅₀, ОМУ N₅₀P₅₀, МУ N₁₀₀P₁₀₀, ОМУ N₁₀₀P₁₀₀, МУ N₁₅₀P₁₅₀, ОМУ N₁₅₀P₁₅₀ наблюдается увеличение содержания тяжелых металлов.

В почвах всех исследуемых участков содержание высокотоксичного кадмия ниже 1 мг/кг, что соответствует норме и ниже ОДК в 2 раза.

Валовое содержание свинца варьировало в диапазоне 1,20-4,40 мг/кг, а значение подвижных форм имели значения от 1,0 до 1,9 мг/кг, что соответственно в 30 и 130 раз ниже ОДК. Минимальная концентрация 1,2 и 1,0 мг/кг была характерна для контрольного варианта. Внесение аммиачной селитры увеличивает валовое содержание и концентрацию подвижной формы свинца в 2,2 и 1,8 раза, соответственно. Применение минеральных удобрений повышает валовое содержание

свинца в 1,1-2,7 раз, подвижных форм – в 1,2-1,9 раза, органоминеральные удобрения приводят к росту его валовой концентрации в 1,4-3,7 раз, содержание подвижной формы увеличивается при внесении удобрения в 1,4-1,8 раз. Наибольшая концентрация подвижного свинца (1,90 мг/кг) была выявлена на варианте МУ N₁₀₀P₁₀₀.

Таблица 1

Валовое содержание и содержание подвижных форм тяжелых металлов в черноземе обыкновенном при внесении минеральных и органоминеральных удобрений под посевы ярового ячменя, мг/кг

Вариант опыта	Элемент					
	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe
Контроль	<1,0*	1,20	3,1	8,7	215	3053
	<1,0	<1,0	1,9	6,0	178	3008
Аммиачная селитра N ₂₀	<1,0	2,60	5,0	10,3	332	2990
	<1,0	1,80	2,4	9,5	311	2916
МУ N ₅₀ P ₅₀	<1,0	1,90	3,1	8,3	212	3334
	<1,0	1,50	2,3	7,2	181	2768
ОМУ N ₅₀ P ₅₀	<1,0	1,70	2,3	10,5	291	3599
	<1,0	1,59	2,2	8,5	206	3407
МУ N ₁₀₀ P ₁₀₀	<1,0	3,20	7,2	10,7	512	3064
	<1,0	1,90	2,0	8,1	201	2347
ОМУ N ₁₀₀ P ₁₀₀	<1,0	2,20	6,9	11,1	279	4502
	<1,0	1,42	2,3	8,5	200	2894
МУ N ₁₅₀ P ₁₅₀	<1,0	1,35	5,5	10,8	270	3599
	<1,0	1,20	2,0	8,3	252	2631
ОМУ N ₁₅₀ P ₁₅₀	<1,0	4,40	6,7	12,8	602	>5000
	<1,0	1,80	2,1	8,6	240	3821
ОДК	2,0	130	132	220	1500	38000

Примечание. * – в числителе дроби валовое содержание элемента, в знаменателе — подвижная форма.

Медь – один из наименее подвижных тяжелых металлов. Известно много органических и минеральных соединений, которые образуют различные по растворимости комплексы с медью. Валовое содержание меди в исследуемых вариантах варьировало от 2,3 до 7,2 мг/кг, что в 18-57 раз ниже ОДК. Увеличение концентрации меди на 61% по сравнению с контрольным вариантом наблюдается на фоне внесения аммиачной селитры. При внесении органоминеральных и минеральных удобрений в дозах N₁₀₀P₁₀₀ и N₁₅₀P₁₅₀ наблюдается рост содержания меди в почве в 1,8-2,3 раза по сравнению с контролем. Минимальные нормы удобрений (МУ N₅₀P₅₀ и ОМУ N₅₀P₅₀) не приводят к увеличению содержания меди в почве, а ОМУ в дозе N₅₀P₅₀ на четверть (25,8%) снижают данный показатель. Содержание подвижной меди варьирует в пределах 1,9-2,4 мг/кг, что в 55-70 раз меньше ОДК [6]. Концентрация подвижной формы меди на всех вариантах опыта с внесением удобрений имела близкие значения и отличалась от контроля на 5,3-26,3%, наибольшая концентрация выявлена на варианте с внесением аммиачной селитры – 2,4 мг/кг, что превышает контроль в 1,3 раза.

