

ВЛИЯНИЕ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ И МЕЛИОРАНТА НА ПОДВИЖНОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В СЛОЯХ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОГО

© 2025 г. С. В. Пугаев^{1,*}, Л. Н. Прокина¹

¹Мордовский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал Федерального аграрного научного центра Северо-Востока им. Н. В. Рудницкого
430904 Саранск, р.п. Ялга, ул. Мичурина, 5, Россия
*E-mail: niish-mordovia@mail.ru

Изучили степень подвижности (СП) Cd, Pb, Cu и Zn в пахотном (0–20 см) и подпахотном (21–40 см) слоях почвы при внесении фосфорно-калийных и азотных удобрений на фоне известкования и без него. Выявлено, что величины СП тяжелых металлов (ТМ) были в основном меньше при известковании. У Cu она варьировалась менее значительно по сравнению с другими металлами. Удобрения на фоне известкования достоверно понижали СП Cd по сравнению с контролем, а без него – увеличивали ее в обоих слоях. Вектор изменений СП металла в слоях при известковании зависел от доз азота в комплексе NPK. Фосфорно-калийные удобрения снижали СП металлов, а известкование усиливало их действие. Величины СП снижались до минимума с применением РК- и NPK-удобрений с низкой дозой азота в условиях известкования и без него, а при максимальной дозе азота – увеличивались. Известкование усиливало различия в СП между слоями в вариантах без азота, при его внесении – значительно снижало их. Известкование не изменяло расположение СП металлов по их величине в условиях опыта: Cd > Pb > Zn > Cu.

Ключевые слова: почва, удобрения, тяжелые металлы, подвижность.

DOI: 10.31857/S0002188125010106, **EDN:** VBZGPW

ВВЕДЕНИЕ

Длительное применение минеральных удобрений в современном сельском хозяйстве изменяет свойства почв, в том числе защитные, увеличивая риск загрязнения почвы, продукции и природных вод поллютантами [1–4].

Существенный вклад в увеличение уровня токсикантов в окружающей среде привносят тяжелые металлы (ТМ), которые из почвы не исчезают, а медленно мигрируют в сопредельные компоненты [4].

С удобрениями вносят различные металлы (мг/кг): Cu (Р_{сд} = 21.0–28.0, K_x = 0.44–18.0, N_{aa} = 2.0–8.8), Cd (Р_{сд} = 0.18–1.3, K_x = 0.04–1.5, N_{aa} = 0.08–0.1), Pb (Р_{сд} = 1.21–15.0, K_x = 0.31–4.9, N_{aa} = 0.1–0.57), в известняковой муке: Cu = 6.3–15.0, Cd = 0.18–2.2, Pb = 13.7–28.0 [5–7]. Также трансформируются фракции ТМ и изменяется степень их подвижности (СП) в удобренных почвах по сравнению с неудобренными [8–11]. Токсичность и подвижность ТМ в почве может усиливаться при полиэлементном загрязнении.

Однако пока недостаточно исследований по изучению изменения СП ТМ в почве при длительном

совместном применении различных средств химизации [12, 13]. В этой связи возрастает ценность исследований в длительных стационарных полевых опытах с удобрениями для разработки современных экологически безопасных и эффективных агротехнологий.

Цель работы – изучение степени подвижности Cd, Pb, Cu и Zn в слоях чернозема выщелоченного под влиянием длительного применения комплекса средств химизации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в Мордовском НИИСХ – филиале ФАНЦ Северо-Востока на базе длительного стационарного полевого опыта, заложенного в 1972 г. Почва – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый по классификации Добривольского [14]. Агротехническая характеристика (слой 0–20 см) перед закладкой опыта: содержание гумуса – 8.7 ± 0.5%, pH_{H2O} 6.3 ± 0.1 ед., pH_{KCl} 5.4 ± 0.1, H_r и S – 6.2 ± 0.3 и 32.6 ± 0.8 ммоль(экв)/100 г соответственно, V – 84 ± 2%, P₂O₅ – 65 ± 15 и K₂O – 12 ± 38 мг/кг.

