

4.1.3. АГРОХИМИЯ, АГРОПОЧВОВЕДЕНИЕ, ЗАЩИТА И КАРАНТИН РАСТЕНИЙ (БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ)

Научная статья

УДК 546.56:546.711:628.381.1:631.445.24

DOI: 10.53914/issn2071-2243_2026_2_38

EDN: BRJFYX

Динамика накопления микроэлементов при однократном внесении удобрения на основе осадка сточных вод в системе «дерново-подзолистая почва – растение»

Анна Сергеевна Пинаева^{1✉}, Ирина Владимировна Ельшаева²

^{1, 2} Санкт-Петербургский государственный аграрный университет,
Пушкин-Санкт-Петербург, Россия

¹ pinaeva95@inbox.ru✉

Аннотация. Представлены результаты исследования, выполненного с целью оценки динамики накопления микроэлементов в системе «дерново-подзолистая почва – растение» при однократном внесении удобрения на основе осадка сточных вод муниципальных очистных сооружений. Объектами исследования выбраны бобово-злаковые (*Vicia sativa* × *Avena sativa* L.) и злаковые (*Lolium perenne* L.) травосмеси, а также компостированный осадок сточных вод (ОСВ). Схема опыта включала семь вариантов в трехкратной повторности: фоновые – контроль без удобрений и внесение полуперепревшего подстилочного навоза КРС и опытные варианты внесения компоста на основе ОСВ в дозах 20 и 40 т/га, в том числе в комплексе с полным минеральным удобрением (N₃₀P₃₀K₃₀). После внесения органических удобрений фактическое содержание меди и марганца в пахотном горизонте оставалось в пределах установленных нормативов (ПДК и ОДК). Максимальное содержание меди в почве отмечено в первый год исследования, в последующие годы оно постепенно снижалось. Высокие коэффициенты корреляции указывают на возможность адсорбции ионов меди органическим веществом почвы и pH, а также выносом этого элемента вико-овсяной смесью и райграсом в первый год вегетации. Максимальное содержание марганца, которое почти в 2,5 раза превышало его первоначальную концентрацию в почве, отмечено во второй год исследования. Установлено отсутствие статистически значимой зависимости продуктивности бобово-злакового и злакового агроценозов от содержания меди и марганца в почве, что свидетельствует о нелимитирующем характере данных микроэлементов в условиях проведенного эксперимента. Отмечено, что внесенные удобрения (в том числе на основе ОСВ) обеспечили микроэлементами растения, не оказав токсического действия. Анализ индексов накопления показал, что растения энергично и сильно извлекают из почвы и накапливают медь, в то время как марганец поглощается ими слабо, демонстрируя преимущественно средний уровень захвата. Рассчитанная биогеохимическая активность элементов изменялась в интервале от 7,81 до 47,6.

Ключевые слова: медь, марганец, динамика накопления, осадок сточных вод, дерново-подзолистая почва, подстилочный навоз, вико-овсяная смесь, райграс пастбищный

Для цитирования: Пинаева А.С., Ельшаева И.В. Динамика накопления микроэлементов при однократном внесении удобрения на основе осадка сточных вод в системе «дерново-подзолистая почва – растение» // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2026. Т. 19, № 2(89). С. 38–48. https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_38–48.

4.1.3. AGRICULTURAL CHEMISTRY, AGRONOMIC SOIL SCIENCE, PLANT PROTECTION AND QUARANTINE (BIOLOGICAL SCIENCES)

Dynamics of accumulation of microelements in response to single application of sewage sludge based fertilizer in “soddy-podzolic soil – plant” system

Anna S. Pinaeva^{1✉}, Irina V. Elshaeva²

^{1, 2} Saint Petersburg State Agrarian University, Pushkin – Saint Petersburg, Russia

