

УДК 631.416.3:631.445.24

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2023 г. А. А. Уткин^{1,*}, Н. И. Аканова², И. Б. Нода³

¹Российский 127434 аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
153012 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

³Станция агрохимической службы “Ивановская”
153506 Ивановская обл., с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 20.02.2023 г.

После доработки 24.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

В работе представлены результаты обследования дерново-подзолистых почв сельскохозяйственного назначения и растений реперных участков Ивановской обл. на содержание в них бора, меди, кобальта, марганца и цинка, проведенного в 2014 и 2021 гг. Корреляционным анализом определено влияние отдельных физико-химических свойств почв на содержание и распределение доступных форм микроэлементов в почве и взаимосвязи между самими микроэлементами. Установлены изменения обеспеченности микроэлементами почв участков. По величине содержания доступных форм микроэлементов в почвах определена потребность в применении микроудобрений. Определены последовательности культур по содержанию микроэлементов в зерне и соломе злаков, зеленой массе кормовых трав, а также распределению микроэлементов между частями выращенного урожая. Произведена оценка зерна, соломы и зеленой массы на соответствие ветеринарным нормативам, предъявляемым к содержанию в кормах меди, цинка и кобальта. Рассчитаны коэффициенты накопления микроэлементов растительной продукцией культур и проведен их сравнительный анализ. По величине и знаку коэффициентов корреляции между концентрациями микроэлементов в растениях определили проявление антагонизма и синергизма между микроэлементами. Коэффициенты корреляции Пирсона и Спирмена между содержанием подвижных форм микроэлементов в почве и их содержанием в растительной продукции, а также между содержанием микроэлементов в зерне и соломе злаков позволили выявить их силу и неоднозначный характер взаимосвязей.

Ключевые слова: микроэлементы, дерново-подзолистая почва, растения, агроценозы, реперные участки, Ивановская обл.

DOI: 10.31857/S0002188123080100, **EDN:** ZEKAXB

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в отечественной и зарубежной агрономической науке большое внимание уделяется исследованию содержания, трансформации и подвижности форм микроэлементов (МЭ) в почве и их роли в жизни культурных растений. Это связано с тем, что МЭ, наряду с кислотностью почвы, содержанием гумуса и основных элементов питания, являются одним из основных показателей почвенного плодородия [1–3].

В условиях интенсификации земледелия и повышения уровня химизации стало необходимым изучение микроэлементного состава почв, выявление роли МЭ с целью разработки научно обоснованной системы применения микроудобрений

с учетом региональных почвенно-климатических особенностей, особенно на фоне распространения деградации пахотных почв и земель России [1–5].

Принято считать, что к МЭ относят химические элементы, обязательные для растительных организмов, содержание которых измеряется от 0.001 до 0.00001% [6]. Они играют ведущую роль в обмене веществ, росте и развитии растений. Избыточное или недостаточное содержание того или иного МЭ приводит к нарушению сбалансированного поступления в растения других элементов питания, снижению или увеличению их усвояемости из-за нарушения соотношения в

почве, появления хлорозов и некрозов, снижения величины урожая и ухудшения его качества [3].

С практической точки зрения наибольший интерес представляют подвижные формы МЭ в почвах, как наиболее доступные для растений. Почва служит основным источником МЭ для культурных растений, поэтому изучение содержания и поведения форм МЭ в почвах — важное и актуальное направление современной агрохимии.

Оценка текущего уровня плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. по содержанию доступных форм МЭ и их связи с отдельными физико-химическими свойствами почвы, доступности МЭ для растений, в научной литературе освещены недостаточно и требуют дополнительного изучения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

Объект исследования — дерново-подзолистые почвы, доля которых в пахотных землях Ивановской обл. составляет 92% [7].

Цель работы — оценить влияние отдельных физико-химических показателей плодородия дерново-подзолистых почв Ивановской обл. на содержание и поведение подвижных форм МЭ: меди (Cu), цинка (Zn), кобальта (Co), марганца (Mn) и бора (B) в почве, установить параметры накопления МЭ растительной продукцией различных культур и взаимосвязь между содержанием МЭ в почве и растениях.

Особое внимание к изученным элементам вызвано тем, что все они относятся к основным МЭ, играющим важную роль в росте и развитии многих сельскохозяйственных культур.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое обследование почв реперных участков и растений на содержание B, Cu, Co, Mn и Zn проводили в 2014 и 2021 гг. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения на 11-ти реперных участках, занятых дерново-подзолистыми почвами, расположенных в отдельных районах Ивановской обл., путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализа.

Общая площадь дерново-подзолистых почв реперных участков — 207.7 га. Реперные участки располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков — культурные растения: овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.),

ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) и злаковое разнотравье, преимущественно в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и щучки дернистой (*Deschampsia cespitosa* L.).

На отдельном реперном участке в зависимости от его площади с помощью тростьевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец массой ~0.5 кг составляли из 25–30-ти точечных проб и в среднем отбирали с каждых 6–7 га площади реперного участка. Смешанную пробу растений массой ~0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10-ти точечных проб.

Пробы почв и растений отбирали на одних и тех же локациях реперных участков. Отобранные образцы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния, а затем измельчали на мельнице.

Анализы почв и растений были выполнены по принятым в агрохимической практике методикам: обменная кислотность (pH_{KCl}) — ГОСТ Р 58594-2019, органическое вещество (C_{org}) — ГОСТ 26213-91 (по Тюрину в модификации ЦИНАО), сумма поглощенных оснований (S) — ГОСТ 27821-88 (по Каппену), фракции физической глины и ила (по Качинскому) — по [8], содержание подвижного B — ГОСТ Р 50688-94 (по Бергеру и Труogu в модификации ЦИНАО), обменного Mn — ГОСТ 26486-85 (по ЦИНАО), подвижного Co — ГОСТ 50687-94 (по Пейве–Ринькису), подвижной Cu — ГОСТ 50684-94 (по Пейве–Ринькису в модификации ЦИНАО), подвижного Zn — ГОСТ Р 50686–94 (по Крупскому–Александровой в модификации ЦИНАО), содержание Cu и Zn в растениях — ГОСТ 27995-88 и ГОСТ 27996-88 соответственно, B и Co в растениях — ОСТ 10.154-88 и ОСТ 10.155-88 соответственно, Mn в растениях — ГОСТ 27997-88.