Посевная площадь делянки – 112.5 м² (7.5 × 15 м), учетная для зерновых – 75 м² (5 × 15 м), повторность трехкратная. Опыт заложен методом расщепленных делянок [15]. Блок делянок 1-го порядка: 1 – без известкования с 1972 г. (контроль), 2 – известкование по 0.5 гидролитической кислотности (г.к.). Делянки 2-го порядка: I – без удобрений с 1972 г. (контроль), II – фосфорно-калийные удобрения (Р50К80), III – РК + Н30, IV – РК + Н90.

Известкование проводили перед закладкой опыта в 1972 г. и в 2000 г. Минеральные удобрения вносили в соответствии со схемой опыта поделяночно, вручную: Р_{cd} и K_x – под основную обработку почвы, N_{aa} – ежегодно весной.

Последовательность культур в зернотравянопашном севообороте: яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) – яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) + многолетние травы – многолетние травы 1-го года пользования – многолетние травы 2-го года пользования – многолетние травы 3-го года пользования – озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) – яровая пшеница (*Triticum monococcum* L.) – соя культурная (*Glycine max* (L.) Merr.) – овес посевной (*Avena sativa* L.), многолетние травы – кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.). Агротехника культур – рекомендованная для условий Мордовии, кроме изученных факторов [16].

Почвенные пробы отбирали после уборки овса (2012 г.) с глубины 0–20 (пахотный слой) и 21–40 см (подпахотный слой) методом конверта. Лабораторные исследования, наблюдения и агрохимические анализы проводили в соответствии с общепринятыми методиками. Содержание подвижных (ПФ) и кислоторастворимых форм (КРФ) ТМ анализировали в трехкратной повторности атомно-адсорбционным методом (спектрометр “Квант”, Россия)

по методике [17]. Результаты доложены в работе [18]. На их основании определяли СП металлов в почве по методике [19]. Обработку данных проводили статистическими методами по [15] и сводили в таблицы с указанием средней величины, стандартной ошибки среднего. Достоверность различий вариантов оценивали по *t*-критерию Стьюдента (*td*).

Агроклиматические условия проведения опыта были типичными для зоны неустойчивого увлажнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

СП ТМ была различной у разных металлов и изменилась как в зависимости от слоя почвы, так и от воздействия средств химизации.

СП Cd в пахотном слое контрольной почвы без известкования оказалась практически равновеликой с его подвижностью в варианте II (РК-удобрения), а в других вариантах отмечена тенденция к увеличению подвижности металла в пахотном слое при усилении минерального питания (варианты III, IV) (табл. 1) и увеличении содержания ПФ Cd [18].

СП Cd в подпахотном слое контроля была значительно меньше, чем в пахотном. При этом содержание фосфатов было в этих слоях было одинаковым (табл. 2), а содержание ПФ Cd – меньше в подпахотном [18]. Использование РК-удобрений (вариант II) вызвало в подпахотном слое достоверное снижение СП Cd, вероятнее всего, из-за образования фосфатов металла в опыте, подобное отмечали другие авторы [13].

СП Cd достоверно увеличивалась в подпахотном слое варианта III с минимальной дозой азота в составе НРК-удобрения и становилась равной в обоих слоях при практически одинаковом содержании

Таблица 1. Зависимость степени подвижности (СП) ТМ в почве при действии изученных факторов, %

| Вариант | Слой почвы | | Достоверность различий* | |
|------------------------|------------|------------|-------------------------|--------------------------------|
| | 0–20 см | 21–40 см | пахотный слой | подпахотный слой |
| СП Cd | | | | |
| Без известкования | | | | |
| I. Контроль | 19.0 ± 0.8 | 17.2 ± 0.5 | – | I–II, I–III, II–III, II–IV |
| II. Р50К80 | 18.8 ± 0.8 | 15.1 ± 0.2 | | |
| III. Н30Р50К80 | 19.6 ± 0.7 | 19.9 ± 0.2 | | |
| IV. Н90Р50К80 | 20.4 ± 0.5 | 18.5 ± 0.5 | пах/п-пах–I, II | |
| Известкование 0.5 г.к. | | | | |
| I. Контроль | 18.3 ± 0.8 | 19.3 ± 0.6 | II–IV, III–IV | I–II, II–III, III–IV |
| II. Р50К80 | 17.5 ± 0.1 | 16.8 ± 0.1 | | пах/п-пах–IV |
| III. Н30Р50К80 | 18.2 ± 0.4 | 18.2 ± 0.4 | | изв/неизв–пах–IV, п-пах–III |
| IV. Н90Р50К80 | 16.4 ± 0.2 | 18.1 ± 0.3 | | |