¹ pinaeva95@inbox.ru✉

Abstract. The authors present the results of a study performed to assess the dynamics of accumulation of trace elements in “soddy-podzolic soil – plant” system in response to single application of a fertilizer based on sewage sludge from public purifying installation. The objects of the study were legume-grass (*Vicia sativa* × *Avena sativa* L.) and herbage (*Lolium perenne* L.) mixtures, as well as composted sewage sludge. The experimental scheme included seven three-fold variants: background control without fertilizers & semi-rotted farmyard cattle manure application, and experimental variants of composting at doses of 20 and 40 t/ha, including in combination with full mineral fertilizer (N₃₀P₃₀K₃₀). After applying organic fertilizers, the actual content of copper and manganese in the arable horizon remained within the established standards (MPC and APK). The maximum copper content in the soil was noted in the first year of the study, and it gradually decreased in subsequent years. High correlation coefficients indicate the possibility of copper ions adsorption by soil organic matter and pH, as well as the removal

of this element by vetch-oat mixture and ryegrass in the first year of vegetation. The maximum content of manganese was noted in the second year of the study, which was almost 2.5 times higher than its initial concentration in the soil. The absence of a statistically significant dependence of the productivity of legume-grass and herbage mixtures agrocenoses on the content of copper and manganese in the soil has been established, which indicates the non-limiting nature of these trace elements in the conditions of the experiment. It was noted that the fertilizers applied (including those based on sewage sludge) provided the plants with trace elements without having a toxic effect. Analysis of accumulation indices revealed that plants actively and intensively extract and accumulate copper from the soil, whereas manganese is weakly absorbed, exhibiting predominantly moderate biological capture. The calculated biogeochemical activity of the elements ranged from 7.81 to 47.6.

Keywords: copper, manganese, accumulation dynamics, sewage sludge, soddy-podzolic soil, farmyard manure, vetch-oat mixture, perennial ryegrass

For citation: Pinaeva A.S., Elshaeva I.V. Dynamics of accumulation of microelements in response to single application of sewage sludge based fertilizer in "soddy-podzolic soil – plant" system. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Vestnik of Voronezh State Agrarian University*. 2026;19(2):38-48. (In Russ.). https://doi.org/10.53914/issn2071-2243_2026_2_38-48.

Введение
Микроэлементы играют важную биохимическую и физиологическую роль в жизни всех растений, при этом как недостаток микроэлементов, так и их избыток неблагоприятны. Положительное влияние микроэлементов связано с тем, что они принимают участие в окислительно-восстановительных процессах, углеводном и азотном обменах, повышают устойчивость растений к болезням и неблагоприятным условиям внешней среды.

Основными для жизнедеятельности растений и других живых организмов являются марганец, медь, бор, цинк, молибден, никель, кобальт, ванадий, йод [1, 16].

Медь (Cu) участвует в регулировке процессов дыхания, углеводном и азотном обменах, улучшает развитие корневой системы, участвует в синтезе хлорофилла и лигнина, фотосинтеза, повышает устойчивость растений к болезням и негативным факторам окружающей среды. Марганец участвует в окислительно-восстановительных реакциях, поддерживает структуру хлоропластов, является необходимым компонентом синтеза витамина С, интенсифицирует накопление сахара в корнеплодах сахарной свеклы и белка у зерновых культур, активизирует ферменты [1, 14].

Эти два металла наиболее доступны для растений на кислых почвах ($\text{pH}_{\text{KCl}} \leq 5,5$). Кроме того, их доступность зависит от содержания органического вещества, а также от их высокой концентрации в пахотном слое почвы. Внесение меди и марганца с удобрениями может иметь долговременный эффект, а неоднократное внесение может привести к их накоплению до концентраций, токсичных для некоторых культур [12, 23].

Наиболее чувствительными к высокому содержанию Cu и Mn в почве, а также их недостатку, по мнению ряда авторов, являются зерновые, бобовые, плодовые деревья. Овощные культуры особо чувствительны к недостатку или избытку марганца [1, 11, 14].

Учитывая вышеизложенное, цель представленного исследования заключалась в оценке динамики накопления (миграции и аккумуляции) микроэлементов в системе «дерново-подзолистая почва – растение» в условиях однократного внесения удобрения на основе осадков сточных вод.

Объекты и методы

Исследования выполняли в 2021–2023 гг. на базе учебно-опытного сада ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет».

Опыт заложен на дерново-слабоподзолистой среднесуглинистой, сформированной на моренном суглинке, почве. Исходные агрохимические данные пахотного слоя характеризовались содержанием органического углерода 3,6%, слабокислой реакцией среды ($\text{pH}_{\text{KCL}} = 5,29$), высоким уровнем обеспеченности подвижным фосфором (339 мг $\text{P}_2\text{O}_5/\text{кг}$) и калием (440 мг $\text{K}_2\text{O}/\text{кг}$) [10]. До внесения удобрений фоновые концентрации исследуемых микроэлементов: Cu – 11,30–21,58 мг/кг, Mn – 194,02–327,22 мг/кг, что соответствует требованиям СанПиН 1.2.3685-21 [18].