Для оценки накопления МЭ растениями из почвы рассчитывали коэффициент накопления (K_H), равный отношению содержания МЭ в растениях (мг/кг) к содержанию подвижной формы МЭ в почве (мг/кг).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ($p > 0.05$). Средние величины изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью 2-х выборочного t -критерия Стьюдента для зависимых переменных ($p < 0.05$), при ненормальном — критерия Вилкоксона ($p < 0.05$). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении

Таблица 1. Физико-химические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

Реперный участок, №*	Число смешанных образцов, <i>n</i>	Район	Фракция, %**		$C_{орг}$, %	pH_{KCl} , ед.	S , мг-экв/100 г почвы
			<0.001 мм	<0.01 мм			
1	2	Ивановский	4.8	18.3	<u>2.1</u> 2.0	<u>5.2</u> 5.8	<u>11.8</u> 10.8
6	2	Пучежский	2.0	9.3	<u>2.1</u> 1.7	<u>5.6</u> 6.3	<u>10.7</u> 9.1
8	3	Верхнеландеховский	3.5	16.0	<u>1.9</u> 1.6	<u>5.0</u> 5.5	<u>12.5</u> 8.2
9	4	Вичугский	3.0	14.1	<u>2.3</u> 2.1	<u>6.1</u> 6.2	<u>27.9</u> 27.6
11	2	Кинешемский	5.5	25.0	<u>2.4</u> 2.2	<u>5.5</u> 5.9	<u>16.0</u> 16.2
12	5	Комсомольский	5.7	20.0	<u>2.1</u> 2.1	<u>6.2</u> 6.2	<u>17.0</u> 20.7
14	3	Родниковский	5.2	31.0	<u>1.8</u> 2.0	<u>5.1</u> 5.4	<u>12.2</u> 11.8
15	4	Тейковский	2.3	9.0	<u>2.0</u> 2.5	<u>6.5</u> 6.2	<u>16.8</u> 9.9
17	4	Палехский	3.3	16.3	<u>2.2</u> 3.0	<u>6.0</u> 6.8	<u>12.5</u> 19.4
18	4	Шуйский	4.9	16.2	<u>3.1</u> 3.0	<u>5.7</u> 5.7	<u>17.2</u> 20.3
21	3	Приволжский	5.1	19.9	<u>2.8</u> 2.6	<u>6.4</u> 6.5	<u>38.6</u> 30.8
$M \pm m$			4.1 ± 0.4	17.7 ± 1.9	<u>2.3 ± 0.1</u> 2.3 ± 0.1	<u>5.8 ± 0.2</u> 6.0 ± 0.1	<u>17.6 ± 2.5</u> 16.8 ± 2.3

*Нумерация реперных участков та же в табл. 2, 3.

**Содержание фракции (%) определяли в момент закладки почвенного разреза.

Примечания. 1. Приведены средние арифметические величины: M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего арифметического. То же в табл. 2, 3. 2. Над чертой – 2014 г., под чертой – 2021 г. То же в табл. 2, 3.

признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В своих работах Добровольский, Чернова и Бекецкая отмечали, что основными факторами, влияющими на накопление, распределение и миграцию МЭ в почвах, являются содержание органического вещества, реакция среды, гранулометрический и химический составы почвы [9, 10].

Исследованные физико-химические показатели дерново-подзолистых почв реперных участков, влияющие на особенности поведения в них изученных МЭ, представлены в табл. 1. Согласно

градации распределения глинистых частиц, почвы большинства участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав. Средние величины обеспеченности почв участков $C_{орг}$ в 2014 и 2021 гг. соответствовали низкому уровню обеспеченности.

За период наблюдения средняя величина обменной кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед. Величины сумм поглощенных оснований почв большинства участков соответствовали повышенным степеням обеспеченности. Средняя величина S почв участков за период наблюдения снизилась на 0.8 мг-экв/100 г почвы.

Варьирование всех физико-химических показателей дерново-подзолистых почв участков подчинялось закону нормального распределения. Величины критерия Шапиро–Уилка удовлетворяли условию: $p > 0.05$.

Сравнение физико-химических показателей почв по 2-м аналогичным зависимым выборкам 2014 и 2021 гг. показало, что существенно различались показатели pH_{KCl} , это подтверждено расчетом величин t -критерия Стьюдента ($p < 0.05$).

Одним из критериев потребности растений в МЭ является их содержание в растениях. Обеспеченность растений МЭ устанавливают по содержанию их в почве. При этом учитывают не общее содержание МЭ в почве, а концентрацию подвижных форм, которые являются наиболее доступными для растений. Содержание Cu, Mn, Co и Zn в подвижной форме чаще всего составляет ~10–15% от их валового содержания в почве, В – 2–4% [1].

Одним из факторов, тесно связанным с плодородием почвы и влияющим на урожайность и качество растительной продукции, является обеспеченность почв доступными формами МЭ для питания растений [11]. Проанализируем данные по содержанию в дерново-подзолистых почвах реперных участков доступных форм МЭ (табл. 2).

Бор. Среднее содержание и пределы изменений содержания водорастворимых форм В в почвах участков на протяжении всего мониторинга согласовались с данными, приведенными в монографии Панасина для этих почв (0.43–1.7 мг/кг) [1].

Согласно градации обеспеченности почв таежно-лесной зоны водорастворимыми формами В [12], и исходя из изменений его содержания в почвах большинства реперных участков в 2014 и 2021 гг., его содержание преимущественно отвечало средней степени обеспеченности. В 2021 г. отмечали увеличение количества участков, имеющих высокую обеспеченность почв В.

Адсорбция В в определенной мере зависит от величины pH_{KCl} и содержания $C_{орг}$ [6]. Отмечали, что наилучшей способностью к поглощению водорастворимого В обладают тонкодисперсные иллы и коллоидные частицы [13].

Медь. Пределы содержания подвижных форм Cu в почвах участков соответствовали пределам его содержания (1.0–5.4 мг Cu/кг почвы), указанным для дерново-подзолистой почвы в работе [11]. Обеспеченность почв участков подвижной Cu варьировала от низкой до средней на протяжении всего периода наблюдения. В целом, в 2014–2021 гг. средний уровень обеспеченности почв участков Cu соответствовал средней степени [12].