Валовое содержание цинка на всех вариантах опыта составило 8,3-12,8 мг/кг, подвижной формы цинка – 6,0-9,5 мг/кг, что ниже принятых значений ОДК в 17-37 раз, соответственно. Минимальное значение валовой формы, 8,3 мг/кг, оказалось на делянках с применением МУ в дозе 50 мг/кг. Варианты опыта с внесением аммиачной селитры, ОМУ N₅₀P₅₀, МУ N₁₀₀P₁₀₀, ОМУ N₁₀₀P₁₀₀, МУ N₁₅₀P₁₅₀ и ОМУ N₁₅₀P₁₅₀, содержат на 20,7-47,1% больше валового цинка в сравнении с контролем. Подвижный цинк имел наименьшую концентрацию, равную 6,0 мг/кг, на делянках без внесения удобрений. Минеральные и органоминеральные компоненты, а также аммиачная селитра на 20,0-58,3% увеличивали данный показатель. В почвенных образцах, на варианте с ОМУ в дозе N₁₅₀P₁₅₀, содержалось максимальное количество валового цинка, 12,8 мг/кг, а подвижные формы цинка с применением аммиачной селитры накапливались в количестве, превышающем контроль в 1,6 раза.

В почвенных образцах валовое содержание марганца колебалось от 212 до 602 мг/кг, что в 2,5-7,0 раз меньше установленного допустимого значения. Внесение аммиачной селитры привело к возрастанию данного показателя на 54,4% по сравнению с контролем. Внесение как минеральных, так и органических удобрений увеличивает количество Mn в почве в 1,3-2,8 раз. В целом,

повышение дозы МУ и ОМУ ведет в росту концентрации марганца, на варианте опыта МУ N₅₀P₅₀ наблюдалось уменьшение данного показателя относительно контроля на 1,4 %. Содержание подвижных форм марганца варьировало от 178 мг/кг на контрольном варианте до 311 мг/кг при использовании аммиачной селитры, что ниже ПДК в 4,8-8,4. Применение аммиачной селитры увеличивает концентрацию подвижного марганца на 74,7% по сравнению с контролем. Минеральные и органоминеральные удобрения способствовали повышению содержания подвижного Mn на 1,7-41,6%, что оказалось в 2 раза ниже, чем при использовании в качестве удобрения аммиачной селитры.

Валовое содержание железа варьировало от 2990 до 5000 мг/кг. Эти значения оказались в 7,8-12,7 раз меньше ОДК (СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»). Внесение аммиачной селитры привело к уменьшению общего количества железа в почве на 2% относительно контроля. Минеральные удобрения повышают данный показатель на 0,4-17,9% в зависимости от применяемой дозы по сравнению с контрольным вариантом. Органоминеральные удобрения, в свою очередь, оказали влияние на содержание валовых форм Fe, повысив его концентрацию в 1,2-1,6 раза. Максимальное количество, более 5000 мг/кг, было отмечено на варианте опыта с внесением ОМУ N₁₅₀P₁₅₀. Подвижные формы железа содержались в почвах опытных делянок в пределах 2347-3821 мг/кг, что ниже установленной допустимой концентрации в 10-16 раз. Использование в качестве удобрения аммиачной селитры приводит к снижению этого показателя на 3%. Сульфоаммофос в виде минерального удобрения при всех нормах уменьшает концентрацию подвижного железа на 8,0-22,0%. Органоминеральные удобрения в нормах N₅₀P₅₀ и N₁₅₀P₁₅₀ повышают подвижность Fe на 13,2 и 27,0%, соответственно. Максимальное значение, 3821 мг/кг, отмечено на варианте опыта с внесением ОМУ в норме 150 кг/га.

На основании значений валового содержания тяжелых металлов в почве были вычислены кларки концентрации (K_к) и рассеяния (K_р) элементов, а также коэффициент концентрации (K_с) (ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа») (табл. 2).

