

УДК 631.416.9

## МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЯ МАРГАНЦА, ЦИНКА И МЕДИ В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ ЦЕНТРАЛЬНО-ЧЕРНОЗЕМНОГО РАЙОНА РОССИИ

© 2021 г. С. В. Лукин<sup>а</sup>, \*, Д. В. Жуйков<sup>б</sup><sup>а</sup>Центр агрохимической службы “Белгородский”, ул. Щорса, 8, Белгород, 308027 Россия<sup>б</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
ул. Победы, 85, Белгород, 308015 Россия

\*e-mail: serg.lukin2010@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.04.2020 г.

После доработки 21.04.2020 г.

Принята к публикации 27.05.2020 г.

В работе использованы материалы государственного агроэкологического мониторинга почв Белгородской области, полученные в 2015–2018 гг. В ходе исследований установлено, что основным источником поступления микроэлементов в агроценозы являются органические удобрения. С ними поступало 79.2% марганца, 87.3% цинка и 84.2% меди от общего количества элементов, внесенных с удобрениями и мелиорантами. В горизонте  $A_{\text{пах}}$  чернозема обыкновенного (Haplic Chernozems) степной зоны содержание марганца было в 1.15, цинка – в 1.18, меди – в 1.14 раза больше, чем в черноземе типичном (Haplic Chernozems) лесостепной зоны. Для изучаемых микроэлементов характерно биофильное накопление в пахотном слое. Среднее валовое содержание марганца, цинка, меди в горизонте  $A_{\text{пах}}$  было больше, чем в горизонте  $C_{\text{Ca}}$ , соответственно для чернозема типичного в 1.49, 1.17, 1.22 раза, а для чернозема обыкновенного – в 1.42, 1.22, 1.16 раза. По результатам сплошного мониторинга установлено, что низкая обеспеченность подвижными формами марганца была характерна для 38.6, цинка – 98.7, меди – 98.2% обследованных пахотных почв. Наиболее высокое содержание марганца установлено в зерне (1053 мг/кг) и соломе (841 мг/кг) белого люпина, цинка – в зерне этой же культуры (43.5 мг/кг), а меди – в зерне сои (10.5 мг/кг). Наиболее низкая аккумуляция марганца (9.22 мг/кг) и цинка (26.45 мг/кг) была характерна для зерна гороха, а меди – для зерна озимой пшеницы (3.60 мг/кг). В зерне озимой пшеницы, сои и белого люпина концентрация микроэлементов была больше, чем в соломе, а для растений гороха установлена обратная зависимость.

**Ключевые слова:** чернозем, коэффициент биологического поглощения, валовое содержание, удобрения, мелиоранты, содержание подвижных форм

DOI: 10.31857/S0032180X21010093

### ВВЕДЕНИЕ

В современной земледелии дефицит подвижных форм важнейших микроэлементов в пахотных почвах многих российских регионов рассматривается как одна из причин, приводящая к снижению урожайности и ухудшению качества продукции многих сельскохозяйственных культур [17, 18, 25].

В растениях микроэлементы выполняют разнообразные биохимические функции, большинство из которых связано с активированием различных ферментов. Марганец активирует ферменты, участвующие в процессе фосфорилирования и синтезе РНК. При его недостатке в растениях нарушается синтез органических веществ и уменьшается содержание хлорофилла, что приводит к развитию хлороза. Цинк активирует более 300 ферментов, которые влияют на метаболизм углеводов, фосфатов, протеинов, образование гормонов роста и ДНК. При недостатке этого элемента происходит

формирование уменьшенных листьев асимметричной формы, растения остаются низкорослыми, наблюдается межжилковый хлороз. Большой недостаток цинка задерживает образование хлорофилла и сахарозы. Медь участвует в окислительно-восстановительных процессах, фотосинтезе, углеводном и белковом обменах. Благодаря этому элементу культурные растения лучше сопротивляются грибковым и бактериальным заболеваниям, улучшается стойкость к полеганию, повышается засухо- и морозостойчивость. Недостаток меди приводит к нарушениям в развитии корневой системы и замедляет рост растений [3, 30, 31, 34].

Поскольку изучаемые нами микроэлементы имеют атомную массу более 40 а. е., то к ним часто применяют термин “тяжелые металлы” и при высоком содержании в почве они могут стать токсичными для растений, накапливаться в продукции в концентрациях, опасных для теплокров-

**Таблица 1.** Среднее содержание органического вещества и рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> в профиле почв

Показатель	Генетический горизонт					
	A <sub>пах</sub>	A	AB	B <sub>Ca</sub>	BC <sub>Ca</sub>	C <sub>Ca</sub>
Чернозем типичный						
Средняя мощность горизонта, см	0–25	26–36	37–90	91–111	112–134	>135
Органическое вещество, %	5.6	5.0	3.6	2.1	1.3	1.0
рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	6.7	6.9	7.5	8.0	8.1	8.1
Чернозем обыкновенный						
Средняя мощность горизонта, см	0–25	26–43	44–72	73–90	91–124	>125
Органическое вещество, %	5.2	4.8	4.1	2.9	1.9	1.6
рН <sub>H<sub>2</sub>O</sub>	7.8	7.9	7.9	8.1	8.3	8.3

ных. По степени токсичности цинк относится к первому классу, медь – ко второму, марганец – к третьему классу опасности.

Для нормирования валового содержания цинка и меди чаще всего используются ориентировочно допустимые концентрации (ОДК), которые для суглинистых и глинистых почв с рН > 5.5 соответственно составляют 220 и 132 мг/кг [5]. Для всех почв, вне зависимости от их гранулометрического состава и кислотности, предельно-допустимая концентрация (ПДК) валового марганца установлена на уровне 1500 мг/кг. Отечественными нормативами установлены ПДК для подвижных форм (извлекаемых ААБ с рН 4.8) марганца, цинка, меди, составляющие соответственно 140, 23, 3 мг/кг [4]. Действующим законодательством установлены максимально допустимые уровни (МДУ) содержания цинка (50 мг/кг) и меди (30 мг/кг) в кормах для сельскохозяйственных животных (в зерне, грубых и сочных кормах) [2]. Содержание марганца в продукции растительного происхождения, используемой в кормовых целях, не нормируется. В пищевой продукции содержание марганца, цинка и меди не регламентируется [22].