Подвижная Cu может вступать во взаимодействие с органическим веществом почв (гуминовыми и фульвокислотами) и в обменные реакции с минеральными компонентами почв. Кроме того, повышение кислотности почвы увеличивает содержание подвижной Cu [13]. За период с 2014

по 2021 г. содержание В в изученных почвах увеличилось на 25.9, Cu – снизилось на 7.9%. Как показал расчет критерия Вилкоксона, отмеченные изменения не были достоверными.

Кобальт. Содержание подвижного Co в почвах участков согласовалось с пределами его содержания в дерново-подзолистых почвах (0.12–3.0 мг/кг), отмеченными в работе Пейве [13]. Варьирование содержания подвижного Co в почвах реперных участков в 2014 и 2021 гг. отмечено от низкой степени обеспеченности до средней, однако в 2014 г. большинство почв участков имели низкую обеспеченность МЭ, в 2021 г. – среднюю [12].

Распределение содержания Co в почве зависит от количества физической глины и илстых фракций, величин $C_{орг}$, pH_{KCl} и оксидов железа [6]. Оценка содержания Co с помощью двухвыборочного t -критерия Стьюдента показала, что увеличение его присутствия в почвах на 63.4% было существенным.

В данном исследовании решили выявить взаимосвязи между доступными формами изученных МЭ и исследованными свойствами дерново-подзолистых почв, которые оценивали по величинам коэффициентов линейной корреляции Пирсона и ранговой корреляции Спирмена. Показано, что в основном между величинами pH_{KCl} , S , $C_{орг}$, суммарным количеством илстых и глинистых частиц и содержанием подвижных форм В, Cu и Co установлены недостоверные, преимущественно прямые корреляционные взаимосвязи слабой и реже – средней силы, за исключением существенной корреляции между содержанием Co и S (табл. 2). Низкие коэффициенты корреляции между содержаниями подвижных форм изученных МЭ и количеством тонкодисперсных частиц в большинстве исследованных почв можно объяснить недостаточным количеством илстых частиц, которые принимают участие в адсорбции подвижных форм МЭ.

Марганец. Для дерново-подзолистых почв России характерно наличие наибольших количеств обменных форм Mn (50–150 мг/кг почвы) [6]. Среднее содержание обменного Mn в почвах участков в 2014–2021 гг., согласно градации обеспеченности почв России подвижными формами МЭ, соответствовало высокой степени обеспеченности (60–100 мг Mn/кг) [12].

В своей работе Битюцкий [6] отмечал, что концентрация Mn в почвах зависит от реакции среды и содержания гумуса. Зырин указывает на то, что значительная часть подвижного Mn почв сосредоточена в тонкодисперсных частицах и в связях с органическим веществом [14].

В нашем исследовании между содержанием обменного Mn, S и pH_{KCl} установлены слабые

Таблица 2. Содержание подвижных форм МЭ в почве, мг/кг

Реперный участок, №	B	Cu	Co	Mn	Zn
1	<u>0.43</u> 0.72	<u>1.55</u> 1.92	<u>0.89</u> 2.01	<u>66.3</u> 58.0	<u>1.78</u> 1.15
6	<u>0.44</u> 0.56	<u>2.25</u> 2.01	<u>0.81</u> 1.63	<u>60.0</u> 73.0	<u>0.80</u> 1.15
8	<u>0.53</u> 0.52	<u>1.92</u> 0.96	<u>0.62</u> 0.79	<u>60.5</u> 70.0	<u>1.00</u> 0.83
9	<u>0.42</u> 0.52	<u>3.42</u> 2.58	<u>1.07</u> 1.36	<u>73.2</u> 80.0	<u>0.97</u> 1.35
11	<u>0.56</u> 0.66	<u>2.66</u> 3.08	<u>1.01</u> 1.55	<u>78.4</u> 67.0	<u>1.04</u> 1.56
12	<u>0.41</u> 0.55	<u>1.58</u> 1.10	<u>0.93</u> 1.70	<u>51.3</u> 71.0	<u>0.82</u> 0.75
14	<u>0.47</u> 0.74	<u>2.28</u> 2.60	<u>0.95</u> 1.69	<u>70.0</u> 58.0	<u>0.77</u> 0.94
15	<u>0.69</u> 0.81	<u>1.84</u> 1.85	<u>0.90</u> 1.22	<u>65.1</u> 65.0	<u>1.65</u> 2.03
17	<u>0.43</u> 0.35	<u>1.65</u> 1.57	<u>0.80</u> 1.34	<u>75.3</u> 25.0	<u>1.40</u> 1.54
18	<u>0.47</u> 1.08	<u>1.79</u> 2.22	<u>0.91</u> 1.61	<u>70.1</u> 61.0	<u>1.41</u> 2.07
21	<u>1.12</u> 0.92	<u>4.01</u> 3.05	<u>1.30</u> 1.84	<u>69.8</u> 69.0	<u>1.03</u> 2.31
$M \pm m$	<u>0.54 ± 0.06</u> <u>0.68 ± 0.06</u>	<u>2.27 ± 0.24</u> <u>2.09 ± 0.21</u>	<u>0.93 ± 0.05</u> <u>1.52 ± 0.10</u>	<u>67.3 ± 2.3</u> <u>63.4 ± 4.3</u>	<u>1.15 ± 0.11</u> <u>1.43 ± 0.16</u>
$r(C_{\text{орг}} : \text{МЭ})$	<u>0.06</u> 0.37	<u>0.23</u> 0.21	<u>0.52</u> 0.14	<u>0.35</u> -0.39	<u>0.16</u> 0.75
$r(\text{pH}_{\text{KCl}} : \text{МЭ})$	<u>0.05</u> -0.33	<u>0.07</u> 0.02	<u>0.53</u> 0.09	<u>-0.03</u> 0.19	<u>0.12</u> 0.38
$r(\Sigma (<0.001$ и $<0.01) : \text{МЭ})$	<u>0.04</u> 0.16	<u>0.05</u> 0.37	<u>0.31</u> 0.39	<u>0.25</u> -0.34	<u>-0.32</u> -0.21
$r(S : \text{МЭ})$	<u>0.17</u> 0.16	<u>0.36</u> 0.44	<u>0.85*</u> 0.27	<u>0.21</u> 0.11	<u>-0.14</u> 0.46
B	= -				
Cu	<u>0.48</u> 0.45	= -			
Co	<u>0.16</u> 0.39	<u>0.64*</u> 0.46	= -		
Mn	<u>0.11</u> -0.26	<u>0.33</u> 0.01	<u>0.35</u> -0.08	= -	
Zn	<u>0.23</u> 0.63*	<u>-0.44</u> 0.53	<u>-0.13</u> 0.13	<u>0.23</u> -0.22	= -

*Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена. выделены значимые коэффициенты корреляции при $p = 0.95$. То же в табл. 3.