Исучаемые культуры высевали на делянках площадью 5,06 м²: в первый год закладки опыта высевали вико-овсяную смесь (*Vicia sativa* × *Avena sativa* L.), а в последующие годы – райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.).

Схема опыта включала следующие варианты в трехкратной повторности:

- 1) без удобрений (контроль);
- 2) полуперепревший подстилочный навоз в дозе 20 т/га;
- 3) компост на основе осадка сточных вод в дозе 20 т/га;
- 4) полуперепревший подстилочный навоз в дозе 20 т/га + N₃₀P₃₀K₃₀;
- 5) компост на основе осадка сточных вод в дозе 20 т/га + N₃₀P₃₀K₃₀;
- 6) полуперепревший подстилочный навоз в дозе 40 т/га;
- 7) компост на основе осадка сточных вод в дозе 40 т/га [8, 20].

Применяемые органические удобрения – классический полуперепревший навоз КРС (подстилочный) и компост на основе осадка коммунальных сточных вод (компост ОСВ) [10].

Компост ОСВ соответствовал нормативам ГОСТ Р 54651-2011: конечная кислотность составляла рН 6,8, а концентрация потенциально опасных микроэлементов не превышала установленных гигиенических нормативов, таким образом исключался риск вторичного загрязнения пахотного горизонта почвенного профиля [7].

Концентрация изучаемых элементов в удобрениях составила:

- навоз – Cu = 15,56 ± 0,55 и Mn = 243,70 ± 23,0 мг/кг;
- компост на основе ОСВ – Cu = 12,29 ± 1,80 и Mn = 146,95 ± 24,80 мг/кг.

Минеральные удобрения в дозе N₃₀P₃₀K₃₀ вносили в следующем порядке:

- 2021 г. – при посеве аммиачная селитра, простой суперфосфат и калимагнезия;
- 2022 и 2023 гг. – азофоска в качестве подкормки [8, 20].

Уборку растительной массы проводили в разные для каждой культуры фазы:

- в 2021 г. – при восковой спелости зерна овса и цветении вики;
- в 2022 г. – в фазе кущения райграса;
- в 2023 г. – дважды (первый укос – при созревании зерна, второй укос – в фазе кущения) [10].

Лабораторный анализ включал определение агрохимических показателей почвы по действующим стандартам:

- органическое вещество – ГОСТ 26213-2021 [4];
- обменная кислотность – ГОСТ 26483-85 [5];
- подвижные формы фосфора и калия – ГОСТ Р 54650-2011 [6].

Количественное содержание Cu и Mn в растительных пробах и почве измеряли методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Подготовку проб растений осуществляли через мокрое озоление [3, 19]. Валовые формы в почвенных образцах извлекали 3-часовым кипячением в 5 М HNO₃ (по методике М-02-902-125-2005) [13], а подвижные – экстракцией ацетатно-аммонийным буферным раствором (рН 4,8) [17].

Статистическую обработку массива данных выполняли с применением дисперсионного и корреляционного анализа в программах MS Excel и Diana.

Результаты и их обсуждение

Содержание меди и марганца в почве после внесения удобрений не превышало ПДК/ОДК (табл. 1). Максимальное валовое содержание меди наблюдалось в год закладки опыта, что объясняется непосредственным поступлением элемента с удобрениями. Концентрация относительно исходного уровня повысилась в 1,4–1,8 раза, максимальное увеличение наблюдалось на варианте применения компоста ОСВ 20 т/га (21,8 мг/кг), а минимальные значения – при внесении полуперепревшего навоза с минеральными удобрениями (19,0 мг/кг). Во второй и третий годы исследования наблюдалось уменьшение концентрации меди: в 2022 г. – в 1,22–2,10 раза (контроль – 15,6 мг/кг; компост ОСВ 40 т/га – 9,5 мг/кг), в 2023 г. – в 1,05–1,4 раза, что может свидетельствовать о стабилиза-

ции пула меди в почвенном профиле. Вероятно, медь активно расходовалась бобово-злаковыми травами, а также наблюдалась возможная адсорбция форм Cu органическим веществом и pH [2, 16]. Коэффициент корреляции с pH_{KCL} в 2022 г. равнялся 0,63 (связь высокая положительная), в 2023 – 0,90 (связь очень высокая положительная). Корреляция с содержанием органического вещества в почве в 2022 г. была отрицательной (– 0,75, связь высокая отрицательная), в 2023 г. – 0,83 (связь очень высокая положительная). Коэффициент вариации валовых форм меди в почвах опытных делянок указывает на среднюю изменчивость признака.