Таблица 1. Окончание

| Вариант | Слой почвы | | Достоверность различий* | |
|------------------------|-------------|-------------|--|--|
| | 0–20 см | 21–40 см | пахотный слой | подпахотный слой |
| СП Pb | | | | |
| Без известкования | | | | |
| I. Контроль | 15.1 ± 2.6 | 9.98 ± 1.02 | I–II, II–III, III–IV | II–III |
| II. P50K80 | 10.2 ± 0.3 | 9.42 ± 0.12 | | |
| III. N30P50K80 | 6.94 ± 0.55 | 7.46 ± 0.32 | | |
| IV. N90P50K80 | 10.2 ± 0.8 | 11.9 ± 1.8 | | |
| Известкование 0.5 г.к. | | | | |
| I. Контроль | 8.11 ± 0.34 | 9.04 ± 0.57 | I–IV, II–IV, III–IV | I–II, I–III, I–IV |
| II. P50K80 | 6.30 ± 0.63 | 6.74 ± 0.39 | | |
| III. N30P50K80 | 6.35 ± 0.53 | 6.70 ± 0.37 | | пах/п-пах–IV, изв/неизв–пах–II, п-пах–II |
| IV. N90P50K80 | 11.9 ± 0.7 | 7.27 ± 0.11 | | |
| СП Cu | | | | |
| Без известкования | | | | |
| I. Контроль | 3.09 ± 0.09 | 3.58 ± 0.04 | – | I–II, I–III, III–IV |
| II. P50K80 | 3.07 ± 0.03 | 2.90 ± 0.03 | | |
| III. N30P50K80 | 3.36 ± 0.18 | 2.83 ± 0.03 | | |
| IV. N90P50K80 | 2.75 ± 0.04 | 3.37 ± 0.05 | | пах/п-пах–I, II, IV |
| Известкование 0.5 г.к. | | | | |
| I. Контроль | 3.13 ± 0.04 | 3.42 ± 0.09 | I–III, I–IV, II–III, II–IV, III–IV | I–II, I–IV, III–IV |
| II. P50K80 | 3.53 ± 0.05 | 2.93 ± 0.04 | | |
| III. N30P50K80 | 4.04 ± 0.02 | 3.18 ± 0.10 | | пах/п-пах–I, II, III |
| IV. N90P50K80 | 2.90 ± 0.07 | 2.99 ± 0.01 | | изв/неизв–пах–III, п-пах–III, IV |
| СП Zn | | | | |
| Без известкования | | | | |
| I. Контроль | 5.88 ± 0.06 | 7.69 ± 0.11 | I–II, I–III, III–IV | I–II, I–III, I–IV, II–III, II–IV, III–IV |
| II. P50K80 | 6.27 ± 0.10 | 6.87 ± 0.29 | | |
| III. N30P50K80 | 7.38 ± 0.17 | 6.63 ± 0.13 | | |
| IV. N90P50K80 | 5.76 ± 0.13 | 6.63 ± 0.14 | | пах/п-пах–I, III, IV |
| Известкование 0.5 г.к. | | | | |
| I. Контроль | 6.67 ± 0.02 | 6.61 ± 0.04 | I–II, I–III, III–IV | I–II, I–III, I–IV |
| II. P50K80 | 6.43 ± 0.13 | 5.39 ± 0.10 | | II–III, II–IV, III–IV |
| III. N30P50K80 | 7.73 ± 0.02 | 7.30 ± 0.11 | | пах/п-пах–II, III |
| IV. N90P50K80 | 6.81 ± 0.06 | 7.06 ± 0.13 | | изв/неизв пах–I, IV п-пах–I, II, III |

* Достоверность различий: I–II – между вариантами, пах–II – в пахотном слое варианта II, п-пах–III – в подпахотном слое варианта III, пах/п-пах–IV – между слоями варианта IV, изв/неизв–пах IV – в пахотном слое варианта IV между известкованным и неизвесткованным фонами.