недостовверные корреляции, между $C_{\text{орг}}$ и Mn — прямые и обратные корреляции средней силы, между Mn и частицами ила и глины — корреляции слабой и средней силы (табл. 2). На отсутствие взаимосвязей четкого характера между обменным Mn и $pH_{\text{КСЛ}}$ на дерново-подзолистых почвах Удмуртии и Кировской обл. России, Беларуси отмечено в работах [15–17]. Отсутствие высоких и значимых связей между изученными свойствами дерново-подзолистых почв и содержанием подвижного Mn в них может быть связано с тем, что значительное влияние на концентрацию подвижного Mn оказывает окислительно-восстановительный потенциал почвы и содержание лабильного органического вещества [18], изучение которых не входило в программу исследования. Как показал расчет критерия Вилкоксона, содержание Mn в 2021 г. не существенно снизилось на 5.8% к уровню 2014 г.

Цинк. Пределы изменений содержания подвижного цинка в дерново-подзолистой почве реперных участков совпадали с пределами содержания его усвояемых форм (0.12–20 мг/кг) для данной почвы, при этом следует отметить, что содержание Zn в дерново-подзолистых почвах участков находились ближе к нижней границе изменений [19].

Среднее содержание подвижных форм Zn, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером с pH 4.8, в дерново-подзолистых почвах участков в 2014 и 2021 гг. соответствовало в основном низкой (<1.0 мг/кг) и реже — средней обеспеченности (1–2 мг Zn/кг) почв как микроэлементом питания растений.

Как показал расчет коэффициентов корреляции, между изученными свойствами почвы и содержанием подвижного Zn значимое ($p = 0.95$) взаимовлияние отмечено только между содержанием в почве $C_{\text{орг}}$ и содержанием Zn в 2021 г., в остальных случаях выявлены недостоверные корреляции. За 7-летний период мониторинга, среднее содержание Zn в почвах участков несущественно увеличилось на 24.3%.

Предположительно, повышение обеспеченности подвижными формами В, Со и Zn связано с поступлением в почвы дополнительных количеств данных элементов от техногенных источников загрязнения и внесением с удобрениями.

Взаимодействия между различными МЭ в почвах могут проявляться по-разному и зависят от их количественного и качественного составов, факторов внешней среды, свойств почвы и др. [6]. Особенности возможного взаимовлияния между подвижными формами изученных МЭ в дерново-

подзолистых почвах выявили с помощью расчета корреляционных связей (табл. 2). В нашем случае направление и сила взаимосвязей среди изученных МЭ изменялась по годам, завися от условий внешней среды. Достоверно установлено, что изменение концентрации в почве подвижной Со было тесно связано с наличием в почве подвижного Со в 2014 г. Между концентрациями подвижного Zn и В в 2021 г. также отмечена прямая значимая корреляция. В остальных случаях между доступными формами МЭ в почвах в 2014 и 2021 гг. отмечали несущественные корреляции (табл. 2). По-видимому, концентрации доступных форм МЭ в почвах больше зависели от влияния других факторов.

Разные авторы приводят пограничные величины содержания МЭ в почвах, ниже которых отмечают их дефицит для растений. Например, граничными показателями содержания подвижных форм Mn является 40, Zn и В — 0.3, Со — 2.5, Cu — 1.5–2 мг/кг почвы [12, 20].

Дерново-подзолистые почвы всех реперных участков на протяжении всего периода мониторинга были плохо обеспечены подвижным Со, что создавало риск снижения урожайности растений и ухудшения качества продукции. Для устранения недостаточной обеспеченности растений Со рекомендуется внесение в почву кобальтсодержащих микроудобрений.

Содержание МЭ в растениях агроценозов представлено в табл. 3. Накопление МЭ растениями из почв главным образом зависит от типа и свойств почвы, вида и сорта растений, явлений антагонизма и синергизма между отдельными элементами питания при поступлении их в растения [3]. Были определены последовательности культур по содержанию МЭ в зерне и соломе злаков. Усредненное содержание В в зерне снижалось в ряду: яровая пшеница > ячмень = озимая пшеница > овес; Cu — озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес; Со — ячмень > озимая пшеница > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Снижение содержания Cu и Со в соломе злаков совпадало со снижением их содержания в зерне. Содержание В снижалось в ряду: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > овес > ячмень > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > ячмень > овес > озимая пшеница. Установлено, что в зеленой массе клевера и тимopheевки больше содержалось В, Со и Mn и меньше Cu и Zn, чем в полевице, мятлике и щучке.

