

УДК 631.81:631.416.8:631.445.41

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СРЕДСТВ ХИМИЗАЦИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ФРАКЦИЙ Cd, Pb, Cu И Zn В СЛОЯХ ЧЕРНОЗЕМА ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ТЯЖЕЛОСУГЛИНИСТОГО

© 2022 г. С. В. Пугаев<sup>1,\*</sup>, Л. Н. Прокина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Мордовский 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

Поступила в редакцию 19.07.2021 г.

После доработки 16.12.2021 г.

Принята к публикации 15.02.2022 г.

Изучено содержание фракций тяжелых металлов (ТМ) в пахотном и подпахотном слоях почвы длительного стационарного опыта с зернотравяно-пропашным севооборотом при участии бобовых трав. Применяли минеральные удобрения на фоне известкования и без него. Классические методы опытного дела, методики с привлечением стандартного образца предприятия (СОП) и отраслевого стандартного образца (ОСО), использованные при исследовании, и последующая математическая обработка данных позволили получить достоверные результаты. Выявлены оптимальные варианты использования средств химизации для создания условий по выращиванию экологически чистой продукции растениеводства. Показано, что средства химизации усиливали фиксацию Cd и Zn, тогда как количественно фракционный состав Pb и Cu фактически не изменялся в вариантах опыта и слоях почвы. Сильная выпаханность почвы способствовала выравниванию содержания Zn в слоях и приближению их к уровню в подстилающих породах. Количественное распределение ТМ в слоях почвы без известкования имело следующий вид: кислоторастворимых форм –  $Zn > Cu > Pb > Cd$  и подвижных форм –  $Zn > Pb > Cu > Cd$ , после известкования:  $Zn > Cu > Pb > Cd$  и  $Zn > Pb \geq Cu > Cd$  соответственно.

**Ключевые слова:** чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый, тяжелые металлы, слои почвы, удобрения, известкование.

DOI: 10.31857/S0002188122050076

### ВВЕДЕНИЕ

В сельском хозяйстве минеральные удобрения являются самым мощным фактором получения высоких объемов растениеводческой продукции. Организация ФАО поддерживает их разумное применение [1]. Минеральные удобрения в настоящее время часто используют системно, что приводит к увеличению их отдачи производимой продукцией [2]. Вместе с тем одни авторы отмечают максимальную отдачу от высоких доз полного минерального удобрения [3], другие – от средних доз НРК-удобрений [4], третьи – от их минимальных доз [5]. Отмечено, что отдельное внесение минеральных удобрений способствует усиленному разрушению органического вещества почвы по всему почвенному профилю [6]. При длительном использовании пашни выявлен сдвиг реакции среды в щелочную сторону [7]. Таким образом, повышенные дозы удобрений не всегда

окупаются прибавками урожайности, часто усиливается риск загрязнения природной среды и сельскохозяйственной продукции, изменяются свойства почвы [2, 8, 9].

Для решения двуединой задачи повышения плодородия и получения высоких урожаев, снижения энерго- и ресурсозатрат предлагается включать в севооборот до 20–40% многолетних трав от общей площади пашни [10]. Поэтому биологизация земледелия – один из путей, направленных на решение проблемы минеральных удобрений, в том числе азотных [11].

Длительные стационарные полевые опыты – уникальный и важнейший источник знаний о действии комбинаций разных источников питания растений на продуктивность культур и почву. Использование элементов биологизации земледелия и других факторов повышения урожайности представляется необходимым изучать в каж-

дом регионе, что дает положительные результаты [12, 13]. Исследования на базе длительных опытов региона позволяют уточнять агротехнологические схемы и варианты, агроэкологическая эффективность которых приводит к адаптации систем земледелия к местным условиям [14].

В научных сельхозучреждениях Поволжья в XXI веке ликвидировано большое количество старых длительных опытов. Однако данные за последние 10–15 лет могут служить серьезной базой для современных адаптивных систем земледелия [15]. Антропогенное давление оказывает существенное влияние на химический состав почвы и растений, как позитивное, так и негативное, в том числе и из-за содержащихся в агрохимических средствах тяжелых металлов (ТМ) [16]. Содержание ТМ в окружающей среде постоянно увеличивается, они представляют опасность для человека и других живых организмов [17, 18].

Под влиянием сельскохозяйственного использования в почве изменяется фонд ТМ в целом и подвижность металлов в частности [2, 20]. Разные авторы представляют противоречивые данные по содержанию подвижных форм (ПФ) ТМ в почве: от снижения содержания ПФ и степени их подвижности (СП) в удобренных почвах по сравнению с неудобренными [21] до возрастания количества ПФ соответственно дозам удобрений [22]. Также показано снижение содержания ТМ при уменьшении использования удобрений [23] и факты неизменности фонда валового содержания ряда ТМ по сравнению с контролем [24]. Однако до сих пор недостаточно исследований по содержанию ТМ в почве при длительном использовании средств химизации [8, 25].