фосфатов (табл. 2) и увеличении содержания ПФ металла в слоях [18].

При увеличении дозы азота в величинах СП металла проявлялись тенденции: в пахотном слое варианта IV – к увеличению, достигая максимума, как отмечали [13, 20], за счет высокой растворимости и подвижности соединений Cd с органическим

веществом, содержание которого увеличивалось в опыте с 9.0 в контроле до 9.5% в варианте IV, в подпахотном слое – к снижению при увеличении содержания фосфатов (табл. 2) и без изменений содержания ПФ металла [18].

Таким образом, СП Cd в пахотном слое изменилась недостоверно, но имела тенденцию

Таблица 2. Агрохимическая характеристика почвы вариантов опыта (2012 г.)

| Вариант | Органическое вещество, % | | рН _{KCl} | P ₂ O ₅ | | K ₂ O | |
|------------------------|--------------------------|-------------|-------------------|-------------------------------|------------|------------------|-----------|
| | 1 | 2 | | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Без известкования | | | | | | | |
| 1. Контроль | 9.03 ± 0.22 | 9.51 ± 0.09 | 4.81 ± 0.003 | 4.77 ± 0.003 | 123 ± 0.9 | 125 ± 0.6 | 156 ± 3.8 |
| 2. P50K80 | 9.78 ± 0.06 | 9.88 ± 0.06 | 4.69 ± 0.06 | 4.57 ± 0.03 | 190 ± 1.00 | 191 ± 1.2 | 171 ± 1.5 |
| 3. N30P50K80 | 9.69 ± 0.25 | 9.75 ± 0.16 | 4.73 ± 0.003 | 4.93 ± 0.003 | 229 ± 3.8 | 210 ± 2.5 | 156 ± 2.9 |
| 4. N90P50K80 | 9.52 ± 0.08 | 8.85 ± 0.11 | 4.73 ± 0.003 | 4.69 ± 0.003 | 240 ± 1.5 | 253 ± 2.7 | 157 ± 2.4 |
| Известкование 0,5 г.к. | | | | | | | |
| I. Контроль | 9.45 ± 0.05 | 8.97 ± 0.16 | 5.02 ± 0.003 | 5.20 ± 0.01 | 195 ± 0.7 | 168 ± 0.6 | 184 ± 3.3 |
| II. P50K80 | 9.39 ± 0.04 | 9.75 ± 0.04 | 5.07 ± 0.003 | 5.34 ± 0.003 | 214 ± 1.7 | 297 ± 1.5 | 237 ± 3.0 |
| III. N30P50K80 | 9.95 ± 0.05 | 9.65 ± 0.14 | 4.87 ± 0.02 | 4.82 ± 0.003 | 308 ± 1.2 | 297 ± 1.3 | 169 ± 2.0 |
| IV. N90P50K80 | 9.72 ± 0.10 | 9.01 ± 0.24 | 4.85 ± 0.00 | 4.85 ± 0.00 | 307 ± 2.0 | 288 ± 1.0 | 235 ± 12 |
| | | | | | | | 176 ± 3.5 |

Примечание. В графе 1 – слой 0–20 см, 2 – слой 21–40 см.

к увеличению до максимума в варианте IV. Она достоверно увеличивалась в подпахотном слое при внесении РК-удобрений (вариант II) и добавлении к ним низкой дозы азота (вариант III). При внесении более высокой дозы азота (вариант IV) были достоверными различия с контролем и с вариантом внесения РК-удобрений (вариант II).

Известкование по 0.5 г.к. вызвало тенденцию к снижению СП Cd в пахотном слое вариантов I, II и III, вызванную, вероятно, образованием прочных органо-минеральных соединений металла с кислотами сидерофоров злаков [10], а также увеличением содержания фосфатов (табл. 2). Внесение извести достоверно снижало СП Cd в варианте IV, где происходило увеличение содержания гумуса, фосфатов и КРФ [18].