Таблица 3. Содержание МЭ в растениях, мг/кг

Реперный участок, №	Культура (вид продукции)	B	Cu	Co	Mn	Zn
1	Овес (зерно/солома) Овес (зерно/солома)	<u>1.86/6.09</u> <u>1.65/5.23</u>	<u>2.30/1.55</u> <u>1.52/1.20</u>	<u>0.12/0.05</u> <u>0.01/0.04</u>	<u>56.0/53.0</u> <u>6.5/15.0</u>	<u>22.3/4.2</u> <u>21.0/4.0</u>
6	Озимая пшеница (зерно/солома) Овес (зерно/солома)	<u>1.82/6.73</u> <u>1.72/4.71</u>	<u>7.30/2.10</u> <u>2.05/1.30</u>	<u>0.05/0.30</u> <u>0.02/0.05</u>	<u>31.0/36.0</u> <u>6.5/17.0</u>	<u>23.5/4.8</u> <u>21.0/5.8</u>
8	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.50</u> <u>3.40</u>	<u>2.65</u> <u>0.64</u>	<u>0.02</u> <u>0.12</u>	<u>16.0</u> <u>32.5</u>	<u>4.2</u> <u>3.0</u>
9	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.90</u> <u>2.09</u>	<u>1.34</u> <u>0.55</u>	<u>0.02</u> <u>0.12</u>	<u>15.0</u> <u>42.0</u>	<u>3.5</u> <u>2.9</u>
11	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.54</u> <u>2.70</u>	<u>1.60</u> <u>0.64</u>	<u>0.03</u> <u>0.14</u>	<u>15.5</u> <u>18.0</u>	<u>5.1</u> <u>2.8</u>
12	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.59</u> <u>2.44</u>	<u>2.77</u> <u>0.55</u>	<u>0.02</u> <u>0.11</u>	<u>16.0</u> <u>29.0</u>	<u>3.8</u> <u>2.9</u>
14	Ячмень (зерно/солома) Яровая пшеница (зерно/солома)	<u>1.74/5.78</u> <u>2.73/4.64</u>	<u>2.90/1.70</u> <u>2.85/1.90</u>	<u>0.25/0.80</u> <u>0.01/0.04</u>	<u>22.0/23.0</u> <u>6.5/9.3</u>	<u>15.6/9.1</u> <u>25.0/10.6</u>
15	Ячмень (зерно/солома) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>1.90/6.19</u> <u>1.85</u>	<u>2.50/1.00</u> <u>0.54</u>	<u>0.26/0.79</u> <u>0.10</u>	<u>20.0/23.0</u> <u>30.0</u>	<u>14.8/8.5</u> <u>1.9</u>
17	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.41</u> <u>2.73</u>	<u>1.66</u> <u>0.61</u>	<u>0.02</u> <u>0.12</u>	<u>14.0</u> <u>27.5</u>	<u>3.8</u> <u>2.4</u>
18	Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	<u>2.28</u> <u>2.47</u>	<u>2.54</u> <u>0.59</u>	<u>0.01</u> <u>0.12</u>	<u>15.0</u> <u>28.0</u>	<u>4.5</u> <u>2.9</u>
21	Клевер, тимopheевка (зеленая мас Овес (зерно/солома)	<u>3.26</u> <u>1.88/4.73</u>	<u>2.73</u> <u>1.85/1.20</u>	<u>0.02</u> <u>0.02/0.04</u>	<u>15.0</u> <u>5.3/16.5</u>	<u>5.9</u> <u>13.8/5.6</u>

Таблица 3. Окончание

Реперный участок, №	Культура (вид продукции)	B	Cu	Co	Mn	Zn
<i>M</i> ± <i>m</i>	Овес (зерно/солома)	1.78 ± 0.06/ 5.19 ± 0.32	1.93 ± 0.16/ 1.31 ± 0.08	0.04 ± 0.003/ 0.04 ± 0.001	18.6 ± 12.5/ 25.4 ± 9.2	19.5 ± 1.9/ 4.9 ± 0.5
	Яровая пшеница (зерно/солома)	2.73 ± 0.19/ 4.64 ± 0.31	2.85 ± 0.23/ 1.90 ± 0.19	0.01 ± 0.001/ 0.01 ± 0.001	6.5 ± 0.7/ 9.3 ± 1.0	25.0 ± 2.2/ 10.6 ± 0.9
	Ячмень (зерно/солома)	1.82 ± 0.08/ 5.99 ± 0.21	2.70 ± 0.20/ 1.35 ± 0.35	0.26 ± 0.01/ 0.80 ± 0.01	21.0 ± 1.0/ 22.9 ± 0.1	15.2 ± 0.4/ 8.8 ± 0.3
	Озимая пшеница (зерно/солома)	1.82 ± 0.07/ 6.73 ± 0.36	7.30 ± 0.33/ 2.10 ± 0.24	0.05 ± 0.002/ 0.30 ± 0.01	31.0 ± 1.1/ 36.0 ± 1.3	23.5 ± 0.6/ 4.8 ± 0.4
	Полевица, мяглик, щучка (зеленая масса)	2.54 ± 0.09	2.09 ± 0.26	0.02 ± 0.003	15.3 ± 0.3	4.2 ± 0.2
	Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	2.62 ± 0.19	0.86 ± 0.27	0.11 ± 0.01	27.8 ± 3.0	3.1 ± 0.4
<i>r</i> _{МЭ} почва/МЭ растение	Овес (зерно/солома)	0.08/−0.67	−0.34/−0.68	−1.00/0.85	−0.32/0.40	0.75/0.26
	Яровая пшеница (зерно/солома)	0.45/−0.34	0.24/0.10	−0.44/−0.14	0.21/0.11	−0.11/0.13
	Ячмень (зерно/солома)	0.80/−0.80	0.20/0.40	−0.40/−0.20	0.31/0.17	−0.51/0.17
	Озимая пшеница (зерно/солома)	0.43/−0.37	0.26/0.11	−0.02/−0.24	0.44/0.14	−0.03/0.07
	Полевица, мяглик, щучка (зеленая масса)	−0.28	−0.73	0.20	−0.68	0.18
	Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	0.07	0.31	0.27	0.50	−0.59
	Овес (зерно/солома)	0.23	0.87	0.82	0.63	−0.57
	Яровая пшеница (зерно/солома)	−0.51	0.45	0.58	0.81*	−0.20
	Ячмень (зерно/солома)	−0.40	0.80	0.80	0.99*	−0.14
	Озимая пшеница (зерно/солома)	−0.31	0.70	0.77	0.86*	−0.23
<i>r</i> _{МЭ} зерно/МЭ солома						