Цель работы – изучение влияния средств химизации на содержание разных форм ТМ в слоях почвы в длительном полевом опыте.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Длительный стационарный полевой опыт заложен в 1972–1973 гг. в Мордовском НИИСХ – филиале ФАНЦ Северо-Востока. Географические координаты: широта  $54^{\circ}17'$ , долгота  $45^{\circ}28'$ . Посевная площадь делянки –  $112.5 \text{ м}^2$  ( $7.5 \times 15 \text{ м}$ ), учетная для зерновых –  $75 \text{ м}^2$  ( $5 \times 15 \text{ м}$ ), для трав –  $30 \text{ м}^2$  ( $4 \times 7.5 \text{ м}$ ), повторность трехкратная. Опыт заложен методом расщепленных делянок.

В блоке делянок 1-го порядка изучали действие известкования, фоны: 1 – без известкования с 1972 года (контроль), 2 – известкование по 0.5 гидrolитической кислотности (г.к.). На делянках 2-го порядка рассматривали действие раз-

личных уровней минерального питания на продуктивность культур в плодосменных севооборотах, варианты: 1 – без удобрений с 1972 г. (контроль), 2 – фосфорно-калийные удобрения (РК – фон), 3 – фон +  $N_1$  (низкий уровень азотного питания), 4 – фон +  $N_2$  (умеренный уровень азотного питания).

Последовательность культур в бобовом зерно-травянопропашном севообороте: яровая пшеница [*Triticum aestivum* 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 (*Glicine max* (L.) Merr.) – овес посевной (*Avena sativa* L.). Последовательность культур в злаковом зерно-травянопропашном 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 (*Glicine max* (L.) Merr.) – овес посевной (*Avena sativa* L.). Многолетние травы – люцерна посевная (*Medicago sativa* L.) и костреч (*Bromus inermis* Leyss). Агротехника культур – рекомендованная для Мордовии, кроме изученных факторов [26].

Известкование проводили один раз перед закладкой опыта и в 2000 г. Мелиорант – известняковая мука ГУП “Атемарский завод стройматериалов”. Минеральные удобрения вносили в соответствии со схемой опыта поделяночно вручную:  $P_{сд}$ ,  $K_x$  – под травы под основную обработку почвы в запас на годы пользования,  $N_{аа}$  – ежегодно весной. Показано, что из удобрений больше всего ТМ содержится в фосфорсодержащих (мг/кг), например, Cu ( $P_{сд} = 21.0\text{--}28.0$ ,  $K_x = 0.44\text{--}18.0$ ,  $N_{аа} = 2.0\text{--}8.8$ ), Cd ( $P_{сд} = 0.18\text{--}1.3$ ,  $K_x = 0.04\text{--}1.5$ ,  $N_{аа} = 0.08\text{--}0.1$ ), Pb ( $P_{сд} = 1.21\text{--}15.0$ ,  $K_x = 0.31\text{--}4.9$ ,  $N_{аа} = 0.1\text{--}0.57$ ), в известняковой муке: Cu =  $6.3\text{--}15.0$ , Cd =  $0.18\text{--}2.2$ , Pb =  $13.7\text{--}28.0$  [27, 28]. Таким образом, считают, что примеси ТМ в удобрениях не могут являться существенным источником накопления ТМ в почве, но необходимо проводить мониторинг качества удобрений и агроруд, в том числе и на содержание ТМ [16].

Почва опытного участка – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый, по классификации Добровольского [29]. Мощность гумусового горизонта – 50–60 см. Агрохимическая характеристика пахотного слоя почвы (0–20 см) перед за-

кладкой опыта: гумус –  $8.7 \pm 0.5\%$ ,  $pH_{H_2O}$   $6.3 \pm 0.1$ ,  $pH_{KCl}$   $5.4 \pm 0.1$ ,  $H_T$  и  $S$  –  $6.2 \pm 0.3$  и  $32.6 \pm 0.8$  ммоль(экв)/100 г соответственно,  $V$  –  $84 \pm 2\%$ ,  $P_2O_5$  –  $65 \pm 15$  и  $K_2O$  –  $120 \pm 38$  мг/кг. Использованы классические агрохимические методики с использованием стандартных образцов предприятия (СОП) и отрасли (ОСО). Агроклиматические условия проведения опыта были различными, но типичными для зоны неустойчивого увлажнения.