СП металла имела тенденцию к увеличению в подпахотном слое после известкования в вариантах контроля и II, в варианте III – достоверное снижение, а в варианте IV изменений не отмечено. Тенденция к увеличению СП металла проявилась, видимо, из-за увеличения содержания ПФ металла, а к снижению – из-за увеличения содержания КРФ Cd в соответствующих вариантах, вызванное, вероятно, более значительным увеличением содержания КРФ металла, чем ПФ [18].

Значимых изменений не было выявлено при внесении удобрений после известкования по сравнению с пахотным слоем контрольного варианта. Однако СП Cd значимо увеличивалась при добавлении к РК-удобрениям низкой дозы азота (вариант III) вследствие увеличения содержания ПФ металла [18] и органического вещества, а также усиления кислотности почвы. Она достоверно снижалась до минимума при увеличении дозы азота (вариант IV) и содержания КРФ Cd [18], аналогичный результат получен авторами работы [21].

СП Cd – максимальная в подпахотном слое в контроле, достоверно снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II) вследствие снижения содержания ПФ металла [18] и увеличения количества фосфатов (табл. 2). Она увеличивалась в вариантах при внесении NPK-удобрений (варианты III и IV) по сравнению с вариантом II (РК-удобрения), но не достигала величины в контроле. В вариантах III и IV содержание фосфатов изменялось незначительно, но увеличивалось содержание ПФ металла [18]. Усиление дозы азота в NPK-удобрениях (вариант IV) не изменяло значимо СП металла по сравнению с вариантом III. Таким образом, только РК-удобрения (вариант II) так изменяли величину СП Cd, которая затем значимо различалась с контролем и вариантами применения NPK-удобрений (варианты III и IV).

СП Pb имела в пахотном слое контроля без известкования максимальную величину среди других вариантов из-за самого низкого содержания фосфатов (табл. 2) и высокого содержания ПФ металла [18]

(табл. 1). Она снижалась в варианте II (использование РК-удобрений) вследствие увеличения связей металла с органическим веществом, содержание которого увеличивалось. Также увеличивалась концентрация в почве фосфатов (табл. 2) и снижалось содержание ПФ Pb из-за связывания ими ионов металла [18]. На это указывали авторы в исследованиях на серых лесных почвах [13]. СП металла достигала минимума при внесении полного минерального удобрения с низкой дозой азота (вариант III) и значимо различалась с вариантом II вследствие увеличения содержания фосфатов (табл. 2) и минимального содержания ПФ металла [18]. СП Pb достоверно увеличивалась до уровня варианта II после увеличения дозы азота (вариант IV) из-за повышения содержания ПФ металла также до величины в варианте II [18] и при незначительном изменении содержания фосфатов. Таким образом, СП Pb при внесении минеральных удобрений значимо изменялась: в варианте II с РК-удобрениями отмечено снижение, которое продолжалось при внесении азота (вариант III), а при увеличении его дозы (вариант IV) – увеличивалась (табл. 1).

СП металла была в подпахотном слое контроля и варианта II значимо меньше, чем в пахотном слое соответствующих вариантов. Она имела тенденции: к снижению в вариантах II, III, в варианте IV – к увеличению. Значимое увеличение было отмечено при повышении дозы азота в NPK-удобрениях (вариант IV) из-за увеличения содержания ПФ металла [18] и снижения содержания органического вещества почвы (табл. 2).

Известкование вызвало тенденцию снижения СП Pb в пахотном и в подпахотном слоях контроля, вероятно, путем иммобилизации ПФ металла [22]. Оно значимо снижало СП Pb в подпахотном слое (табл. 1) при внесении РК-удобрений (вариант II) из-за более низкого содержания ПФ и более высокого содержания КРФ металла [18] и при увеличении содержания фосфатов в почве (табл. 2).

Известкование, как мощный агрохимический фактор, снижало СП металла в почве контроля, причем сильнее в пахотном слое, чем в подпахотном, но в обоих случаях это было недостоверно. Снижение СП металла усиливалось при применении РК-удобрений (вариант II) до значимых различий в обоих слоях. В других вариантах значимых различий не отмечено.