В зависимости от почвенно-климатических и геохимических особенностей региона, валовое содержание и концентрация подвижных форм микроэлементов сильно варьирует. Поэтому в соответствии с программой агроэкологического мониторинга, агрохимической службой России предусмотрено периодическое сплошное обследование почв сельскохозяйственного назначения на содержание подвижных форм марганца, цинка и меди. Кроме того, в рамках проведения локального мониторинга исследуется валовое содержание этих микроэлементов в почвах и сельскохозяйственной продукции. На основе анализа данной информации разрабатываются научно-обоснованные рекомендации по применению микроудобрений в современных агротехнологиях [9].

Цель исследований заключалась в изучении закономерностей распределения микроэлементов (Mn, Zn, Cu) в почвах и их накопления в растениях на территории юго-западной части ЦЧР.

### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на территории Белгородской области, входящей в состав Центрально-Черноземного региона. Почвенный покров пашни представлен в лесостепной зоне в основном черноземами типичными (Haplic Chernozems) (44.8%) и выщелоченными (Luvic Chernozems) (25.7%), а в степной зоне – черноземами обыкновенными (Haplic Chernozems) (13.0% от общей площади пашни). Доля эродированной пашни в области составляет 47.9% [23, 24]. В среднем за 2015–2018 гг. общая посевная площадь составила 1428.5 тыс. га [21].

В работе использованы материалы сплошного агрохимического обследования пахотных почв. При проведении обследования одна объединенная почвенная проба, состоящая из 20–40 точечных проб, отбиралась из пахотного (0–25 см) слоя почвы с площади 20 га.

В рамках изучения географических закономерностей распределения элементов проводилось исследование 22 разрезов чернозема типичного тяжелосуглинистого, расположенного в Среднерусской лесостепной провинции, и 22 разрезов чернозема обыкновенного легкоглинистого, находящегося в Среднерусской провинции степных черноземов. Средняя мощность горизонтов почвенного профиля, содержание органического вещества почвы и значения рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> представлены в табл. 1.

Лабораторные исследования проводились в аккредитованной испытательной лаборатории ФГБУ “Центр агрохимической службы “Белгородский” по общепринятым методикам [13]. Валовое содержание элементов (экстрагент 5 М HNO<sub>3</sub>)

и концентрацию их подвижных форм в почве, извлекаемых ацетатно-аммонийным буферным (ААБ) раствором с рН 4.8, определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии. Растительные образцы отбирались в лесостепной зоне Белгородской области. Количество анализируемых проб растениеводческой продукции было следующим: озимая пшеница, соя, горох, клевер, эспарцет, люцерна, луговое разнотравье – по 22 образца каждого вида растений, люпин белый – 20 образцов.

При статистической обработке полученных результатов испытаний проводились вычисления значений средних ( $\bar{x}$ ), максимальных и минимальных ( $\lim$ ) концентраций элементов, расчеты доверительных интервалов для средних значений ( $\bar{x} \pm t_{05} s \bar{x}$ ) и коэффициентов вариации ( $V, \%$ ).

Для выявления избирательности поглощения химических элементов растениями применялся коэффициент биологического поглощения (КБП), представляющий собой частное от деления количества элементов в золе растений на его валовое содержание в почве.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

**Источники поступления микроэлементов в почву.** Главным природным источником микроэлементов в почвах служат почвообразующие породы [14]. Антропогенными источниками поступления микроэлементов в агроценозы являются выбросы предприятий цветной металлургии и теплоэлектростанций, сточные воды, удобрения и мелиоранты. В прошлом веке в почвах многолетних насаждений важным источником меди являлся медный купорос, который широко использовался в качестве фунгицида. Вблизи заводов по производству ферросплавов и рудников валовое содержание марганца достигает 4600, цинка – 1690, меди – 300 мг/кг [32, 33, 35].

В регионах с интенсивным развитием животноводства, к которым относится Белгородская область, одним из основных источников поступления микроэлементов в агроценозы являются органические удобрения. Как правило, в органических удобрениях концентрация и соотношение различных макро- и микроэлементов сильно изменяется в зависимости от биологических особенностей, рациона кормления и технологии содержания животных. Большое влияние на данные параметры оказывают технологические особенности удаления и хранения органических удобрений.

Чтобы внести в почву дозу азота 100 кг/га, требуется компоста соломопометного, навоза крупного рогатого скота (КРС), стоков навозных соответственно 3.3, 13.2, 47.6 т/га, и с этим количеством органического вещества будет внесено соответственно: марганца – 525, 634, 189, цинка – 990, 264, 2537, меди – 597, 75, 437 г/га. Таким об-

разом, при внесении одинаковой по азоту дозы органических удобрений в агроценозы будет поступать наибольшее количество марганца с навозом КРС, меди – с компостом соломопометным, цинка – с навозными стоками (табл. 2). Наиболее распространенные минеральные удобрения содержат крайне мало микроэлементов. По нашим данным, среднее содержание в аммиачной селитре марганца, цинка, меди составляет соответственно 1.3, 0.68, 0.37 мг/кг, а в азофоске (16 : 16 : 16) – 72.4, 11.8, 13.0 мг/кг.