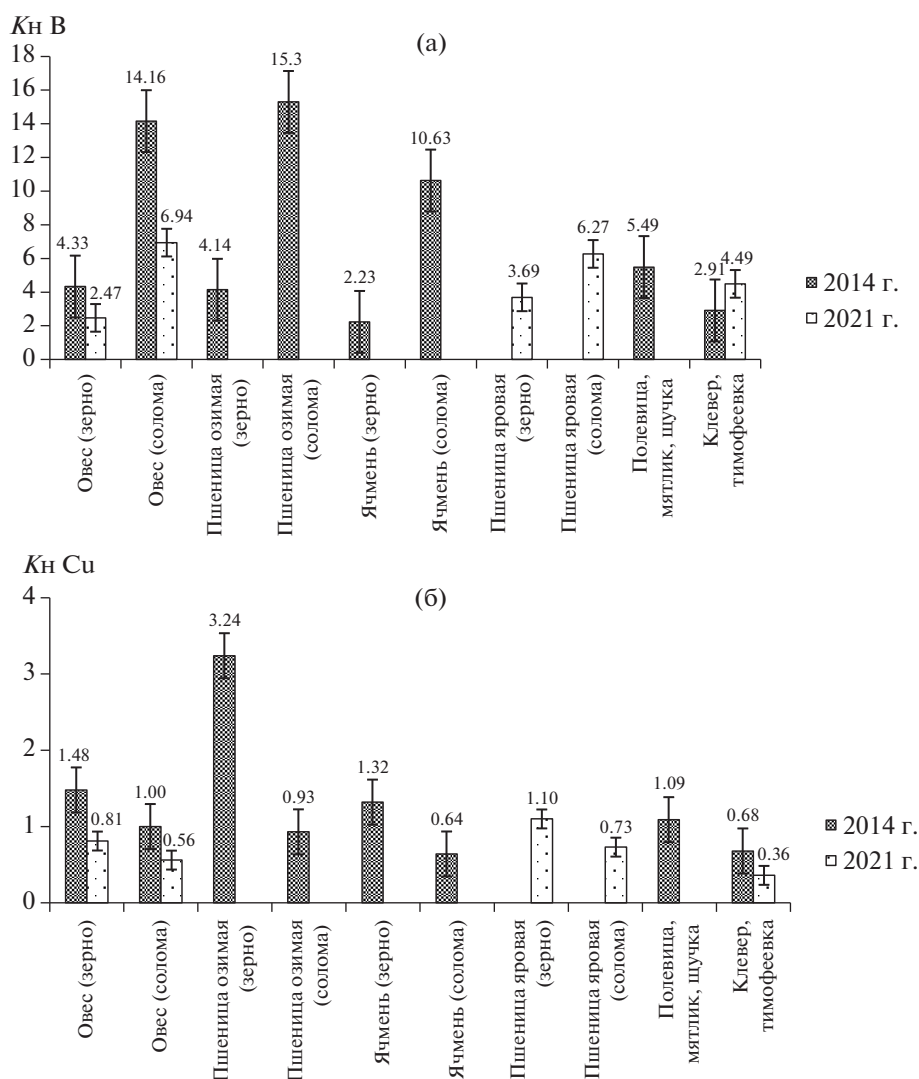


Рис. 1. Коэффициенты накопления МЭ растениями: (а) – В, (б) – Cu, (в) – Co, (г) – Mn, (д) – Zn.

Для растений овса, ячменя, озимой и яровой пшениц было характерно большее содержание В и Mn в соломе урожая, Cu и Zn – в зерне культуры. У овса Co распределялся равномерно между обеими частями урожая, у ячменя, озимой и яровой пшениц его больше накапливалось в соломе. На факт схожего с отмеченным нами распределением В в соломе и зерне ячменя и яровой пшеницы, Cu и Zn – в соломе и зерне ячменя и овса на дерново-подзолистых почвах указано в работе [1].

Фактические величины содержания всех изученных МЭ (на сухое вещество) в зерне озимой пшеницы, В и Zn – зерне и соломе яровой пшеницы, ячменя и овса, Mn – в зерне ячменя и овса соответствовали показателям, характерным для данных культур, выращенных на дерново-подзолистых почвах. В то же время отмечали заниженное содержание Cu и Co в зерне и Mn – в зерне и

соломе яровой пшеницы, Cu – в зерне и соломе ячменя и овса и Mn – в соломе этих культур по сравнению с типичными показателями концентраций этих МЭ [1].

Вся выращенная растительная продукция (зерно, грубые и сочные корма) удовлетворяла требованиям к временному максимально допустимому уровню (МДУ) в кормах для сельскохозяйственных животных для Cu (30 мг/кг), Zn (50 мг/кг) и Co (1 мг/кг) [21]. Содержание Mn и В в растительной продукции, используемой на кормовые цели, не нормируется.

Установлено, что коэффициент накопления (K_n) В, Co и Mn соломой ячменя, озимой и яровой пшениц были больше, чем K_n этих МЭ зерном, и наоборот, K_n Cu и Zn зерновой частью урожая данных культур, были больше, чем K_n Cu и Zn соломой (рис. 1). K_n В, Cu, Co и Mn соломой