При известковании минеральные удобрения значимо снижали СП Pb по сравнению с контролем в подпахотном слое вариантов II и III, в варианте IV – в обоих слоях. Добавление к РК-удобрениям азота в низкой дозе (вариант III) не вызывало значимых изменений величины СП Pb в обоих слоях. Она значимо повышалась в пахотном слое варианта IV при увеличении дозы азота в NPK-удобрениях

из-за того, что увеличивалось содержание ПФ Pb [18], на это указывали подобные исследования с высокими дозами NPK [23].

Величина СП Pb снижалась в обоих слоях во всех вариантах с удобрениями и известкованием практически до величин, меньших контроля, кроме пахотного слоя варианта IV. Такой же результат получили в работе [21], вероятно, из-за увеличения адсорбции металла на гуминовых кислотах [24], т.к. содержание органического вещества увеличивалось (табл. 2). Таким образом, разные дозы азота в составе NPK-удобрения проявили разнонаправленное действие в сравнении с контролем.

СП Cu была минимальной среди других металлов в обоих слоях почвы, видимо, из-за образования меди более прочных по сравнению с другими металлами связей с органическим веществом черноземной почвы [25, 26]. Она незначимо варьировалась в пахотном слое вариантов без известкования при внесении минеральных удобрений (табл. 1). СП металла достоверно снижалась в подпахотном слое варианта II (внесение РК-удобрений), а при повышенной дозе азота (вариант IV) достоверно увеличивалась и сравнялась с контролем.

При известковании СП Cu претерпевала существенные изменения. В пахотном слое варианта II (РК-удобрения) проявлялась тенденция к ее увеличению. СП металла значимо увеличивалась при использовании NPK-удобрений с низкой дозой азота (вариант III), а при ее увеличении – достоверно снижалась (вариант IV), вероятно, из-за более низкой кислотности почвы (табл. 2). В подпахотном слое СП меди значимо снижалась при внесении РК-удобрений (вариант II) и при увеличенной дозе азота (вариант IV), когда росло содержание КРФ Cu [18] и снижалось содержание органического вещества (табл. 2). Оба слоя достоверно различались между собой в вариантах I и II в условиях без известкования и при известковании, причем в обоих случаях в варианте I СП Cu была больше в подпахотном слое, а в варианте II – в пахотном.

СП Zn значимо увеличивалась в пахотном слое в условиях без известкования при использовании РК-удобрений (вариант II) и при внесении NPK с низкой дозой азота (вариант III) (табл. 1). Вероятно, это происходило в результате повышения доступности металла вследствие минерализации органического вещества сидерофорами [7] и подкисления почвы (табл. 2). СП металла достоверно снижалась до уровня контроля при повышении дозы азота (вариант IV), подобное отмечено в работе [21]. В нашем случае было выявлено увеличение содержания КРФ Zn [18] и фосфатов (табл. 2). СП Zn значимо снижалась до минимума в подпахотном слое при внесении NPK-удобрений (вариант III и IV) по сравнению с контролем, вероятно, из-за значительного

увеличения содержания фосфатов и снижения содержания ПФ Zn [18].

Известкование разнонаправленно и значимо изменяло СП Zn в слоях почвы в контроле: повышало в пахотном и снижало в подпахотном, в которых соответствующим образом изменялось содержание ПФ металла [18], в результате чего величины его СП не имели достоверного различия между слоями (табл. 1). Внесение РК-удобрений (вариант II) значимо снижало СП Zn в пахотном слое из-за образования менее подвижных форм металла с фосфатами (КРФ) [18], в том числе при известковании [11, 27, 28] (табл. 2). Добавление к РК-удобрениям низкой дозы азота (вариант III) значимо по сравнению с контролем увеличивало СП металла до максимума в опыте (табл. 1) из-за того, что увеличивалось содержание ПФ Zn [18] и усиливалась кислотность в почве варианта III (табл. 2). Увеличение дозы азота в составе NPK (вариант IV) вызвало снижение СП Zn из-за повышения содержания ПФ металла [18] и снижения содержания органического вещества в почве варианта (табл. 2).

СП Zn значимо уменьшалась в подпахотном слое с внесением РК-удобрений (вариант II) после известкования в условиях снижения содержания ПФ металла [18], увеличения содержания фосфатов, снижения содержания органического вещества и уменьшения кислотности (табл. 2). Добавление к РК-удобрениям азота в низкой дозе (вариант III) способствовало значимому росту СП Zn, связанному, вероятно, с увеличением содержания ПФ металла [18] при неизменном содержании фосфатов и снижении содержания органического вещества в почве варианта.