В течение 2015–2018 гг. в Белгородской области в среднем вносилось 8.1 т/га органических удобрений (в пересчете на навоз КРС), 0.5 т/га известковых мелиорантов (в основном дефеката) и 112.3 кг д. в./га ( $N_{75.1}P_{20.6}K_{16.6}$ ) минеральных удобрений. С органическими удобрениями в почву в среднем вносилось: марганца – 389, цинка – 162, меди – 45.8 г/га. С дефекатом поступало: марганца – 92.5, цинка – 21.9, меди – 6.85 г/га. С минеральными удобрениями в среднем на гектар посевной площади поступало около 9.5 г марганца, 1.63 г цинка, 1.74 г меди. С учетом доз применения удобрений и мелиорантов, а также содержания в них микроэлементов, общее поступление на гектар посевной площади марганца составляет 491, цинка – 185.5, меди – 54.4 г. С органическими удобрениями от общего поступления марганца, цинка, меди вносилось соответственно 79.2, 87.3, 84.2%, с дефекатом – 18.8, 11.8, 12.6%, с минеральными удобрениями – 2.0, 0.9, 3.2%.

**Содержание микроэлементов в почвах.** Кларки валового содержания микроэлементов в почвах по разным данным сильно варьируют [32]. Так, среднее содержание марганца, цинка и меди по Kabata-Pendias [30] оценивается в 488, 70, 38.9 мг/кг, по Виноградову [1] – 850, 50, 20 мг/кг, по Bowen [29] – 1000, 90, 30 мг/кг. По результатам исследований черноземов Центрального Черноземья наибольшим содержанием Mn, Zn, Cu в пахотном слое характеризуется обыкновенный чернозем – 733, 24, 71 мг/кг. Концентрация Mn, Zn, Cu, возрастает в ряду: черноземы выщелоченные < черноземы типичные < черноземы обыкновенные, что связано с уменьшением процессов выщелачивания и усиления биогенной аккумуляции микроэлементов в степных черноземах [6].

В слое 10–20 см целинного чернозема типичного участка “Ямская степь” заповедника “Белогорье” фоновое валовое содержание марганца составляет 362, цинка – 44.7, меди – 14.3 мг/кг, а на глубине 150–160 см (горизонт  $C_{Ca}$ ) соответственно 204, 38.7, 11.5 мг/кг. В слое 15–25 см целинного чернозема обыкновенного природного парка “Ровеньский” валовое содержание марганца, цинка, меди соответственно составляет 442, 51.2, 18.6 мг/кг, а в слое 110–120 см (горизонт  $C_{Ca}$ ) – 339, 49.4, 16.5 мг/кг [23].

**Таблица 2.** Вариационно-статистические характеристики содержания микроэлементов в органических удобрениях и дефекате, мг/кг удобрения (дефеката)

Элемент	<i>n</i>	$\bar{x} \pm t_{0,5}\bar{x}$	lim	<i>V</i> , %
Компост соломопометный (56% сухого вещества)				
Mn	25	159 ± 21.0	66–257	32.6
Zn	25	300 ± 42.1	139–451	34.7
Cu	25	181 ± 22.7	50.8–259	31.0
Навоз КРС (25% сухого вещества)				
Mn	32	48.0 ± 5.32	17.4–88.4	30.8
Zn	32	20.0 ± 2.44	11.5–37.4	33.8
Cu	32	5.65 ± 0.73	3.66–11.6	36.0
Стоки навозные (2.22% сухого вещества)				
Mn	26	3.97 ± 0.59	1.13–7.08	36.7
Zn	26	53.3 ± 7.77	22.7–88.9	36.1
Cu	26	9.18 ± 1.40	4.20–16.9	37.7
Дефекат (87% сухого вещества)				
Mn	20	185 ± 26.9	97.4–268	29.3
Zn	20	43.8 ± 7.54	16.6–62.7	34.6
Cu	20	13.7 ± 2.04	7.53–20.7	30.0

В слое 10–20 см чернозема типичного участка “Ямская степь” уровень содержания подвижных форм марганца (10.9 мг/кг) и меди (0.24 мг/кг) оценивается как средний, а цинка (0.79 мг/кг) – как низкий. В слое 15–25 см чернозема обыкновенного природного парка “Ровеньский” содержание подвижных форм марганца составляет 6.1, цинка – 0.8 мг/кг, что соответствует низкому уровню обеспеченности. Содержание подвижных форм меди (0.2 мг/кг) находится на среднем уровне [23].

По валовому содержанию в черноземах типичных и обыкновенных элементы образуют следующий убывающий ряд: Mn > Zn > Cu. В горизонте A<sub>пах</sub> чернозема обыкновенного содержание марганца в 1.15, цинка – в 1.18, меди – в 1.14 раза больше, чем в черноземе типичном. Это объясняется более тяжелым гранулометрическим составом чернозема обыкновенного (содержание физической глины 72.5%) по сравнению с черноземом типичным (56.8%).

Среднее валовое содержание марганца, цинка, меди в горизонте A<sub>пах</sub> чернозема типичного больше, чем в горизонте C<sub>Ca</sub> соответственно в 1.49, 1.17, 1.22 раза. Аналогичная закономерность характерна для чернозема обыкновенного, где валовое содержание марганца, цинка, меди в горизонте A<sub>пах</sub> превышает концентрацию этих элементов в горизонте C<sub>Ca</sub> соответственно в 1.42, 1.22, 1.16 раза (табл. 3).

Для концентрации подвижных форм изучаемых элементов в почвах была характерна более высокая пространственная вариабельность по сравнению с валовым содержанием. Концентрация подвижных форм марганца, цинка, меди в го-

ризонте A<sub>пах</sub> составляет соответственно: в черноземе типичном – 4.84, 1.07, 0.65% от валового количества, а в черноземе обыкновенном – 1.03, 0.84, 0.63%.

В черноземе типичном наименьшее содержание подвижных форм марганца (9.2 мг/кг), отмечалось в горизонте АВ, цинка (0.26–0.29 мг/кг) в горизонтах А и АВ, а содержание меди было минимальным (0.08–1.0 мг/кг) в горизонтах – A<sub>пах</sub>, А, АВ. Содержание подвижных форм марганца, меди в горизонтах ВС<sub>Ca</sub> и C<sub>Ca</sub> было достоверно больше, чем в горизонте A<sub>пах</sub>. Содержание подвижных форм цинка в горизонтах A<sub>пах</sub>, ВС<sub>Ca</sub> и C<sub>Ca</sub> достоверно не отличалось.