Таблица 1. Вариационно-статистические показатели содержания валовых и подвижных форм меди и марганца в слое 0–25 см за 2021–2023 гг., мг/кг

Год	Медь (Cu)			Марганец (Mn)		
	M ± m	lim (min-max)	C _v , %	M ± m	lim (min-max)	C _v , %
5 M HNO₃						
2021	20,5 ± 3,5	19,0–21,8	17,0	314,2 ± 43,0	261,5–375,5	13,7
2022	13,5 ± 2,7	9,5–15,6	19,8	578,0 ± 126,5	330,0–720,4	21,9
2023	11,4 ± 1,4	8,9–13,1	12,3	341,6 ± 46,6	303,7–383,3	13,6
ААБ pH 4,8						
2021	0,35 ± 0,02	0,33–0,40	6,3	70,4 ± 9,2	53,3–80,5	13,1
2022	0,37 ± 0,05	0,25–0,40	14,0	55,1 ± 14,9	28,7–77,9	27,0
2023	0,33 ± 0,10	0,29–0,38	29,4	53,0 ± 13,6	33,8–68,9	25,7

Примечание: M – среднее арифметическое, m – стандартное отклонение.

В первый год после закладки опыта (2021 г.) среднее по вариантам содержание марганца увеличилось на 20% относительно исходного фона, что свидетельствует о непосредственном поступлении микроэлемента с удобрениями. При этом коэффициент вариации данных оставался умеренным (C_v = 13,7%), а диапазон концентраций составил 261,5–375,5 мг/кг. Максимальные значения отмечены на варианте внесения максимальной дозы компоста ОСВ (40 т/га), что объясняется суммарным эффектом внесения металла с удобрением и возможным усилением сорбционной емкости почвы за счет гумификации [23]. Минимальные концентрации отмечены на варианте внесения навоза КРС (20 т/га) в комплексе с минеральными удобрениями (N₃₀P₃₀K₃₀).

Во второй год концентрации валового марганца возросли в 1,5–2,5 раза относительно показателей 2021 г., достигнув значений 330,0–720,4 мг/кг. Такой прирост, особенно на варианте внесения навоза 20 т/га + N₃₀P₃₀K₃₀ (720,4 мг/кг), возможен в результате минерализации органического вещества, высвобождающего ранее иммобилизованные формы элемента, а также перераспределения марганца в профиле почвы [1, 23]. Коэффициент вариации в 2022 г. составлял 21,9%, что указывает на высокую неоднородность распределения металла по вариантам опыта, что подтверждает статистический анализ (HCP₀₅ = 52,9) различий между опытными вариантами и контролем.

К третьему году эксперимента концентрации марганца снизились в среднем в 1,7 раза по сравнению со значениями 2022 г. Значения уменьшились в интервале 303,7–383,3 мг/кг, а коэффициент вариации данных стал умеренным – 13,6%. Максимальные концентрации отмечены на варианте внесения навоза (20 т/га), тогда как минимальные – на контрольном варианте, что подчеркивает пролонгированное влияние органических удобрений на миграционный потенциал элемента. Коэффициент корреляции с агрохимическими показателями: валовое содержание Mn с подвижным P₂O₅ – 0,85 (связь очень высокая положительная), подвижная форма Mn с органическим веществом почвы и степенью насыщенности основаниями – соответственно 0,83 и 0,80 [9, 15].

В среднем за годы исследования доля подвижных форм элементов в почве составила: для меди – 2,47%; для марганца – 16,17% (рис. 1). Таким образом, за три года исследования подвижность микроэлементов снижалась в ряду $Mn > Cu$, что указывает на различия в их почвенно-химическом поведении.