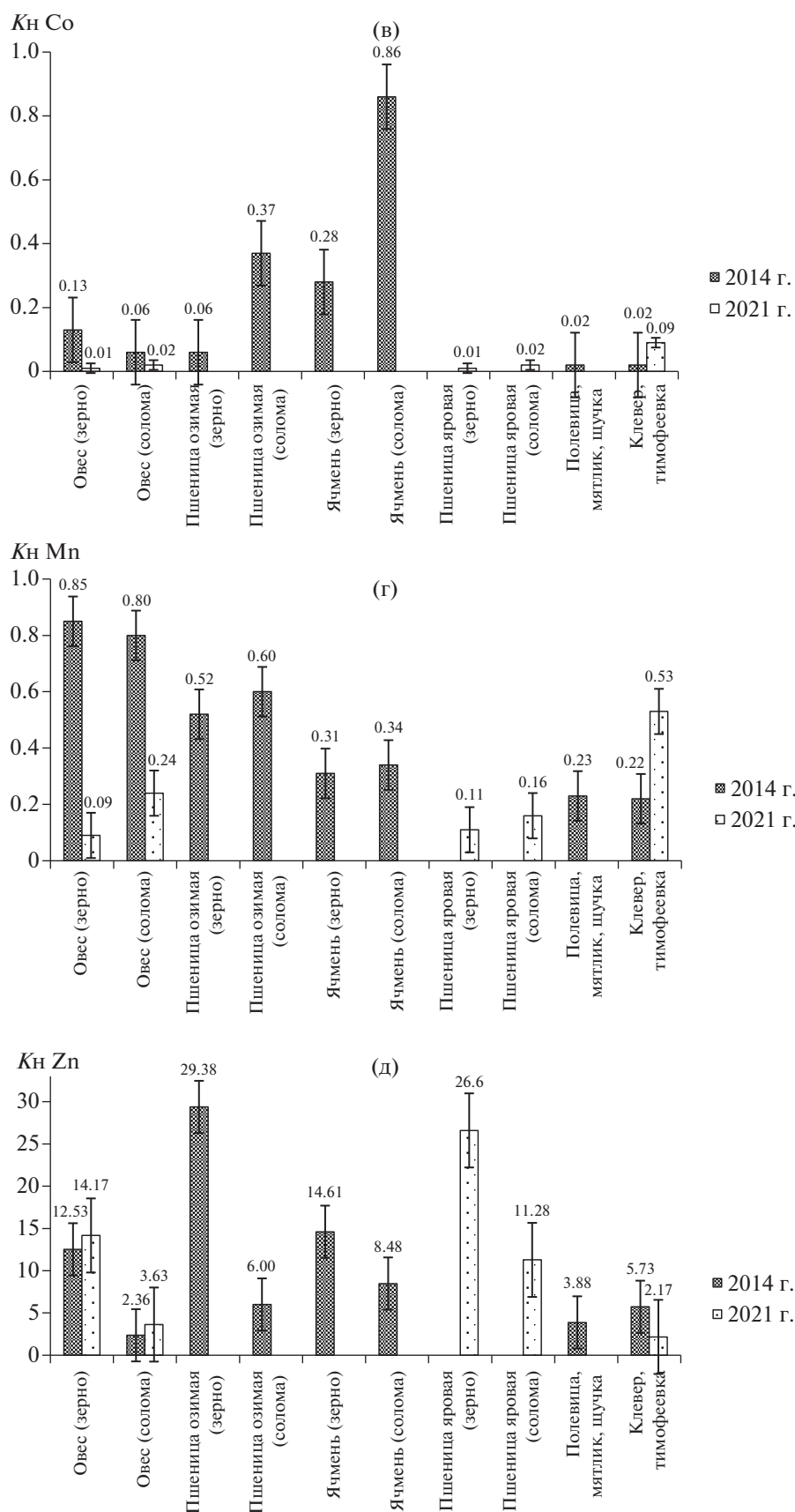


Рис. 1. Окончание.

овса были больше, чем зерном, а K_H Zn зерном больше, чем соломой.

Величины K_H В, Cu и Zn зеленой биомассой полевицы, мятлика и щучки были больше, чем клевера и тимopheевки, а K_H Co и Mn — наоборот, были больше у клевера и тимopheевки, чем у полевицы, мятлика и щучки.

Изученные МЭ обладают разным потенциалом поглощения растениями. Поступление элементов в биомассу растений регулируется процессами трансформации и иммобилизации их почвой, а также зависит от наличия у растений различных физиологических барьеров поглощения [22]. По величинам K_H к МЭ с барьерным типом поглощения относятся Mn, Co и В, у которых функции физиологического барьера, препятствующего избыточному поступлению элементов в биомассе, играет корневая система. Zn и Cu относятся к МЭ с безбарьерным типом поглощения и накапливаются в зерне злаков в концентрациях, превышающих концентрации в соломе. Применение Zn и Cu, обладающих наиболее высоким потенциалом поглощения, необходимо контролировать во избежание избыточного накопления их в растительной продукции.

Парный корреляционный анализ показал, что между количеством отдельных МЭ в растениях, для которых характерны явления антагонизма и синергизма, отсутствовали достоверные ($p = 0.95$) антагонистические и синергические взаимодействия для всех исследованных видов растений [3].

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона и Спирмена показал, что между содержанием подвижных форм МЭ в почве и содержанием МЭ в зерне и соломе зерновых культур и зеленой массе многолетних трав и злакового разнотравья отмечены недостоверные взаимосвязи (табл. 3). Между изученными показателями в основном отмечали связь слабой и средней силы, которая изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур.

Между содержанием Zn и В в зерне и соломе зерновых культур отмечали преимущественно обратные недостоверные корреляции средней и слабой силы. Между содержанием и распределением Cu, Co и Mn в зерне и соломе выявлены прямые корреляции в основном высокой силы, причем для Mn у ячменя, озимой и яровой пшениц они были существенными.

ВЫВОДЫ

1. Среднее содержание и пределы изменений подвижных форм изученных МЭ в дерново-подзолистых почвах Ивановской обл. соответствовали типичным показателям, характерным для дерново-подзолистых почв России.

2. За период с 2014 по 2021 г. содержание В и Zn в почвах реперных участков несущественно увеличилось на 25.9 и 24.3%, Co — достоверно увеличилось на 63.4%, Cu и Mn — не существенно снизилось на 7.9 и 5.8% соответственно.

3. В целом с 2014 по 2021 г., согласно градации обеспеченности почв В и Cu, их содержание отвечало средней степени обеспеченности. Среднее содержание Zn в почвах в основном соответствовало низкой и реже — средней степени, Co в 2014 г. — низкой, в 2021 г. — средней степени, Mn — высокой степени обеспеченности.

4. Между содержанием МЭ в почвах, величинами r_{HCl} , S , $C_{орг}$, содержанием глинистых и илестых частиц в основном отмечены недостоверные, преимущественно прямые корреляции слабой и реже — средней силы, за исключением существенной корреляции между содержанием Co и показателем S в 2014 г., Zn и $C_{орг}$ — в 2021 г.

5. Между концентрациями подвижных Cu и Co в 2014 г., а также Zn и В в почве в 2021 г. отмечена достоверная корреляция. В остальных случаях между формами МЭ в почвах выявлены несущественные взаимосвязи.

6. Дерново-подзолистые почвы всех реперных участков на протяжении всего периода мониторинга были плохо обеспечены подвижным Co.

7. Содержание В в зерне снижалось в ряду: яровая пшеница > ячмень = озимая пшеница > овес; Cu — озимая пшеница > яровая пшеница > ячмень > овес; Co — ячмень > озимая пшеница > > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > > ячмень > овес > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Содержание В в соломе снижалось в ряду: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница; Mn — озимая пшеница > овес > ячмень > яровая пшеница; Zn — яровая пшеница > ячмень > овес > > озимая пшеница. Снижение содержания Cu и Co в соломе совпадало со снижением их содержания в зерне.

8. В зеленой массе клевера и тимopheевки больше содержалось В, Co и Mn и меньше Cu и Zn, чем в злаковом разнотравье.

9. Для растений овса, ячменя, озимой и яровой пшениц было характерно большее содержание В и Mn в соломе, Cu и Zn — в зерне. У овса Co рас-

пределялся равномерно между обеими частями урожая, у ячменя, озимой и яровой пшениц его больше накапливалось в соломе.

10. Содержание Cu, Zn и Co в зерне, соломе и зеленой массе удовлетворяло требованиям к временному МДУ в кормах для животных.