В горизонте A<sub>пах</sub> чернозема обыкновенного содержание подвижных форм марганца составляло в среднем 4.1 мг/кг, что существенно меньше, чем в черноземе типичном (16.7 мг/кг). В этом же горизонте в черноземах обыкновенном и типичном содержание подвижных форм цинка, меди достоверно не отличалось. Содержание подвижных форм марганца, цинка и меди в горизонте C<sub>Ca</sub> было достоверно больше, чем в горизонте A<sub>пах</sub>.

В черноземах выщелоченных, которые характеризуются слабокислой реакцией среды, содержание подвижных форм микроэлементов в горизонте A<sub>пах</sub>, как правило больше, чем в горизонте АВ (щелочной барьер) [26]. Однако в сильнощелочной среде (горизонты ВС<sub>Ca</sub> и C<sub>Ca</sub>) подвижность элементов, обладающих амфотерными свойствами, может увеличиваться [11, 19].

По итогам десятого цикла (2015–2018 гг.) сплошного агрохимического мониторинга установлено, что к группе с низкой обеспеченностью подвижными формами марганца относится 38.6,

Таблица 3. Вариационно-статистические показатели содержания микроэлементов в пахотных почвах, мг/кг

Гори- зонт	Чернозем типичный						Чернозем обыкновенный							
	валовое содержание			содержание подвижных форм			средняя мощность горизонтов, см	валовое содержание			содержание подвижных форм			
	$\bar{x} \pm t_{05}\bar{s}\bar{x}$	lim	V, %	$\bar{x} \pm t_{05}\bar{s}\bar{x}$	lim	V, %		$\bar{x} \pm t_{05}\bar{s}\bar{x}$	lim	V, %	$\bar{x} \pm t_{05}\bar{s}\bar{x}$	lim	V, %	
	Марганец													
A <sub>пах</sub>	0–25	345 ± 14.6	245–396	9.6	16.7 ± 3.4	6.2–35.2	46.2	0–25	397 ± 17.9	311–463	10.2	4.1 ± 0.7	1.5–7.2	37.9
A	26–36	329 ± 15.9	254–393	10.9	12.5 ± 2.2	5.4–23.8	39.6	26–43	390 ± 16.9	315–445	9.8	3.7 ± 0.6	1.2–6.2	36.2
AB	47–90	308 ± 17.0	241–383	12.4	9.2 ± 1.3	3.9–17.3	30.7	44–72	363 ± 21.8	246–434	13.5	4.3 ± 0.9	1.5–9.6	45.9
B <sub>Ca</sub>	91–111	256 ± 19.4	154–321	17.1	12.1 ± 2.0	4.9–20.9	36.5	73–90	327 ± 19.6	238–420	13.5	7.0 ± 1.5	2.6–15.0	47.4
BC <sub>Ca</sub>	112–134	234 ± 18.8	175–328	18.1	16.4 ± 2.5	6.7–33.6	34.2	91–124	287 ± 16.2	225–387	12.7	9.8 ± 1.4	1.8–15.3	31.9
C <sub>Ca</sub>	> 135	232 ± 21.7	123–317	21.1	17.7 ± 2.8	8.2–34.4	36.0	> 125	279 ± 10.3	233–327	8.3	11.0 ± 1.0	4.5–14.8	21.0
	Цинк													
A <sub>пах</sub>	0–25	36.5 ± 2.91	23.2–52.5	18.0	0.39 ± 0.05	0.24–0.68	29.3	0–25	42.9 ± 2.20	33.6–50.5	11.5	0.36 ± 0.04	0.23–0.60	25.0
A	26–46	35.1 ± 2.42	23.5–44.0	15.6	0.29 ± 0.04	0.15–0.48	28.7	26–43	42.1 ± 2.18	31.0–50.0	11.7	0.34 ± 0.03	0.20–0.49	18.1
AB	47–90	33.6 ± 2.27	24.5–44.1	15.3	0.26 ± 0.03	0.16–0.40	28.3	44–72	40.9 ± 2.36	25.8–48.3	13.0	0.35 ± 0.03	0.22–0.51	20.3
B <sub>Ca</sub>	91–111	32.1 ± 3.01	20.3–42.7	21.1	0.33 ± 0.03	0.19–0.49	23.6	73–90	38.7 ± 2.32	28.6–46.6	13.5	0.38 ± 0.03	0.25–0.56	19.2
BC <sub>Ca</sub>	112–134	31.2 ± 2.34	21.2–41.7	16.9	0.40 ± 0.03	0.30–0.61	17.1	91–124	36.2 ± 2.47	26.4–46.6	15.4	0.44 ± 0.04	0.31–0.65	21.8
C <sub>Ca</sub>	> 135	31.2 ± 2.91	16.8–43.0	21.1	0.43 ± 0.04	0.33–0.65	18.9	> 125	35.3 ± 2.55	24.9–44.2	16.3	0.47 ± 0.05	0.32–0.87	21.9
	Медь													
A <sub>пах</sub>	0–25	13.9 ± 0.86	10.4–18.1	13.9	0.09 ± 0.01	0.05–0.16	31.9	0–25	15.8 ± 0.53	12.6–17.5	7.61	0.10 ± 0.01	0.06–0.16	24.3
A	26–46	13.2 ± 0.76	10.4–17.4	12.9	0.08 ± 0.01	0.01–0.13	40.2	26–43	15.5 ± 0.63	12.5–17.0	9.12	0.09 ± 0.01	0.06–0.13	22.5
AB	47–90	12.1 ± 0.65	10.2–15.6	12.2	0.10 ± 0.02	0.01–0.18	46.8	44–72	14.8 ± 0.90	8.40–17.1	13.7	0.09 ± 0.01	0.06–0.14	20.8
B <sub>Ca</sub>	91–111	11.2 ± 0.81	7.3–13.9	16.4	0.21 ± 0.06	0.05–0.45	67.4	73–90	14.3 ± 0.71	11.4–17.0	11.2	0.12 ± 0.01	0.06–0.18	25.4
BC <sub>Ca</sub>	112–134	11.2 ± 0.79	8.7–15.0	15.9	0.31 ± 0.07	0.09–0.66	54.8	91–124	13.6 ± 0.76	10.8–17.1	12.6	0.15 ± 0.02	0.07–0.23	25.9
C <sub>Ca</sub>	> 135	11.4 ± 0.79	7.0–14.8	15.7	0.35 ± 0.05	0.18–0.56	34.4	> 125	13.6 ± 0.77	10.8–17.2	12.7	0.20 ± 0.03	0.09–0.32	31.3