Почву отбирали после уборки овса (2011–2012 гг.) методом конверта с каждой делянки изученных вариантов почвенным буром с глубины 0–20 и 21–40 см. Индивидуальные пробы объединяли в образцы, которые характеризовали пахотный и подпахотный слои обследованных делянок. После высушивания воздушно-сухую почву подвергли анализу на содержание подвижных форм (ПФ) извлечением аммонийно-ацетатным буфером  $pH$  4.8 и кислоторастворимых форм (КРФ) извлечением 5 М  $HNO_3$ . Использовали атомно-абсорбционный спектрометр “Квант” (Россия) с ацетиленовым пламенем [30]. Реактивы и расходные материалы были марок чда и хч, как и было указано в прописи. Данные обрабатывали статистическими методами по [31] с помощью программ STAT-3 и сводили в таблицы с указанием средней величины, стандартной ошибки среднего и коэффициента вариации ( $V$ ).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Среди изученных ПФ Cd, Pb, Cu и Zn наибольшее содержание было цинка (табл. 1), наименьшее – Cd (на фоне без известкования). Его содержание повышалось по мере увеличения нагрузки на делянки минеральными удобрениями в пахотном и в подпахотном слоях. Причем в пахотном слое металла было больше, чем в подпахотном, кроме варианта НРК с низкой дозой азотного удобрения (вариант 3) и одинаковым содержанием Zn в слоях.

Содержание ПФ Pb в пахотном слое контроля было больше, чем в подпахотном. Оно снижалось в обоих слоях до одинаковых величин в слоях в вариантах 2 и 3 по мере роста нагрузок удобрениями. В варианте 4 с повышенным уровнем N-удобрений содержание ПФ Pb в слоях вновь увеличивалось, причем в подпахотном до уровня контроля. В этом случае отмечен наиболее высокий коэффициент вариации ( $V$ ) результатов.

Содержание ПФ Cu в вариантах и в слоях практически не изменялось, а ПФ Zn в пахотном слое контроля было меньше, чем в подпахотном.

Оно увеличивалось в пахотном слое только с внесением азотных удобрений, причем при разных дозах до одного уровня, а в подпахотном слое снижалось с внесением РК-удобрений и оставалось на этом уровне при применении разных доз азотных удобрений. Содержание ПФ Zn было равновеликим в обоих слоях варианта 4 при внесении максимальной дозы удобрений.

Внесение РК-удобрений на фоне известкования снижало содержание ПФ Cd в подпахотном слое по сравнению с контролем. Оно повышалось в обоих слоях до одинакового уровня при использовании азотных удобрений.

Содержание ПФ Pb было одинаковым в пахотном и подпахотном слоях вариантов 1–3, резко увеличиваясь при повышении дозы азота в пахотном слое, а в подпахотном оставалось практически без изменений.

Содержание ПФ Cu в слоях почвы в контроле было одинаковым и в подпахотном слое этих вариантов практически не изменялось. В пахотном слое было отмечено незначительное увеличение его содержания при внесении РК-удобрений отдельно и вместе с минимальной дозой азота. Повышение этой дозы вызывало снижение содержания фракции до величины контроля, где оно опять было равным в слоях.

Содержание ПФ Zn в контроле в пахотном слое было в 1.5 раза меньше, чем в подпахотном. Внесение РК-удобрений не изменяло в пахотном слое содержание металла, которое увеличивалось при использовании азотных удобрений в обеих дозах до одинаковой величины. Вместе с тем внесение разных доз удобрений снижало в вариантах 2 и 4 содержание ПФ Zn в подпахотном слое также до одинакового уровня, который оказался равным с его уровнем в пахотном слое в вариантах 3 и 4.

Более высокое содержание ПФ Cd и Pb было в пахотном слое контроля и это было связано, вероятно, с высоким содержанием органического вещества в пахотном слое и вовлечением ТМ в органо-минеральные фракции, особенно в кислой среде [32, 33]. Наименьшее содержание ПФ Pb в подпахотном слое было связано с влиянием подстилающих пород, где его мало содержится в подвижной форме [34]. С внесением РК-удобрений в пахотном слое происходило связывание металла фосфатами, но менее эффективно в более глубоких слоях. Поэтому отмечали значительное снижение содержания ПФ Pb в пахотном слое, менее – ПФ других металлов [35].

В подпахотном слое отмечали снижение содержания ПФ Zn при внесении удобрений, которое происходило вероятно вследствие высвобож-