Таблица 2

Кларки концентрации, рассеяния и коэффициент концентрации тяжелых металлов при внесении минеральных и органоминеральных удобрений под посевы ярового ячменя

Вариант опыта	Cd	Pb	Cu	Zn	Mn	Fe
Контроль	<u>7,69*</u>	<u>13,33</u>	<u>15,16</u>	<u>9,54</u>	<u>4,65</u>	<u>15,23</u>
	1,43	0,12	0,11	0,15	0,34	0,10
Аммиачная селитра N ₂₀	<u>7,69</u>	<u>6,15</u>	<u>9,40</u>	<u>8,06</u>	<u>3,01</u>	<u>15,55</u>
	1,43	0,26	0,17	0,17	0,53	0,10
МУ N ₅₀ P ₅₀	<u>7,69</u>	<u>8,42</u>	<u>15,16</u>	<u>10,00</u>	<u>4,72</u>	<u>13,95</u>
	1,43	0,19	0,11	0,14	0,34	0,11
ОМУ N ₅₀ P ₅₀	<u>7,69</u>	<u>9,41</u>	<u>20,43</u>	<u>7,90</u>	<u>3,44</u>	<u>12,92</u>
	1,43	0,17	0,08	0,18	0,46	0,12
МУ N ₁₀₀ P ₁₀₀	<u>7,69</u>	<u>5,00</u>	<u>6,53</u>	<u>7,76</u>	<u>1,95</u>	<u>15,18</u>
	1,43	0,32	0,25	0,18	0,81	0,10
ОМУ N ₁₀₀ P ₁₀₀	<u>7,69</u>	<u>7,27</u>	<u>6,81</u>	<u>7,48</u>	<u>3,58</u>	<u>10,33</u>
	1,43	0,22	0,24	0,19	0,44	0,15
МУ N ₁₅₀ P ₁₅₀	<u>7,69</u>	<u>11,85</u>	<u>8,55</u>	<u>7,69</u>	<u>3,70</u>	<u>12,92</u>
	1,43	0,14	0,19	0,18	0,43	0,12
ОМУ N ₁₅₀ P ₁₅₀	<u>7,69</u>	<u>3,64</u>	<u>7,01</u>	<u>6,48</u>	<u>1,66</u>	<u>9,30</u>
	1,43	0,44	0,23	0,22	0,96	0,17

Примечание. * – в числителе дроби значение кларка концентрации и рассеяния, в знаменателе — коэффициент концентрации элементов.

Кларк концентрации показывает, как отличается содержание химического элемента в изучаемом природном объекте от его кларка в земной коре. Если концентрация металла меньше его кларка, то пользуются понятием «кларк рассеяния», т.к. химический элемент в изучаемом объекте не накапливается, а рассеивается (ГОСТ 17.4.4.02-2017 «Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического,

гельминтологического анализа»).

Содержание кадмия оказалось одинаковым во всех вариантах опыта, и рассчитанный кларк концентрации составил 7,69. Как показали расчеты, элементы Pb, Cu, Zn, Mn и Fe являются рассеивающимися, поэтому для них был рассчитан кларк рассеяния. Во всех вариантах опыта наименьшее значение Кр отмечено для марганца, его концентрация оказалась наиболее близкой к содержанию этого элемента в земной коре. Внесение как минеральных, так и органоминеральных удобрений (за исключением МУ N₅₀P₅₀) ведет к возрастанию валового содержания марганца и, как следствие, к уменьшению на 0,95-2,99 кларка рассеяния. Наименьшее значение Кр марганца, 1,66, получено в варианте опыта ОМУ N₁₅₀P₁₅₀.

Внесение аммиачной селитры приводит к уменьшению кларка рассеяния свинца в 2 раза. Минеральные и органоминеральные удобрения увеличили содержание элемента и кларк рассеяния уменьшился, по сравнению с контролем, в 1,2-3,7 раз. Наименьшее значение, равное 3,64, выявлено на варианте ОМУ N₁₅₀P₁₅₀.

Медь в исследуемых почвах имеет высокие значения кларка рассеяния – от 6,53 до 20,43. На фоне аммиачной селитры концентрация меди повышается в 1,6 раз. Внесение минеральных удобрений в дозе N₅₀P₅₀ не повлияло на Кр, а органоминеральные в той же дозе даже способствовали снижению количества меди в почве и увеличили кларк рассеяния на 5,27. В вариантах опыта с внесением ОМУ N₅₀P₅₀, МУ N₁₀₀P₁₀₀, ОМУ N₁₀₀P₁₀₀, МУ N₁₅₀P₁₅₀ и ОМУ N₁₅₀P₁₅₀ происходило накопление металла, и кларк рассеяния по сравнению с контролем уменьшился в 1,8-2,3 раз.