Увеличение дозы азота (вариант IV) вызвало тенденцию к снижению СП Zn, вероятно, из-за роста содержания КРФ металла при неизменной величине его ПФ [18], снижения содержания органического вещества почвы варианта.

Таким образом, отдельное и совместное использование мелиоранта и разных видов и доз удобрений оказывало существенное влияние на изменения СП ТМ с проявлением общих закономерностей. Например, величины СП Cd, Pb и Zn были в основном меньше при известковании, а СП Cu варьировалась в условиях опыта менее значительно по сравнению с другими металлами. Удобрения на фоне известкования понижали СП Cd, а без него – увеличивали, причем вектор этих изменений в слоях часто зависел от доз азота в NPK. Фосфорно-калийные удобрения в основном снижали СП металлов, а известкование усиливало действие этих удобрений, снижая СП Cd и Zn в пахотном слое. Величины СП Pb снижались до минимума при применении РК- и NPK-удобрений с низкой дозой азота в условиях известкования и без него, а с максимальной дозой азота – увеличивались. Известкование усиливало различия в величинах СП Zn между слоями в вариантах применения

РК-удобрений, а при внесении азота различия значительно уменьшались.

Величины СП ТМ в условиях известкования и без него составили следующий ряд: Cd > Pb > Zn > Cu.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Действие и последействие длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и баланс макроэлементов в черноземе обыкновенном // Агрохимия. 2015. № 8. С. 49–56.
2. Пугаев С.В. Содержание и транслокация поллютантов в компонентах антропогенно измененных биогеоценозов в условиях Республики Мордовия: Автoref. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород: ННГУ, 2013. 23 с.
3. Boincean B., Nica L., Stadnic S. Fertilizarea si fertilitatea cenoziomului din stepa Baltului sub influenta intensificari tehnologice a agriculturii // 1^a Comferinta Internațională "Transfer de inovatii in actitatile agricole in contextual Schimbarii chemei si dezvoltarii durabile," Agroinform, Chisinau, 11–12 noiembrie, 2009. Р. 174–186.
4. Никитин Е.Д., Скворцова Е.Б., Кочергин А.Н., Никитина О.Г., Иванов О.П., Сабодина Е.П., Воронцова Е.М. О развитии учения об экологических функциях почвенного покрова и других геосфера // Почвоведение. 2010. № 7. С. 771–778.
5. Esitken A., Yildiz H.E., Ercisli S. Dönmez M.F., Turan M., Gunes A. Effects of plant growth promoting bacteria (PgPB) in yield, growth and nutrient contents of organically growth strawberry // Sci. Horticult. 2010. № 124. Р. 626.
6. Мязин Н.Г., Павлов Р.А., Шеина В.В. Влияние удобрений на накопление нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях и на продуктивность землянки зернопаропашного севооборота // Агрохимия. 2006. № 2. С. 22–29.
7. Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С. Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // Агрохим. вестн. 2014. № 3. С. 5–7.
8. Плеханова И.О., Золотарева О.А. Экологическое нормирование состояния почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохимия. 2020. № 10. С. 79–88.
9. Потатуева Ю.А. Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 2013. № 6. С. 83–94.
10. Romheld V., Marschner H. Evidence for a specific uptake system for iron phyto siderophores in roots of grasses // Plants Physiol. 1986. V. 80. P. 175–180.
11. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв (результаты 50-летних полевых опытов). СПб.: ЛНИИСХ РАСХН, 2010. 254 с.
12. Пугаев С.В. Особенности аккумуляции тяжелых металлов продуктивной частью сельскохозяйственных растений в различных агроэкологических условиях Республики Мордовия // Агрохимия. 2020. № 12. С. 71–80.
13. Якименко В.Н., Конарбаева Г.А. Трансформация фонда тяжелых металлов серой лесной почвы в агроценозе // Агрохимия. 2016. № 4. С. 61–69.
14. Классификация и диагностика почв СССР / Под ред. Г.В. Добровольского. М., 1977. 223 с.
15. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Колос, 1985. 423 с.
16. Адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Республики Мордовия (метод. рук-во). Саранск, 2003. 428 с.
17. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
18. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Влияние длительного применения средств химизации на содержание фракций Cd, Pb, Cu и Zn в слоях чернозема выщелоченного тяжелосуглинистого // Агрохимия. 2022. № 5. С. 43–55.
19. Манджиева С.С., Минкина Г.Н., Мотузова Г.Н., Головатый С.Е., Мирошниченко Н.Н., Лукашенко Н.К., Фатеев А.И. Фракционно-групповой состав соединений цинка и свинца как показатель экологического состояния почв // Почвоведение. 2014. № 5. С. 632–640.
20. Ямалдинова В.Р., Васбиеva M.Т., Фомин Д.С. Влияние систем удобрения на агрохимические показатели и накопление тяжелых металлов в почве и яровой пшенице (*Triticum aestivum* L.) // Пробл. агрохим. и экол. 2020. № 3. С. 39–43.
21. Черникова О.В., Карпов А.Н. Приемы восстановления плодородия черноземных почв, загрязненных тяжелыми металлами // Агрохим. вестн. 2014. № 2. С. 24–25.
22. Назарова Л.К., Дильмухаметова И.К., Егоров В.С., Кирличников Н.А., Морачевская Е.В., Карпухин М.М. Влияние длительного применения минеральных удобрений и известкования на состояние баланса свинца в агроценозе на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Московской области // Пробл. агрохим. и экол. 2018. № 2. С. 18–23.
23. Чеглакова О.А., Шихова Л.Н. Сезонная динамика содержания свинца в дерново-подзолистой почве при внесении минеральных удобрений // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2021. № 2. С. 234–243.
24. Переломов Л.В., Чилачева К.В., Швыкин А.Ю., Атрощенко Ю.М. Влияние органических веществ