Таблица 1. Содержание ПФ ТМ в слоях почвы

Металл	Слой, см	Показатель	Варианты			
			1. Контроль	2. РК-удобрения	3. РК + N30	4. РК + N90
Без известкования						
Cd	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.111 ± 0.003 4.07	0.117 ± 0.004 5.34	0.123 ± 0.002 2.04	0.138 ± 0.002 2.74
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.085 ± 0.003 5.90	0.094 ± 0.001 1.62	0.124 ± 0.001 1.61	0.127 ± 0.003 4.63
Pb	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.58 ± 0.10 30.5	0.39 ± 0.01 3.95	0.27 ± 0.02 12.9	0.39 ± 0.03 11.8
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.43 ± 0.01 5.90	0.36 ± 0.003 1.62	0.29 ± 0.01 6.90	0.46 ± 0.07 25.7
Cu	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.28 ± 0.09 5.52	0.26 ± 0.003 2.25	0.31 ± 0.003 1.84	0.25 ± 0.003 2.28
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.26 ± 0.003 2.19	0.23 ± 0.003 2.55	0.25 ± 0.0 0.0	0.30 ± 0.01 3.33
Zn	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.47 ± 0.006 2.13	0.49 ± 0.009 3.10	0.59 ± 0.01 3.51	0.56 ± 0.003 1.04
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.73 ± 0.009 2.10	0.53 ± 0.02 5.73	0.54 ± 0.009 2.85	0.57 ± 0.01 3.63
Известкование по 0.5 г.к.						
Cd	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.130 ± 0.003 3.85	0.138 ± 0.0 0.0	0.145 ± 0.001 0.79	0.143 ± 0.001 1.45
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.127 ± 0.004 6.00	0.111 ± 0.001 1.37	0.139 ± 0.004 4.72	0.139 ± 0.004 1.81
Pb	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.30 ± 0.01 6.86	0.26 ± 0.003 17.1	0.25 ± 0.02 16.0	0.47 ± 0.03 11.9
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.33 ± 0.02 10.9	0.29 ± 0.02 11.0	0.24 ± 0.01 10.6	0.28 ± 0.003 2.04
Cu	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.25 ± 0.003 2.28	0.30 ± 0.003 1.90	0.34 ± 0.003 1.71	0.24 ± 0.01 4.75
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.27 ± 0.01 5.73	0.25 ± 0.003 2.28	0.26 ± 0.01 3.85	0.25 ± 0.0 0.0
Zn	0–20	мг/кг <i>V</i> , %	0.47 ± 0.006 1.69	0.49 ± 0.009 3.34	0.59 ± 0.01 0.75	0.56 ± 0.003 2.27
	21–40	мг/кг <i>V</i> , %	0.73 ± 0.009 1.69	0.53 ± 0.02 3.14	0.54 ± 0.009 2.19	0.57 ± 0.01 1.43

Примечание. *V*, % – коэффициент вариации. То же в табл. 2.

дения Zn в результате минерализации органического вещества при выделении органических кислот растениями и бактериями в ризосфере [36]. Поэтому ПФ Zn мигрировали в более глубокие слои. Незначительное повышение ПФ Cd в подпахотном слое скорее всего было связано с более интенсивным накоплением в нем корневых остатков, вызванного улучшением фосфорного

питания, а также частичной миграцией ПФ Cd из пахотного слоя. Вероятно, частичное усиление накопления ПФ Cd связано и с его содержанием в использованных фосфорных удобрениях [22].

Равное содержание ПФ Cu в изученных слоях почвы контроля, которое не изменялось в вариантах с внесением удобрений было связано вероятно с иммобилизацией Cu при длительном при-

менении удобрений [37] на адсорбированных по поверхности глинистых минералов гумусовых кислотах, т.е. увеличения связывания ПФ ТМ [38]. Например, между содержанием ПФ Си и содержанием в почве физической глины коэффициент корреляции был равен  $r = 0.81$  [39, 40].

Таким образом, наиболее значительные изменения в содержании ПФ ТМ на фоне без известкования произошли в обоих слоях у Cd (повышение), у Pb в пахотном (увеличение после снижения), у Zn – в пахотном слое увеличение, а в подпахотном – снижение, но до равновеликих показателей.

В условиях последствия известкования не выявлено существенных изменений в содержании ПФ Си и Zn во всех вариантах. Содержание ПФ Pb в слоях в контроле и с РК-удобрениями снижалось, варианта 3 – не изменялось, а при максимальной дозе азота максимальный и минимальный показатели в слоях поменялись местами, что отмечено в [41, 42]. Содержание ПФ Cd увеличивалось и, начиная от контроля, было на высоком уровне при использовании удобрений [43].

Среди КРФ металлов в почве опыта на фоне без известкования выявлено максимальное содержание Си и Zn, минимальное – Cd (табл. 2). Содержание КРФ Cd в пахотном слое контроля было больше, чем в подпахотном. Оно увеличивалось в обоих слоях, достигая одинакового уровня при внесении РК-удобрений отдельно и с минимальной дозой азота, продолжая незначительно повышаться с увеличением его дозы. При этом вариабельность содержания этой фракции металла была более высокой в обоих слоях в контроле и в пахотном слое удобренных вариантов.

Содержание КРФ Pb было больше всего в подпахотном слое контроля. Количество этой фракции в пахотном слое не изменялось при любых дозах и видах внесенных удобрений, тогда как в подпахотном оно, незначительно снижаясь при внесении РК-удобрений, оставалось на этом же уровне с НРК-удобрениями. Таким образом, содержание металла в обоих слоях оказалось равным при внесении разных видов и доз удобрений, кроме более высокого содержания в подпахотном слое контроля. Эта особенность и повышенная вариабельность свидетельствовали о загрязнении пахотного слоя как сорбционного барьера [44] и вследствие вовлечения Pb в органо-минеральные фракции [32].

Содержание КРФ Си увеличивалось с внесением удобрений в пахотном и подпахотном слоях по сравнению с контролем, количественно оказа-

лось больше в пахотном слое и равновеликим в слоях варианта 4.