Внесение аммиачной селитры, а также минеральных и органоминеральных удобрений привело к уменьшению кларка рассеяния цинка на 1,48-3,06 по сравнению с контролем. В варианте опыта МУ N₅₀P₅₀ показатель рассеяния Кр данного металла на 0,46 превысил контроль.

Железо оказалось наиболее рассеивающимся элементом в изученных опытных вариантах. Кларк рассеяния составил 9,30-15,55, максимальное значение выявлено на фоне аммиачной селитры. На вариантах опыта с внесением МУ и ОМУ Кр на 0,05-5,93 меньше контроля, что свидетельствует о накоплении железа при внесении минеральных и органоминеральных удобрений по сравнению с вариантами без применения удобрений.

Расчет кларков концентрации и рассеяния позволил выделить геохимические ассоциации накапливающихся и рассеивающихся элементов в образцах почвы. На основании расчетов можно судить о концентрации и рассеянии элементов в исследованных в опыте вариантах относительно земной коры. Для контрольного варианта ряд элементов можно представить следующим образом: накапливающийся химический элемент Cd_(7,69), а ассоциация рассеивающихся элементов: Mn_(4,65) — Zn_(9,54) — Pb_(13,33) — Cu_(15,16) — Fe_(15,23).

Из приведенного ряда следует, что в почве опытного участка идет накопление кадмия и рассеяние марганца, цинка, свинца, меди и железа. Причем марганец среди них рассеивается в наименьшей степени, а медь и железо – наиболее сильно, их концентрация в почве в 15 раз ниже, чем в земной коре.

Еще один важный ландшафтно-геохимический показатель — коэффициент концентрации или относительная концентрация химического элемента (Кс), который позволяет судить о том, во сколько раз содержание химического элемента в исследуемом образце почвы отличается от его регионального фоновое содержание.

Коэффициент концентрации кадмия составил больше 1,0 и на всех вариантах опыта равнялся 1,43. Относительная концентрация свинца варьировала в пределах 0,12-0,44, наибольшее значение выявлено на варианте опыта ОМУ N₁₅₀P₁₅₀. Внесение минеральных и органоминеральных удобрений приводило к росту данного показателя на 0,02-0,32. Рассчитанный коэффициент концентрации для меди равнялся от 0,08 до 0,25. Относительно контроля не происходит накопление меди только при внесении МУ и ОМУ в дозе N₅₀P₅₀. На фоне аммиачной селитры и в вариантах МУ N₁₀₀P₁₀₀, ОМУ N₁₀₀P₁₀₀, МУ N₁₅₀P₁₅₀ и ОМУ N₁₅₀P₁₅₀ отмечено увеличение содержания металла, что в свою очередь повысило значение Кс меди на 0,06-0,14 по сравнению с контрольным индексом.

При внесении минеральных и органоминеральных удобрений, а также аммиачной селитры возрастает коэффициент концентрации цинка на 0,02-0,07 относительно контроля. Причем с повышением дозы действующего вещества значение Кс увеличивается, достигая наибольшего значения

(0,22) на варианте ОМУ N₁₅₀P₁₅₀.

Марганец оказался элементом с наиболее близкой концентрацией к фоновому содержанию в черноземах Самарской области. Коэффициент концентрации варьировал в пределах 0,34-0,96, наибольшее его значение выявлено при внесении органоминеральных удобрений в дозе N₁₅₀P₁₅₀. При использовании аммиачной селитры Кс на 0,19 выше контроля. МУ в норме N₅₀P₅₀ не оказали влияния на относительную концентрацию марганца, а в остальных случаях Кс превосходит контрольный вариант в 1,3-2,8 раз.