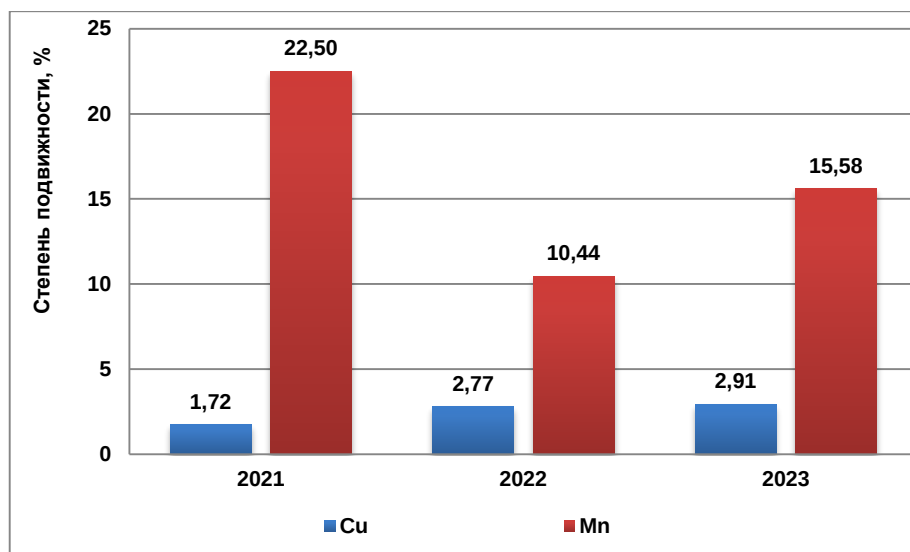


Рис. 1. Степень подвижности меди и марганца в почве

Содержание меди в фитомассе бобово-злаковых и злаковых трав варьировало в зависимости от года исследования, не достигая при этом пороговых значений токсичности для кормовых культур (30 мг/кг согласно ветеринарно-санитарным требованиям) (табл. 2). Максимальная аккумуляция элемента отмечена в первый год опыта на варианте применения компоста ОСВ (20 т/га) – 20,8 мг/кг в воздушно-сухой массе вико-овсяной смеси. Во второй год вегетации райграс пастбищный проявил повышенную способность к усвоению Cu, что может быть интерпретировано как результат синергетического действия двух факторов: доступности элемента в почве и онтогенетических изменений в метаболизме многолетних злаков, переходящих от фазы укоренения к интенсивному наращиванию надземной биомассы [12, 14].

Марганец в первый год накапливался вико-овсяной смесью без достоверных различий. Райграс пастбищный максимально накапливал микроэлемент во второй год вегетации в первый укос. Максимальная концентрация Mn отмечена на варианте применения навоза в дозе 40 т/га – 89,0 мг/кг. Максимально-допустимый уровень (МДУ) меди в грубых и сочных кормах составляет 30 мг/кг корма, в то время как содержание Mn не нормируется [1, 21, 22]. Оптимальное содержание Mn варьирует в широких пределах и напрямую зависит от вида животного, его возраста, физиологического состояния и уровня продуктивности.

Таблица 2. Вариационно-статистические показатели содержания меди и марганца в растениях вико-овсяной смеси и райграса пастбищного за 2021–2023 гг., мг/кг

Год	Cu			Mn		
	$M \pm m$	lim (min-max)	$C_v, \%$	$M \pm m$	lim (min-max)	$C_v, \%$
2021	$16,6 \pm 3,4$	10,0–20,8	20,8	$25,1 \pm 0,5$	23,9–25,9	1,8
2022	$12,6 \pm 1,6$	8,5–15,1	12,5	$38,9 \pm 4,9$	30,8–44,8	12,5
2023 (1-й укос)	$2,2 \pm 0,8$	0,6–3,6	36,8	$60,4 \pm 14,4$	42,9–89,3	23,8
2023 (2-й укос)	$2,3 \pm 0,5$	1,2–3,0	23,4	$44,8 \pm 12,1$	21,4–66,8	27,0

Степень миграции микроэлементов по цепи «почва – растение» характеризовали с использованием системы геохимических коэффициентов, включающей коэффициент накопления (КН) и индекс аккумуляции (I_A) [2, 15]. Первый показатель отражает способность культур к усвоению валового запаса элемента в пахотном слое, второй – характеризует интенсивность поглощения лабильных форм металла, находящихся в биодоступном состоянии. Математически оба коэффициента представляют собой отношение концентрации микроэлемента в растительной массе (мг/кг воздушно-сухой массы) к его содержанию в почве (мг/кг), при этом для КН используют валовую форму, а для I_A – подвижную форму, извлекаемую ААБ (рН 4,8).