Содержание КРФ Zn варьировало в пахотном слое вариантов 1–3 незначительно, существенно увеличиваясь до максимума в варианте 4 при использовании высокой дозы азота и с РК-удобрениями. Оно было больше в подпахотном слое контроля, чем в пахотном, и резко снижалось при внесении РК-удобрений. НРК-удобрения повышали его, но не более, чем в контроле. При этом в варианте 4 содержание КРФ Zn в пахотном слое становилось больше, чем в подпахотном по сравнению с контролем.

Внесение удобрений на фоне известкования вызвало в обоих слоях почвы увеличение содержания КРФ Cd, которого оказывалось больше в пахотном слое, чем в подпахотном, достигая максимума при наиболее интенсивном использовании удобрений (вариант 4). Количество металла в подпахотном слое, оставаясь неизменным в вариантах контроля и РК-удобрений, с внесением азотных удобрений достигало одинаковых величин.

Содержание КРФ Pb и Си было практически одинаковым в обоих слоях каждого варианта опыта, но количественно ее величины у Си и Zn были в 2 раза больше. У этих металлов оно увеличивалось с внесением РК-удобрений. Однако у Pb и Си оно снижалось при добавлении минимальной дозы азотных удобрений практически до уровня контроля и не изменялось при увеличении дозы азота.

Содержание КРФ Zn продолжало увеличиваться в слоях в контроле, так же, как и содержание КРФ Pb и Си было одинаковым в изученных слоях с использованием РК-удобрений отдельно и с минимальной дозой N-удобрений. Оно незначительно снижалось в пахотном слое при повышении дозы азота, а в подпахотном продолжало увеличиваться и оказалось более выровненным в обоих слоях варианта 4, но более высоким.

Значительное увеличение содержания КРФ Cd в слоях при внесении РК-удобрений без известкования было связано, вероятно, именно с применением фосфорсодержащих удобрений, содержащих этот металл [22]. Его увеличение в подпахотном слое скорее всего произошло в результате перепашивания, что отмечено в характеристике опытного поля и, следовательно, поэтому произошло выравнивание содержания Cd в слоях.

Содержание КРФ Pb было практически одинаковым в пахотном слое контроля и в обоих слоях почвы вариантов с удобрениями. Повышенное

Таблица 2. Содержание кислоторастворимых форм ТМ в слоях почвы

Металл	Слой, см	Показатель	Варианты			
			1. Контроль	2. РК-удобрения	3. РК + N30	4. РК + N90
Без известкования						
Cd	0–20	мг/кг V, %	0.585 ± 0.01 2.91	0.647 ± 0.009 2.28	0.627 ± 0.017 4.71	0.676 ± 0.006 1.46
	21–40	мг/кг V, %	0.493 ± 0.009 3.21	0.623 ± 0.002 0.67	0.624 ± 0.002 0.67	0.688 ± 0.002 0.47
Pb	0–20	мг/кг V, %	3.83 ± 0.03 1.45	3.81 ± 0.04 1.86	3.89 ± 0.003 1.29	3.82 ± 0.04 1.97
	21–40	мг/кг V, %	4.31 ± 0.32 12.8	3.82 ± 0.04 2.03	3.89 ± 0.02 0.77	3.87 ± 0.03 1.29
Cu	0–20	мг/кг V, %	7.98 ± 0.06 1.29	8.46 ± 0.04 0.89	9.23 ± 0.07 1.37	9.09 ± 0.08 1.55
	21–40	мг/кг V, %	7.26 ± 0.03 0.78	7.93 ± 0.03 0.64	8.84 ± 0.09 1.74	8.90 ± 0.05 0.90
Zn	0–20	мг/кг V, %	7.99 ± 0.02 0.51	7.82 ± 0.02 0.39	8.00 ± 0.03 0.57	9.73 ± 0.01 0.21
	21–40	мг/кг V, %	9.49 ± 0.02 0.32	7.72 ± 0.08 1.83	8.14 ± 0.03 0.55	8.60 ± 0.01 0.23
Известкование по 0.5 г.к.						
Cd	0–20	мг/кг V, %	0.712 ± 0.016 3.79	0.787 ± 0.005 1.18	0.798 ± 0.012 2.63	0.874 ± 0.004 0.83
	21–40	мг/кг V, %	0.657 ± 0.004 0.92	0.661 ± 0.006 1.62	0.765 ± 0.005 1.19	0.767 ± 0.004 0.83
Pb	0–20	мг/кг V, %	3.70 ± 0.009 0.41	4.13 ± 0.01 0.50	3.94 ± 0.04 1.80	3.94 ± 0.05 2.06
	21–40	мг/кг V, %	3.65 ± 0.02 0.72	4.30 ± 0.03 1.28	3.58 ± 0.02 0.98	3.85 ± 0.01 0.65
Cu	0–20	мг/кг V, %	8.00 ± 0.02 0.44	8.50 ± 0.02 0.35	8.41 ± 0.05 1.13	8.27 ± 0.04 0.89
	21–40	мг/кг V, %	7.89 ± 7.52 1.02	8.52 ± 0.02 0.50	8.17 ± 0.08 1.79	8.37 ± 0.04 0.84
Zn	0–20	мг/кг V, %	8.95 ± 0.04 0.84	9.69 ± 0.01 0.16	9.93 ± 0.06 1.11	9.79 ± 0.04 0.68
	21–40	мг/кг V, %	8.92 ± 0.04 0.78	9.03 ± 0.01 0.22	9.55 ± 0.04 0.79	9.82 ± 0.02 0.41