Относительная концентрация железа составила 0,10-0,17. Наименьшее значение было выявлено в контрольном варианте, на фоне аммиачной селитры, а также при внесении минеральных удобрений в дозе N₁₀₀P₁₀₀. Минеральные удобрения в нормах N₅₀P₅₀ и N₁₅₀P₁₅₀ не оказали влияния на изменение содержания металла, и коэффициент концентрации незначительно отличается от контроля (на 0,01-0,02). Органоминеральные удобрения привели к возрастанию относительной концентрации железа в почве на 0,02-0,07, причем с повышением норм вносимого удобрения Кс увеличивается и достигает максимума (0,17) на варианте опыта ОМУ N₁₅₀P₁₅₀.

На основании полученных коэффициентов концентрации был составлен геохимический индекс почв, который позволяет наглядно оценить особенности накопления химических элементов в черноземе обыкновенном при внесении минеральных и органоминеральных удобрений под посевы ярового ячменя исследуемого участка. Для контрольного варианта данный ряд имеет вид:

$$\frac{\text{Cd}_{(1,43)}}{\text{Mn}_{(0,34)} \text{Zn}_{(0,15)} \text{Pb}_{(0,12)} \text{Cu}_{(0,11)} \text{Fe}_{(0,10)}}$$

В числителе указывается ассоциация элементов, которые накапливаются в данной почве, в знаменателе – ассоциация рассеивающихся элементов, а в части, предваряющей дробь – элементы, концентрация которых слабо отличается от фоновых значений.

Заключение. Концентрация всех изученных элементов (Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Fe) в исследуемых образцах черноземных почв при внесении минеральных и органоминеральных удобрений под посевы ярового ячменя не превышает ОДК и ПДК. Внесение как минеральных (аммиачная селитра и сульфоаммофос), так и органоминеральных удобрений приводит к увеличению валового содержания ТМ и их подвижности, что связано с подкислением почвы и переводом данных металлов в более подвижную форму. Наибольшее значение валового содержания Pb, Zn, Fe и Mn, а также подвижных форм Fe выявлено на вариантах с внесением в почву ОМУ в дозе N₁₅₀P₁₅₀, что превышает контроль в 3,6, 1,5, 1,6, 2,8 и 1,3 раза, соответственно. Наибольшее значение валовой меди, 7,2 мг/кг, отмечено на варианте МУ N₁₀₀P₁₀₀, подвижных форм Cu, Mn и Zn – на фоне аммиачной селитры. Превышение относительно контроля составило, соответственно, 2,3, 1,3, 1,8 и 1,6 раз. Валовое содержание и концентрация подвижного кадмия на всех вариантах опыта составили менее 1,0 мг/кг. Учитывая, что содержание Cu, Zn, Mn, Fe значительно ниже допустимых норм, данные элементы могут быть рассмотрены как эссенциальные. Расчеты кларков концентрации, рассеяния и коэффициента концентрации позволили выделить геохимические ассоциации накапливающихся и рассеивающихся элементов в образцах почвы относительно земной коры и их регионального фоновое содержание. Марганец на всех вариантах опыта имел наибольшие значения коэффициента концентрации Кс 0,34-0,96 среди изученных элементов. При внесении ОМУ в дозе N₁₅₀P₁₅₀ относительная концентрация марганца составила 0,96, это свидетельствует о том, что содержание Mn в исследуемой почве наиболее близко к его фоновой концентрации. Далее по уменьшению значений относительной концентрации расположились цинк, свинец и медь, на контроле Кс соответственно равен 0,15, 0,12, 0,11. Коэффициент концентрации железа варьирует от 0,10 до 0,17, элемент является наиболее рассеивающимся, что выявлено на всех вариантах опыта, кроме ОМУ N₅₀P₅₀, где наименьший коэффициент концентрации у меди (0,08 против 0,12 у железа). Расчет геохимического индекса почвы показал, что накапливающийся элемент – кадмий, а марганец, цинк, свинец, медь и железо являются рассеивающимися.

Список источников

1. Троц В. Б., Ахматов Д. А., Троц Н. М. Влияние минеральных удобрений на аккумуляцию тяжелых металлов в почве и фитомассе зерновых культур // Зерновое хозяйство России. 2015. № 1. С. 45–49.