11. Между содержанием подвижных форм МЭ в почве и МЭ в растительной продукции отмечены недостоверные взаимосвязи слабой и средней силы.

12. Коэффициенты накопления (K_H) В, Со и Мп соломой ячменя, озимой и яровой пшениц были больше, чем K_H этих МЭ зерном, и наоборот, K_H Cu и Zn зерновой частью урожая данных культур были больше, чем K_H Cu и Zn соломой. K_H В, Cu, Со и Мп соломой овса были больше, чем зерна, а K_H Zn зерном — больше, чем соломой. K_H В, Cu и Zn зеленой массой полевицы, мятлика и щучки были больше, чем клевера и тимофеевки, а K_H Со и Мп клевера и тимофеевки — наоборот, были больше, чем злакового разнотравья.

13. К МЭ с барьерным типом поглощения относятся Мп, Со и В. Zn и Cu относятся к МЭ с безбарьерным типом поглощения.

14. Между содержанием Zn и В в зерне и соломе отмечали в основном обратные недостоверные корреляции средней и слабой силы. Между содержанием и распределением Cu, Со и Мп зерне и соломе выявлены прямые корреляции преимущественно высокой силы. Для Мп у ячменя, озимой и яровой пшениц они были существенными.

Авторы выражают благодарность сотруднику САС “Ивановская” Е.А. Востряковой за помощь в проведении химических анализов почвенных и растительных образцов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панасин В.И. Микроэлементы и урожай. Калининград: Калининград. кн. изд-во, 2000. 276 с.
2. Анисимова Л.Н. Накопление Со, Cu и Zn ячменем в зависимости от содержания и формы нахождения металлов в дерново-подзолистой почве // *Агрохимия*. 2008. № 10. С. 62–68.
3. Кабата Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
4. Уткин А.А., Лукьянов С.Н. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков серых лесных почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 12–21. <https://doi.org/10.31857/S0002188122030139>
5. Уткин А.А. Плодородие и экотоксикологическое состояние реперных участков дерново-подзолистых суглинистых почв Владимирской области // *Агрохимия*. 2022. № 6. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188122060126>
6. Битюцкий Н.П. Микроэлементы и растение. Учеб. пособ. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 232 с.
7. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищ-во научн. изд. КМК, 2006. 509 с.
8. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
9. Добровольский В.В. Основы биогеохимии. М.: Высш. шк., 1998. 411 с.
10. Чернова О.В., Бекецкая О.В. Допустимые и фоновые концентрации загрязняющих веществ в экологическом нормировании (тяжелые металлы и другие химические элементы) // *Почвоведение*. 2011. № 9. С. 1102–1113.
11. Ильин В.Б., Сысо А.И. Микроэлементы и тяжелые металлы в почвах и растениях Новосибирской области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 229 с.
12. Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия / Под ред. Б.А. Ягодина. М.: Колос, 2002. 584 с.
13. Пейве Я.В. Биохимия почв. М.: Сельхозгиз, 1961. 422 с.
14. Зырин Н.Г. Узловые вопросы учения о микроэлементах в почвоведении: Докл. на соиск. уч. степени д-ра биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 1968. 39 с.
15. Клебанович Н.В. Влияние кислотности дерново-подзолистых почв Беларуси на содержание подвижных форм микроэлементов // *Вестн Акад. Аграр. Навук Беларусі*. 1998. № 3. С. 37–40.
16. Кузнецов Н.К. Микроэлементы в почвах Удмуртии. Ижевск: Изд-во Удмурт.ГУ, 1994. 285 с.
17. Шихова Л.Н., Егошина Т.Л. Тяжелые металлы в почвах и растениях таежной зоны Северо-Востока Европейской России. Киров: НИИСХ Северо-Востока, 2004. 264 с.
18. Ковда В.А. Биогеохимия почвенного покрова. М.: Наука, 1985. 263 с.
19. Ермолаев С.А., Сычев В.Г., Плющиков В.Г. Агрохимическое и агроэкологическое состояние почв России // *Плодородие*. 2001. № 1. С. 4–9.
20. Власюк П.А., Жидков В.А., Ивченко В.И. Микроэлементы в обмене веществ растений / Под ред. П.А. Власюка. Киев: Наукова думка, 1976. 208 с.
21. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. (утв. Главным управлением ветеринарии Госагропрома СССР 7 августа 1987 г.).
22. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. Избр. тр. М., 1980. 430 с.

Dynamics of the Content and Distribution of Trace Elements in Sod-Podzolic Soils and Plants of Agrocenoses

A. A. Utkin^{a, #}, N. I. Akanova^b, and I. B. Noda^c

^a*Russian State Agrarian University—K.A. Timiryazev Moscow Agricultural Academy,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow, 127434 Russia*

^b*The All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia*

^c*Agrochemical service station "Ivanovskaya"
Tsentrlnaya ul. 8, Ivanovo region, d. Bogorodskoye 153506, Russia*

[#]*E-mail: aleut@inbox.ru*

The paper presents the results of a survey of sod-podzolic soils for agricultural purposes and plants of reference sites of the Ivanovo region for the content of boron, copper, cobalt, manganese and zinc in them, conducted in 2014 and 2021. Correlation analysis determined the influence of individual physical and chemical properties of soils on the content and distribution of available forms of trace elements in the soil and the relationship between the trace elements themselves. Changes in the availability of trace elements of the soils of the plots have been established. According to the amount of content of available forms of trace elements in soils, the need for the use of micronutrients is determined. The sequences of crops were determined by the content of trace elements in grain and straw of cereals, the green mass of forage grasses, as well as the distribution of trace elements between parts of the grown crop. Grain, straw and green mass were evaluated for compliance with veterinary standards for the content of copper, zinc and cobalt in feed. The coefficients of accumulation of trace elements by plant products of crops are calculated and their comparative analysis is carried out. By the magnitude and sign of the correlation coefficients between the concentrations of trace elements in plants, the manifestation of antagonism and synergy between trace elements was determined. The Pearson and Spearman correlation coefficients between the content of mobile forms of trace elements in the soil and their content in plant products, as well as between the content of trace elements in grain and straw of cereals revealed their strength and the ambiguous nature of the relationships..

Key words: trace elements, sod-podzolic soil, plants, agrocenoses, reference sites, Ivanovo region.