количество этой фракции металла в подпахотном слое контроля вызвано, вероятно, его фиксацией на барьере почва–корень [45]. Происходило связывание ПФ металла на поверхности органического вещества, закрепленного на минералах, и его низкий вынос урожаем [23, 46].

Более высокое содержание КРФ Cu в верхнем, наиболее гумусированном слое пашни было связано, вероятно, с его биофильным накоплением и

закреплением в органо-минеральных фракциях [32].

В варианте контроль сидерофоры подвергали гидролизу закрепленный в почве Zn с органическими кислотами (в пахотном слое), и чем было глубже (подпахотный слой), тем больше происходило накопление КРФ Zn, вызванное также влиянием подстилающих пород [34, 47, 48].

Сильная выпаханность почвы оказала существенное влияние на выравнивание содержания КРФ Zn в пахотном и подпахотном слоях в вариантах внесения РК-удобрений отдельно и с низкой дозой азота.

Повышенное содержание КРФ Zn в пахотном слое варианта с максимальной дозой азотных удобрений было связано также с потерями (возвратом в почву) и усилением этого процесса при внесении удобрений [40].

В результате известкования отмечено увеличение содержания КРФ Cd как в пахотном, так и в подпахотном слоях всех вариантов. Вместе с тем наибольшее увеличение выявлено в пахотном слое, что было связано с внесенным вместе с мелиорантом Cd [43]. Повышенное накопление КРФ Cd в пахотном слое варианта при максимальной дозе в НРК-удобрениях и в подпахотном слое вариантов с низкой дозой азота в НРК-удобрениях было связано скорее всего с накоплением металла на барьере почва—растение [42, 43, 49].

Содержание КРФ Pb в слоях почвы после известкования изменялось незначительно, кроме наличия максимума содержания Pb в варианте с РК-удобрениями, вызванное этими удобрениями [16]. Его снижение в вариантах с добавлением азота связано с повышенным выносом металла продукцией. Более высокое его содержание в подпахотном слое в контроле связано с закреплением металла в почве на барьере почва—корень [45].

Содержание КРФ Cu практически в равновесных количествах во всех вариантах и слоях было связано с закреплением металла в почве органическим веществом [32], несколько более низкое его содержание в подпахотном слое в контроле — с более низкой продуктивностью корневой и надземной массы и его выносом [46, 50].

После известкования выявлено более высокое содержание КРФ Zn в слоях почвы, особенно в вариантах с РК-удобрениями, что было связано с синергизмом закрепления Zn в почве и Ca из мелиоранта [51].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание тяжелых металлов (ТМ) в гумусированных слоях почвы определяли свойства материнских пород (повышенное содержание Zn), в том числе чернозема, сформированного на лессовидных суглинках. Таким образом, количественное соотношение ТМ в слоях почвы без известкования было следующим: кислоторастворимые формы —  $Zn > Cu > Pb > Cd$  и подвижные формы —

$Zn > Pb > Cu > Cd$ , после известкования:  $Zn > Cu > Pb > Cd$  и  $Zn > Pb \geq Cu > Cd$  соответственно.

Следовательно, средства химизации усиливали фиксацию Cd и Zn, тогда как количественно фракционный состав Pb и Cu фактически не изменялся.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мерзлая Г.Е. Биологические факторы в системах удобрения // *Агрохимия*. 2017. № 10. С. 24–36.
2. Пугаев С.В., Прокина Л.Н. Эффективность комплекса агрохимических средств в зернотравяно-пропашных севооборотах // *Агрохимия*. 2016. № 7. С. 44–51.
3. Шустикова Е.П., Шаповалова Н.Н. Действие и последствия длительного внесения минеральных удобрений на продуктивность севооборота и баланс макроэлементов в черноземе обыкновенном // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 49–56.
4. Целуйко О.А., Пасько С.В., Медведева В.И. Эффективность систематического внесения удобрений в зернопаропропашном севообороте на черноземе обыкновенном // *Земледелие*. 2015. № 7. С. 11–13.
5. Жилейко С.В., Аканова Н.И., Винничек Л.Б. Эффективность агрохимических приемов возделывания озимых зерновых культур на черноземных почвах Краснодарского края // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 18–24.
6. Boincean B., Nica L., Stadnic S. Fertilizarea si fertilitatea cernoziomului din stepa Baltului sub influenta intensificarii tehnologice a agriculturii // 1<sup>a</sup> Conferinta Internationala la “Transfer de inovatii in activitatile agricole in contextul Schimbarii chemei si dezvoltarii durabile,” Agroiinform, Chisinau, 11–12 noiembrie. 2009. P. 174–186.
7. Чевердин Ю.И., Поротиков И.Ф. Влияние антропогенных факторов на реакцию почвенной среды черноземов // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 15–22.
8. Ивойлов А.В. Эффективность удобрения и известкования выщелоченных черноземов. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. 264 с.
9. Пугаев С.В. Влияние агротехнологических приемов на накопление тяжелых металлов озимой пшеницей на черноземе выщелоченном тяжелосуглинистом // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 70–77.
10. Карабутов А.П., Соловиченко В.Д., Никитин В.В., Навольнева Е.В. Воспроизводство плодородия почв, продуктивность и энергетическая эффективность севооборотов // *Земледелие*. 2019. № 2. С. 3–7.
11. Завалин А.А., Сычев В.Г., Алметов Н.С., Алиев А.М., Ваулина Г.И., Соколов О.А., Шмырева Н.Я., Чернова Л.С., Благовещенская Г.Г., Самойлов Л.Н., Алферов А.А. Использование минеральных удобрений и биологического азота в севооборотах Нечерноземной зоны России. М.: ВНИИА, 2014. 83 с.
12. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Итоги реализации программы биологизации земледелия в Белгородской области // *Земледелие*. 2014. № 8. С. 3–6.