цинка – 98.7, меди – 98.2% обследованных почв пашни. На таких почвах эффективно внесение микроудобрений. Средневзвешенное содержание в почвах области подвижных форм марганца составляет 11.7, цинка – 0.5, меди – 0.11 мг/кг (табл. 4). Превышений ОДК и ПДК подвижных форм изучаемых микроэлементов на территории области за время наблюдений не фиксировалось. В девятом цикле обследования (2010–2014 гг.) средневзвешенное содержание подвижных форм марганца было ниже (10.3 мг/кг), цинка – немного выше (0.52 мг/кг), меди – стабильно (0.11 мг/кг).

По административным районам Белгородской области между средневзвешенным значением гидролитической кислотности почв и содержанием подвижных форм цинка установлена сильная корреляционная связь ( $r = 0.72$ ), а между содержанием подвижной меди ( $r = 0.33$ ) и марганца ( $r = 0.34$ ) наблюдалась корреляционная связь средней силы. Также установлена связь средней силы ( $r = 0.54$ ) между содержанием органического вещества и концентрацией подвижных форм кобальта. В то же время отсутствовала корреляция между содержанием органического вещества и концентрацией подвижных форм цинка и марганца.

В пахотных почвах многих регионов России наблюдается дефицит подвижных форм микроэлементов. Например, доля почв, слабо обеспеченных подвижными формами марганца, цинка и меди, в Тамбовской области составляет соответственно 95.4, 97.9 и 100%, в Воронежской – 61.0, 99.7, 96.5% [10, 28].

**Содержание микроэлементов в растениях.** Уровень содержания микроэлементов в растениях во многом определяется особенностями химического состава среды, в которой формировался конкретный вид.

Обычно в растениях марганец содержится в количестве 20–300 мг/кг сухого вещества [7, 20]. На заповедном участке “Ямская степь” среднее содержание марганца в степном разнотравье составляло 41.2 мг/кг. В наших исследованиях установлено, что очень высокой способностью накапливать этот элемент обладает белый люпин. В зерне этой культуры среднее содержание марганца составляло 1053 мг/кг, а в соломе – 841 мг/кг. Для сравнения: в зерне озимой пшеницы, сои и гороха содержание этого элемента было соответственно в 31.6, 43.7 и 114.2 раза меньше и составляло 33.3, 24.3 и 9.22 мг/кг. Вероятнее всего, в ареале происхождения белого люпина (страны Средиземноморья) почвы характеризовались очень высоким содержанием доступных для растения форм марганца, что способствовало его накоплению в растениях и закреплению этого признака в результате эволюционного отбора. Растения озимой пшеницы, белого люпина и сои содержали этот элемент в основной продукции в количе-

ствах больших, чем в побочной, соответственно в 1.41, 1.25, 1.94 раза. В соломе гороха содержание элемента было в 1.95 раза больше, чем в зерне. Среднее содержание марганца в сене люцерны (28.5 мг/кг), эспарцета (30.7 мг/кг) и клевера (31.2 мг/кг) было сопоставимо (табл. 5).

Содержание цинка в растениях по литературным данным составляет 20–60 мг/кг, а токсичные концентрации, при которых наблюдается снижение урожайности, составляют 300–500 мг/кг [8, 26]. В заповедном степном разнотравье содержание элемента в среднем составляло 21.7 мг/кг. Наиболее высоким содержанием цинка характеризовалось зерно белого люпина (43.5 мг/кг) и сои (35.6 мг/кг). Содержание элемента в зерне озимой пшеницы (28.6 мг/кг) и гороха (26.45 мг/кг) достоверно не отличалось. В основной продукции озимой пшеницы, белого люпина, сои и гороха содержание цинка было соответственно в 2.75, 4.84, 5.58 и 7.92 раза больше, чем в побочной, что указывает на значительную роль данного микроэлемента в формировании репродуктивных органов растений. Содержание цинка в сене эспарцета в среднем составляло 17.8, клевера – 16.5, люцерны – 14.0 мг/кг.

Содержание меди в растениях, как правило, находится в интервале 1.0–30.0 мг/кг [16]. Этот элемент в растениях не реутилизируется [27]. В степном разнотравье содержание меди в среднем составляет 4.24 мг/кг. Наиболее высокая концентрация меди была установлена в зерне сои (10.5 мг/кг) и белого люпина (5.94 мг/кг). Существенно меньше было содержание элемента в зерне озимой пшеницы (3.60 мг/кг) и гороха (3.85 мг/кг). В зерне озимой пшеницы, белого люпина, сои и гороха содержание меди было соответственно в 1.82, 3.06, 2.97, 1.51 раза больше, чем в соломе. Среди бобовых многолетних трав наиболее высокое содержание меди было установлено в люцерне (5.61 мг/кг), а наиболее низкое – в клевере (3.22 мг/кг). Превышения МДУ содержания цинка и меди, установленных для кормовой продукции, в ходе исследований выявлено не было.

Для характеристики избирательности поглощения микроэлементов из почвы растениями используется коэффициент биологического поглощения. Все изучаемые микроэлементы, как правило, имели величину КБП выше 1 (табл. 6). В соответствии с классификацией А.И. Перельмана, эти микроэлементы относятся к группе сильного и энергичного накопления, для них характерна биофильная аккумуляция в пахотном слое почв [15, 16]. Поскольку черноземы формировались под степной растительностью, величина коэффициента биологического поглощения микроэлементов степным разнотравьем во многом определяет закономерности их распределения по глубине почвенного профиля. По величине КБП степного

Таблица 4. Распределение почв пашни по содержанию подвижных форм микроэлементов в 2015–2018 гг.