2. Троц Н. М., Прохорова Н. В., Троц В. Б., Ахматов Д. А., Чернякова Г. И., Горшкова О. В., Виноградов Д. В., Костин Я. В. Тяжелые металлы в агроландшафтах Самарской области : монография. Кинель : РИО Самарской ГСХА, 2018. 220 с.
3. Костюченко А. А., Троц Н. М. Влияние органоминеральных удобрений на характер локализации тяжёлых металлов в основных сельскохозяйственных культурах // Вклад молодых ученых в аграрную науку Самарской области : сборник научных трудов. Самара : РИЦ Самарской ГСХА, 2011. С. 22–24.
4. Villiers F., Ducruix C., Hugouvieux V. et al. Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches // *Proteomics*. 2011. Vol. 11. P. 1650–1663.
5. Nagajyoti P. C., Lee K. D., Sreekanth T. V. M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environ. Chem. Lett.* 2010. Vol. 8. P. 199–216.
6. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. М. : Агропромиздат, 1985. 351 с.
7. Минеев В. Г., Паников В. Д., Тrepачев Е. П. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. М. : Всесоюзный научно-исследовательский институт удобрений и агропочвоведения имени Д. Н. Прянишникова, 1986. 147 с.
8. Моисейченко В. Ф., Трифонова М. Ф., Заверюха А. Х. и др. Основы научных исследований в агрономии. М. : Колос, 1996. 336 с.
9. Хохряков М. К., Доброзракова Т. Л. и др. Определитель болезней растений. М. : Лань, 2003. 552 с.
10. Прохорова Н. В., Матвеев Н. М. Распределение тяжелых металлов в почвенном покрове лесостепного и степного Поволжья (на примера Самарской области) : монография. Самара : Самарский государственный университет, 1996. 28 с.

References

1. Trots, V. B., Akhmatov, D. A. & Trots, N. M. (2015). The influence of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in the soil and phytomass of grain crops. *Zernovoe hozyajstvo Rossii (Grain Economy of Russia)*, 1, 45–49 (in Russ).
2. Trots, N. M., Prokhorova, N. V., Trots, V. B., Akhmatov, D. A., Chernyakova, G. I., Gorshkova, O. V., Vinogradov, D. V. & Kostin, Ya. V. (2018) *Heavy metals in agricultural landscapes of the Samara region*. Kinel : PC Samara State Agricultural Academy (in Russ).
3. Kostyuchenko, A. A. & Trots, N. M. (2011) The influence of organomineral fertilizers on the nature of localization of heavy metals in major agricultural crops. Contribution of young scientists to agricultural science Samara Region '11: *collection of scientific papers*. (pp. 22–24). Samara (in Russ).
4. Villiers, F., Ducruix, C. & Hugouvieux, V. et al. (2011). Investigating the plant response to cadmium exposure by proteomic and metabolomic approaches. *Proteomics*, 11, 1650–1663.
5. Nagajyoti, P. C., Lee, K. D. & Sreekanth, T. V. M. (2010). Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environ. Chem. Lett.* 8, 199–216.
6. Dospikhov, B. A. (1985). *Field experiment methodology*. Moscow : Agropromizdat (in Russ).
7. Mineev, V. G., Pannikov, V. D. & Trepachev, E. P. (1986). *Guidelines for conducting research in long-term experiments with fertilizers*. Moscow : All-Union Scientific Research Institute of Fertilizers and Agricultural Soil Science named after D. N. Pryanishnikova (in Russ).
8. Moiseichenko, V. F., Trifonova, M. F. & Zaveryukha, A. Kh. et al. (1996). *Fundamentals of scientific research in agronomy*. Moscow : Kolos (in Russ).
9. Khokhryakov, M. K. & Dobrozrakova, T. L. et al. (2003). *Determinant of plant diseases*. Moscow : Lan' (in Russ).
10. Prokhorova, N. V. & Matveev, N. M. (1996). *Distribution of heavy metals in the soil cover of the forest-steppe and steppe Volga region (based on the example of the Samara region)*. Samara : Samara State University (in Russ).

Информация об авторах:

Н. М. Троц – доктор сельскохозяйственных наук, профессор;
А. А. Бокова – аспирант.

Information about the authors:

N. M. Trots – Doctor of Agricultural Sciences, Professor;
A. A. Bokova – post-graduate student.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to the article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 7.02.2024; одобрена после рецензирования 26.02.2024; принята к публикации 1.03.2024.

The article was submitted 7.02.2024; approved after reviewing 26.02.2024; accepted for publication 1.03.2024.