13. *Моисеев А.А., Ахметов Ш.И.* Симбиотический азот и продуктивность земледелия в условиях южной лесостепи. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 212 с.
14. *Романенков В.А., Павлова В.Н., Беличенко М.В.* Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов Геосети // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 77–86.
15. *Пронько В.В.* Основные итоги деятельности учреждений Географической сети опытов с удобрениями в Поволжье // *Агрохимия*. 2018. № 1. С. 30–38.
16. *Тихомирова В.Я.* Влияние агрохимических средств на содержание химических элементов в растениеводческой продукции // *Агрохимия*. 2003. № 12. С. 66–71.
17. *Башкин В.Н., Касимов Н.С.* Биогеохимия. М.: Науч. мир, 2004. 648 с.
18. *Джирард Д.Е.* Основы химии окружающей среды. М.: Физмалит, 2008. 640 с.
19. *Дмитриева А.П., Кожанова О.Н., Дронина Н.И.* Физиология растительных организмов и роль металлов. М.: Изд-во МГУ, 2002. 159 с.
20. *Ладонин Д.В.* Конкурентные взаимоотношения ионов при загрязнении почвы тяжелыми металлами // *Почвоведение*. 2000. № 10. С. 1285–1293.
21. *Черникова О.В., Карпов А.Н.* Приемы восстановления плодородия черноземных почв, загрязненных тяжелыми металлами // *Агрохим. вестн.* 2014. № 2. С. 24–25.
22. *Потатуйева Ю.А.* Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // *Агрохимия*. 2013. № 6. С. 83–94.
23. *Фирсов С.А., Баранова Т.Л., Фирсов С.С.* Экологический мониторинг безопасности почв по содержанию тяжелых металлов // *Агрохим. вестн.* 2014. № 3. С. 5–7.
24. *Мязин Н.Г., Павлов Р.А., Шеина В.В.* Влияние удобрений на накопление нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях и на продуктивность звена зернопаропропашного севооборота // *Агрохимия*. 2006. № 2. С. 22–29.
25. *Пугаев С.В.* Содержание и транслокация поллютантов в компонентах антропогенно измененных биогеоценозов в условиях Республики Мордовия: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Н. Новгород: ННГУ, 2013. 23 с.
26. Адаптивные технологии возделывания сельскохозяйственных культур в условиях Республики Мордовия (метод. рук-во). Саранск, 2003. 428 с.
27. *Шеуджен А.Х., Лебедовский И.А., Хурум Х.Д.* Поступление тяжелых металлов с минеральными удобрениями и прогноз их накопления в черноземе выщелоченном Западного Кавказа // *Аграрн. вестн. Урала*. 2010. № 4 (70). С. 81–82.
28. *Безносков А.И., Башмаков Л.Б., Нелюбин В.Г.* Агроэкологическая оценка территории Удмуртии. Ижевск: Ижевская ГСХА, 2005. 120 с.
29. Классификация и диагностика почв СССР / Под ред. Г. В. Добровольского. М.: Колос, 1977. 223 с.
30. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
31. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта / Под ред. В.Е. Егорова. М.: Колос, 1985. 423 с.
32. *Травникова Л.С., Кахнович З.Н., Большаков В.А., Козут Б.М., Сорокин С.Е., Исмагилова Н.Х., Титова Н.А.* Значение анализа органо-минеральных фракций для оценки загрязнения дерново-подзолистой почвы тяжелыми металлами // *Почвоведение*. 2000. № 1. С. 92–101.
33. *Байдина Н.Л.* Ртуть в почвах Новосибирска // *Агрохимия*. 1999. № 10. С. 89–92.
34. *Панасин И.И., Депутатов К.В., Рымаренко Д.А.* Эколого-геохимические особенности распределения микроэлементов в почвах Калининградской области // *Пробл. агрохим. и экол.* 2019. № 3. С. 3–7.
35. *Якименко В.Н., Конарбаева Г.А.* Трансформация фонда тяжелых металлов серой лесной почвы в агроценозе // *Агрохимия*. 2016. № 4. С. 61–69.
36. *Esitken A., Hilal E., Yildiz Sezai Ercisli, Figen Donmez M., Metin Turan, Adem Gunes.* Effects of plant growth promoting bacteria (P<sub>g</sub>PB) in yield, nutrient contents of organically growth strawberry // *Sci. Horticult.* 2010. № 124. P. 62–66.
37. *Минеев В.Г., Кинжаев Р.Р., Арзамасова А.В.* Влияние длительного действия и последствия удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и иммобилизацию биогенных и токсичных элементов в агроценозе // *Агрохимия*. 2007. № 6. С. 5–13.
38. *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.
39. *Панин М.С., Сиромля Т.И.* Адсорбция меди почвами Семипалатинского Прииртышья // *Почвоведение*. 2005. № 4. С. 416–426.
40. *Кудашкин М.И.* Медь и марганец в агроландшафтах юга Нечерноземья. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2008. 329 с.
41. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Мирошниченко Н.Н., Фатеев А.И., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А.* Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза // *Агрохимия*. 2013. № 9. С. 65–75.
42. *Дубовик В.А.* Тяжелые металлы в почвах Тамбовской равнины и их нейтрализация // *Вестн. РАСХН*. 2009. № 4. С. 27–28.
43. *Литвинович А.В., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. 2014. № 4. С. 80–87.
44. *Горбунов Н.С., Стулин А.Ф.* Содержание ТМ при длительном применении удобрений в агроценозах кукурузы на черноземах выщелоченных // *Вестн. ВГУ. Сер. хим., биол., фармац.* 2016. № 4. С. 18–22.
45. *Ильин В.Б.* К оценке массопотока тяжелых металлов в системе почва–сельскохозяйственная культура // *Агрохимия*. 2006. № 3. С. 52–59.