Наименование районов	Органическое вещество, %	Гидролитическая кислотность, смоль/кг почвы	Цинк		Медь		Марганец	
			средне-вещное содержание, мг/кг почвы	доля почв с низкой обеспеченностью <2 мг/кг, %	средне-вещное содержание, мг/кг почвы	доля почв с низкой обеспеченностью <0.2 мг/кг, %	средне-вещное содержание, мг/кг почвы	доля почв с низкой обеспеченностью <10 мг/кг, %
Районы, входящие в лесостепную зону								
Ивнянский	5.55	4.43	0.53	99.2	0.12	98.2	15.4	10.5
Яковлевский	5.05	4.16	0.70	95.4	0.10	96.1	13.1	26.7
Борисовский	4.30	4.02	0.72	99.0	0.09	100	15.1	12.7
Ракитянский	5.39	3.83	0.74	95.1	0.10	96.9	13.1	22.0
Прохоровский	5.84	3.69	0.61	95.9	0.10	97.9	13.5	21.9
Грайворонский	3.98	3.58	0.42	100	0.12	96.6	9.5	59.3
Губкинский	5.96	3.55	0.46	99.9	0.13	98.2	11.1	37.5
Краснояружский	4.47	3.29	0.81	95.7	0.15	86.5	6.7	93.6
Белгородский	4.89	3.26	0.51	99.7	0.11	98.7	14.2	15.4
Шебекинский	4.98	3.24	0.55	100	0.10	99.8	10.4	51.1
Корочанский	5.43	3.13	0.50	99.7	0.10	98.1	12.3	28.5
Чернянский	4.73	2.99	0.51	99.4	0.11	99.1	9.4	63.0
Старооскольский	5.25	2.93	0.56	96.5	0.11	95.1	9.6	57.7
Новооскольский	5.10	2.88	0.48	98.2	0.10	99.8	12.1	27.8
Красненский	5.21	2.12	0.36	100	0.10	98.7	12.7	22.3
Районы, частично входящие в степную зону								
Волоконовский	5.10	2.75	0.46	97.9	0.10	99.7	11.1	40.8
Красновардгейский	4.47	2.42	0.45	98.5	0.11	98.9	10.8	43.0
Валуйский	4.94	1.74	0.35	99.9	0.09	99.3	13.4	18.8
Алексеевский	4.99	1.58	0.43	99.5	0.11	98.2	15.0	21.7
Районы, входящие в степную зону								
Вейделевский	5.70	1.54	0.34	99.9	0.09	98.8	9.7	57.9
Ровеньский	4.82	0.79	0.34	100	0.10	99.7	7.4	85.1
Область	5.21	2.85	0.50	98.7	0.11	98.2	11.7	38.6

**Таблица 5.** Вариационно-статистические показатели содержания микроэлементов в растениеводческой продукции, мг/кг абсолютно сухого вещества

Сельскохозяйственная культура		Марганец			Цинк			Медь		
		$\bar{x} \pm t_{0.5} s \bar{x}$	<i>lim</i>	<i>V</i> , %	$\bar{x} \pm t_{0.5} s \bar{x}$	<i>lim</i>	<i>V</i> , %	$\bar{x} \pm t_{0.5} s \bar{x}$	<i>lim</i>	<i>V</i> , %
Озимая пшеница	зерно	33.3 ± 2.79	23.0–48.1	18.9	28.6 ± 1.55	26.4–34.0	11.6	3.60 ± 0.33	2.17–5.18	20.9
	солома	23.7 ± 1.99	15.3–30.9	19.0	10.4 ± 0.69	8.55–13.7	14.1	1.98 ± 0.20	1.30–2.70	22.9
Люпин белый	зерно	1053 ± 50.9	857–1221	10.3	43.5 ± 1.91	36.5–51.1	9.4	5.94 ± 0.58	3.79–7.76	20.7
	солома	841 ± 91.2	594–1207	23.2	8.98 ± 1.20	6.10–16.21	28.5	1.94 ± 0.13	1.39–2.58	14.6
Соя	зерно	24.1 ± 1.15	16.9–27.9	10.8	35.6 ± 3.54	25.3–47.3	22.5	10.5 ± 1.58	5.12–16.7	33.8
	солома	12.4 ± 1.10	7.50–17.6	20.0	6.38 ± 0.59	4.49–8.54	20.7	3.53 ± 0.48	1.73–5.24	31.0
Горох	зерно	9.22 ± 0.47	7.33–10.9	11.6	26.45 ± 1.47	17.34–30.9	12.6	3.85 ± 0.33	1.88–4.79	19.6
	солома	18.0 ± 1.67	7.76–22.5	21.0	3.34 ± 0.57	1.30–5.51	38.5	2.55 ± 0.31	1.09–4.00	27.5
Клевер	сено	31.2 ± 1.69	24.5–37.6	12.3	16.5 ± 0.81	13.0–19.2	11.0	3.22 ± 0.22	2.49–4.29	15.3
Эспарцет	сено	30.7 ± 0.97	27.4–34.9	7.1	17.8 ± 1.0	12.7–20.7	12.7	4.12 ± 0.54	2.21–5.85	29.7
Люцерна	сено	28.5 ± 1.48	22.9–37.5	11.8	14.0 ± 1.82	6.88–19.8	29.3	5.61 ± 0.53	3.56–7.47	21.3
Степное разнотравье	сено	41.2 ± 2.97	31.6–53.9	16.3	21.7 ± 1.23	16.3–26.3	12.8	4.24 ± 0.34	3.30–5.98	18.0

**Таблица 6.** Содержание микроэлементов в золе растений и коэффициенты биологического поглощения ((мг/кг золы)/(мг/кг почвы))