- гумуса на поглощение тяжелых металлов глинистыми минералами // Агрохимия. 2017. № 2. С. 89–96.
25. Минкина Т.М., Пинский Т.М., Самохин А.П., Статовой А.А. Поглощение меди, цинка и свинца черноземом обыкновенным при моно- и полиэлементном загрязнении // Агрохимия. 2005. № 8. С. 58–64.
26. Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants. 4-th edit. Boca Raton, Florida: C.R.C. Press, 2010. 548 p.
27. Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Назаренко О.Г., Самохин А.П., Крыщенко В.С., Манджиева С.С. Влияние различных мелиорантов на подвижность цинка и свинца в загрязненном черноземе // Агрохимия. 2007. № 10. С. 67–75.
28. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.

Effect of Fertilizers and Meliorants on the Mobility of Cd, Pb, Cu and Zn in Layers of Leached Heavy Loam Chernozem

S. V. Pugaev^{a, #}, L. N. Prokina^a

^aMordovian Research Institute of Agriculture – Branch of the N.V. Rudnitsky Federal Agrarian Scientific Center of the North-East,
ul. Michurina 5, r.p. Yalga, Saransk 430904, Russia
#E-mail: niish-mordovia@mail.ru

The degree of mobility (DM) of Cd, Pb, Cu and Zn in arable (0–20 cm) and sub-arable (21–40 cm) soil layers was studied when applying phosphorus-potassium and nitrogen fertilizers on the background of liming and without it. It was revealed that the values of the DM of heavy metals (HM) were mainly lower during liming. In Cu, it varied less significantly compared to other metals. Fertilizers on the background of liming significantly lowered the Cd loss compared to the control, and without it – increased it in both layers. The vector of changes in the DM of the metal in the layers during liming depended on the doses of nitrogen in the NPK complex. Phosphorus-potash fertilizers reduced the DM of metals, and liming enhanced their effect. The values of DM decreased to a minimum with the use of PK- and NK-fertilizers with a low dose of nitrogen in liming conditions and without it, and increased with a maximum dose of nitrogen. Liming increased the differences in the joint venture between the layers in the nitrogen-free versions, and significantly reduced them when applied. Liming did not change the location of the metals in terms of their DM under experimental conditions: Cd > Pb > Zn > Cu.

Keywords: soil, fertilizers, heavy metals, mobility.