46. Айдиев А.Ю., Золотарева И.А., Левшаков Л.В. Динамика содержания тяжелых металлов в почве различных агроэкосистем // Вестн. РАСХН. 2009. № 4. С. 25–27.
47. Горбов С.Н., Безуглова О.С., Вардуни Т.В., Горовцев А.В., Тагивердиев С.С., Гильдебрант Ю.А. Генотоксичность и загрязнение тяжелыми металлами естественных и антропогенно-преобразованных почв Ростова-на-Дону // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1519–1529.
48. Соколова Т.А. Специфика свойств почв в ризосфере: Анализ литературы // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1097–1111.
49. Алхутова Е.Ю., Трифонова Т.А., Чеснокова С.М. Особенности аккумуляции тяжелых металлов культурными растениями из загрязненных почв // Пробл. регион. экол. 2006. № 6. С. 51.
50. Луцицкая О.А., Личко И.И. Влияние длительного применения удобрений на содержание тяжелых металлов и калия в серой лесной почве // Агрохимия. 2005. № 10. С. 31–34.
51. Алексеев Ю.В., Вялушкина Н.И. Влияние кальция и магния на поступление кадмия и никеля из почвы в растения вики и ячменя // Агрохимия. 2002. № 1. С. 82–84.

## Effect of Prolonged Use of Chemicalization Agents on the Content of Cd, Pb, Cu and Zn Fractions in Layers of Leached Heavy Loamy Chernozem

S. V. Pugaev<sup>a,#</sup> and L. N. Prokina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Mordovian 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

<sup>#</sup>E-mail: niish-mordovia@mail.ru

The content of heavy metal (HM) fractions in arable and sub-arable soil layers of a long stationary experiment with grain-grass-row crop rotation with the participation of legumes was studied. Mineral fertilizers were used on the background of liming and without it. Classical methods of experimental work, methods involving the standard sample of the enterprise (SSE) and the industry standard sample (ISS) used in the study, and subsequent mathematical processing of data allowed us to obtain reliable results. The optimal options for the use of chemicals to create conditions for the cultivation of environmentally friendly crop production have been identified. It was shown that the chemicalization agents enhanced the fixation of Cd and Zn, while the quantitative fractional composition of Pb and Cu did not actually change in the experimental variants and soil layers. The strong tillage of the soil contributed to the leveling of the Zn content in the layers and their approximation to the level in the underlying rocks. The quantitative distribution of TM in soil layers without liming had the following form: acid-soluble forms – Zn > Cu > Pb > Cd and mobile forms – Zn > Pb > Cu > Cd, after liming: Zn > Cu > Pb > Cd and Zn > Pb ≥ Cu > Cd respectively.

*Key words:* leached heavy loamy chernozem, heavy metals, soil layers, fertilizers, liming.