Сельскохозяйственная культура		Содержание золы, % от абсолютно сухого вещества	Марганец		Цинк		Медь	
			мг/кг золы	КБП	мг/кг золы	КБП	мг/кг золы	КБП
Озимая пшеница	зерно	2.2	1514	4.39	1300	35.62	163.6	11.77
	солома	6.9	343.5	1.00	150.7	4.13	28.7	2.06
Люпин белый	зерно	4.2	25071	72.67	1036	28.38	141.4	10.17
	солома	6.2	13565	39.32	144.8	3.97	31.3	2.25
Соя	зерно	5.2	463.5	1.34	684.6	18.76	201.9	14.53
	солома	5.6	221.4	0.64	113.9	3.12	63.0	4.53
Горох	зерно	3.1	297.4	0.86	853.2	23.38	124.2	8.94
	солома	8.0	225.0	0.65	41.8	1.15	31.9	2.29
Клевер	сено	8.5	367.1	1.06	194.1	5.32	37.9	2.73
Эспарцет	сено	5.6	548.2	1.59	317.9	8.71	73.6	5.29
Люцерна	сено	8.8	323.9	0.94	159.1	4.36	63.8	4.59
Степное разнотравье	сено	6.4	643.8	1.78	339.1	7.59	66.3	4.64

разнотравья элементы образуют ряд: Zn (7.59) > Cu (4.46) > Mn (1.78).

Среди сельскохозяйственных растений наиболее высокое значение КБП марганца было характерно для белого люпина (зерно – 72.67 и солома – 39.32), а наиболее низкое – для гороха (зерно – 0.86 и солома – 0.65). Относительно невысокие значения КБП этого элемента зафиксированы у эспарцета (1.59), клевера (1.06) и люцерны (0.94).

Цинк в наибольшей степени поглощался озимой пшеницей, величина КБП для зерна составляла 35.62, а для соломы – 4.13. Самое низкое значение КБП этого элемента отмечалось у соломы гороха – 1.15. Многолетние бобовые травы по ве-

личине КБП образуют ряд: эспарцет (8.71) > клевер (5.32) > люцерна (4.36).

Самое высокое значение КБП меди было установлено для растений сои (зерно – 14.53 и солома – 4.53), а наиболее низкое – для гороха (зерно – 8.94, солома – 2.29). Среди бобовых трав наибольшее значение данного параметра было характерно для эспарцета (5.29), а наименьшее – для клевера (2.73).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в 2015–2018 гг. основным источником поступления микроэлементов в агроценозы Белгородской области были органические



удобрения. С ними поступало 79.2% марганца, 87.3% цинка и 84.2% меди от общего количества элементов, внесенных с удобрениями и мелиорантами.

В горизонте  $A_{\text{пах}}$  чернозема обыкновенного содержание марганца было в 1.15, цинка – в 1.18, меди – в 1.14 раза больше, чем в черноземе типичном. Для изучаемых микроэлементов характерно биофильное накопление в пахотном слое. Среднее валовое содержание марганца, цинка, меди в горизонте  $A_{\text{пах}}$  было больше, чем в горизонте  $C_{\text{Са}}$ , соответственно для чернозема типичного в 1.49, 1.17, 1.22 раза, а для чернозема обыкновенного – в 1.42, 1.22, 1.16 раза. По результатам сплошного мониторинга установлено, что низкая обеспеченность подвижными формами марганца характерна для 38.6, цинка – 98.7, меди – 98.2% обследованных пахотных почв. Между средневзвешенным значением гидролитической кислотности почв и содержанием подвижного цинка установлена сильная корреляционная связь ( $r = 0.72$ ), а между содержанием подвижных форм меди ( $r = 0.33$ ) и марганца ( $r = 0.34$ ) наблюдалась корреляционная связь средней силы.

Наиболее высокое содержание марганца установлено в зерне (1053 мг/кг) и соломе (841 мг/кг) белого люпина, цинка – в зерне этой же культуры (43.5 мг/кг), а меди – в зерне сои (10.5 мг/кг). Наиболее низкая аккумуляция марганца (9.22 мг/кг) и цинка (26.45 мг/кг) была характерна для зерна гороха, а меди – для зерна озимой пшеницы (3.60 мг/кг). В зерне озимой пшеницы, сои и белого люпина концентрация микроэлементов была больше, чем в соломе, а для растений гороха установлена обратная зависимость. По величине КБП степным разнотравьем элементы образуют ряд:  $Zn (7.59) > Cu (4.46) > Mn (1.78)$ .

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Виноградов А.П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 259 с.
2. ВМДУ-87 “Временный максимально допустимый уровень содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках”, 1987.
3. *Водяницкий Ю.Н.* Формы цинка в загрязненных почвах (обзор литературы) // Почвоведение. 2010. № 3. С. 293–302.
4. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2041-06 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве”, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ 23.01.2006 г.
5. Гигиенические нормативы ГН 2.1.7.2511-09 “Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве”, утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ 18.05.2009 г.
6. *Горбунова Н.С., Протасова Н.А.* Формы соединенный марганца, меди и цинка в черноземах Центрально-Черноземного региона // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Химия. Биология. Фармация. 2008. № 2. С. 77–85.
7. *Дуглас П.О.* Воздействие загрязнения микроэлементами на растения // Загрязнение воздуха и жизнь растений. Л.: Гидрометеоздат, 1988. С. 327–356.
8. *Игонов И.И., Каргин И.Ф.* Динамика содержания тяжелых металлов в процессе длительного использования пашни // Агрохимический вестник. 2012. № 4. С. 35–37.
9. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139.
10. *Корчагин В.И.* Эколого-агрохимическая оценка плодородия почв Воронежской области. Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж, 2017. 28 с.
11. *Мажайский Ю.А.* Особенности распределения тяжелых металлов в профилях почв Рязанской области // Агрохимия. 2003. № 8. С. 74–79.
12. *Медведев И.Ф., Деревягин С.С.* Тяжелые металлы в экосистемах. Саратов: Ракурс, 2017. 178 с.
13. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: Типография Московской с.-х. академии им. К.А. Тимирязева, 1992. 61 с.
14. *Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г.* Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение 2019. № 4. С. 422–439.
15. *Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Лозановская И.Н.* Экология и охрана почв биосферы при химическом загрязнении. М.: Высшая школа, 2002. 334 с.
16. *Перельман А.И.* Геохимия ландшафта. М.: Высшая школа, 1975. 342 с.
17. *Поддубный А.С.* Динамика агрохимического состояния пахотных почв в лесостепи Белгородской области // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 6. С. 15–17.
18. *Попов В.В.* Состояние плодородия пахотных земель в юго-восточных районах Ростовской области // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 3. С. 7–11.
19. *Протасова Н.А., Щербаков А.П.* Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Sr, Ba, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во Воронежского гос. ун-та, 2003. 368 с.
20. *Пузанов А.В., Мешкинова С.С.* Микроэлементы в растениях долины Средней Агатуни // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2009. № 12(62). С. 47–54.

21. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2018. Статистический сборник. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.gks.ru/free\\_doc/doc\\_2018/region/reg-pok18.pdf](https://www.gks.ru/free_doc/doc_2018/region/reg-pok18.pdf)
22. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”, утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001 г.
23. Соловченко В.Д., Лукин С.В., Лисецкий Ф.Н., Голусов П.В. Красная книга почв Белгородской области. Белгород: Изд-во БелГУ, 2007. 139 с.
24. Соловченко В.Д., Тютюнов С.И. Почвенный покров Белгородской области и его рациональное использование. Белгород: Отчий край, 2013. 372 с.
25. Сухова О.А., Болдырев В.В., Акулов А.В. Мониторинг содержания микроэлементов в почвах Волгоградской области // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 4. С. 20–21.
26. Хижняк Р.М. Экологическая оценка содержания микроэлементов (Zn, Cu, Co, Mo, Cr, Ni) в агроэкосистемах лесостепной зоны юго-западной части ЦЧО. Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2016. 24 с.
27. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп: ГУРИПП “Адыгя”, 2003. 1028 с.
28. Юмашев Н.П., Трунов И.А. Почвы Тамбовской области. Мичуринск: Изд-во Мичуринского гос. аграрного ун-та, 2006. 216 с.
29. Bowen H.J.M. Environmental chemistry of the elements. London: Academic Press, 1979. 333 p.
30. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants, 4th ed. Boca Raton: Taylor and Francis Group, 2011. 534 p.
31. McKenzie R.M., Varentsov I.M., Grasselly G. The manganese oxides in soils, in: Geology and Geochemistry of Manganese. Budapest: Akademiai Kiado, 1980. 259 p.
32. Pavilonis B.T., Lioy P.J., Guazzetti S., Bostick B.C., Donna F., Peli M., Georgopoulos P.G., Lucchini R.G. Manganese concentrations in soil and settled dust in an area with historic ferroalloy production // J. Exposure Science & Environmental Epidemiology. 2014. V. 25(4). P. 443–450. <https://doi.org/10.1038/jes.2014.70>
33. Timofeev I., Kosheleva N., Kasimov N. Contamination of soils by potentially toxic elements in the impact zone of tungsten molybdenum ore mine in the Baikal region: A survey and risk assessment // Science of the Total Environment. 2018. V. 642. P. 63–76. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.042>
34. Van der Voet E., Salminen R., Eckelman M., Mudd G., Norgate T., Hischier R. Environmental risks and challenges of anthropogenic metals flows and cycles. A report of the working group on the global metal flows to the International Resource Panel (UNEP), 2013. 231 p.
35. Xiao R., Ali A., Wang P., Li R., Tian X., Zhang Z. Comparison of the feasibility of different washing solutions for combined soil washing and phytoremediation for the detoxification of cadmium (Cd) and zinc (Zn) in contaminated soil // Chemosphere. 2019. 230: P. 510–518. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.121>

## Monitoring the Content of Manganese, Zinc and Copper in Soils and Plants of the Central Chernozemic Region of Russia

S. V. Lukin<sup>1</sup>, \* and D. V. Zhuykov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre of the Agrochemical Service Belgorodskiy, Shchorsa St., 8, Belgorod, 308027 Russia

<sup>2</sup>Belgorod State National Research University, Pobeda St., 85, Belgorod, 308015 Russia

\*e-mail: [serg.lukin2010@yandex.ru](mailto:serg.lukin2010@yandex.ru)

The data of the State agroecological monitoring of soils in Belgorod oblast for the period 2015–2018 are discussed in the paper. It was found that the main source of microelements in agroecosystems is organic fertilizers: 79.2% of manganese, 87.3% of zinc, and 84.2% of copper of the total amount of elements introduced with fertilizers and ameliorants were supplied with organic fertilizers. In the A<sub>plow</sub> horizon of Calcic Chernozems the content of manganese was 1.15, that of zinc – 1.18, and copper by 1.14 times higher than in Haplic Chernozems. The studied microelements are characterized by biogenic accumulation in the arable layer. The total average concentrations of manganese, zinc, and copper in the A<sub>plow</sub> horizon were higher than those in C<sub>ca</sub> horizon for Haplic Chernozems by 1.49, 1.17, and 1.22 times, and for Calcic Chernozems – 1.42, 1.22, and 1.16 times, respectively. The results of continuous monitoring have shown that a low supply of mobile forms of manganese was recorded in 38.6, zinc – 98.7, copper – 98.2% of the examined arable soils. The highest manganese content was found in grain (1053 mg/kg) and straw (841 mg/kg) of white lupine, zinc in grain of the same crop (43.5 mg/kg), and copper in soybean grain (10.5 mg/kg). The lowest accumulation of manganese (9.22 mg/kg) and zinc (26.45 mg/kg) was typical for pea grains, and copper for winter wheat grains (3.60 mg/kg). In the grain of winter wheat, soybean and white lupine the concentration of trace elements was higher than in straw, while for pea plants an inverse relationship was found.

**Keywords:** chernozem, biological absorption coefficient, total content, fertilizers, ameliorants, the content of mobile forms