Анализ коэффициентов накопления (КН) позволил оценить интенсивность поглощения исследуемых микроэлементов надземной массой культур. Для марганца (рис. 2) значения КН на протяжении всего периода исследований не превышали 0,26, что, согласно классификации А.И. Перельмана [15], соответствует категории низкого накопления ($КН < 0,1-0,3$). Такая слабая аккумуляция Мп растениями свидетельствует о наличии эффективных барьерных механизмов, ограничивающих транслокацию элемента из корневой системы в вегетативные органы, либо о преимущественной фиксации металла в ризосфере в труднорастворимых формах [15].

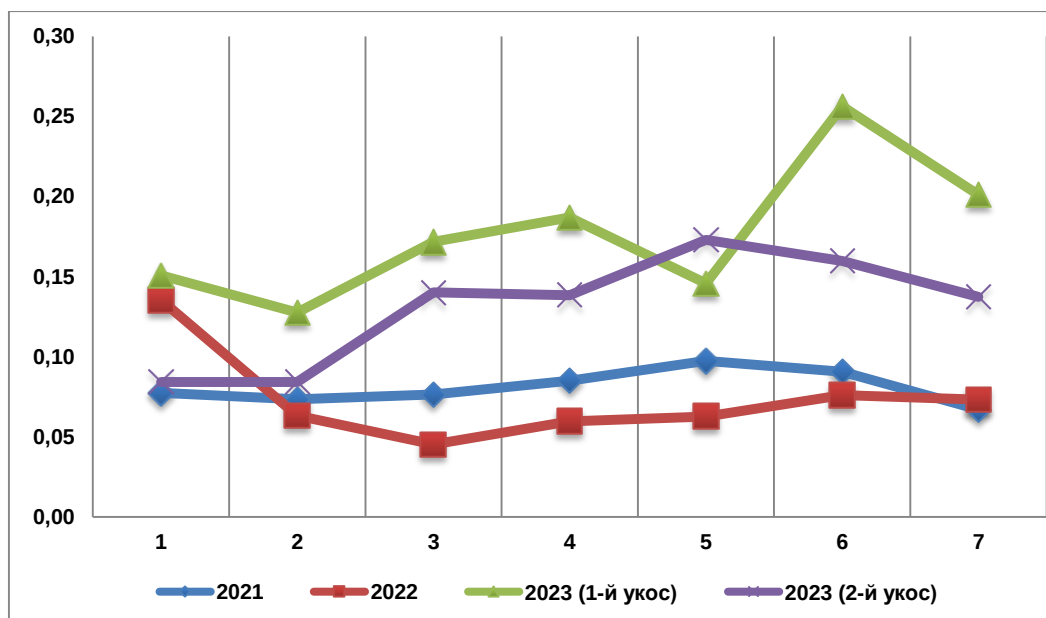


Рис. 2. Коэффициенты накопления марганца растениями

В отличие от марганца, медь демонстрировала существенно более высокую способность к аккумуляции (рис. 3).

В первый год вегетации (2021 г.) для вико-овсяной смеси КН приближался к единице (0,59–0,98), что характеризует средний уровень накопления ($0,3 < КН < 1,0$) и указывает на активное усвоение элемента бобово-злаковым агроценозом. Особенно интенсивное поглощение меди отмечено у райграса пастбищного в фазе кушения (второй год вегетации, 2022 г.), когда коэффициенты достигали 0,82–0,98, приближаясь к порогу сильного накопления. Это объясняется высокой физиологической потребностью многолетних злаков в меди в период активного формирования вегетативной массы и синтеза ферментных систем [1].

К третьему году эксперимента (2023 г.) коэффициенты накопления меди при учете обоих укосов райграса снизились до 0,06–0,36, что свидетельствует о переходе к низкому уровню аккумуляции. Вероятно, это связано с усилением конкурентного взаи-

модействия с другими катионами (Zn^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), а также с изменением физиологической активности растений в разные фазы онтогенеза (спелость зерна в первом укосе, кущение во втором укосе) [1, 12, 14].

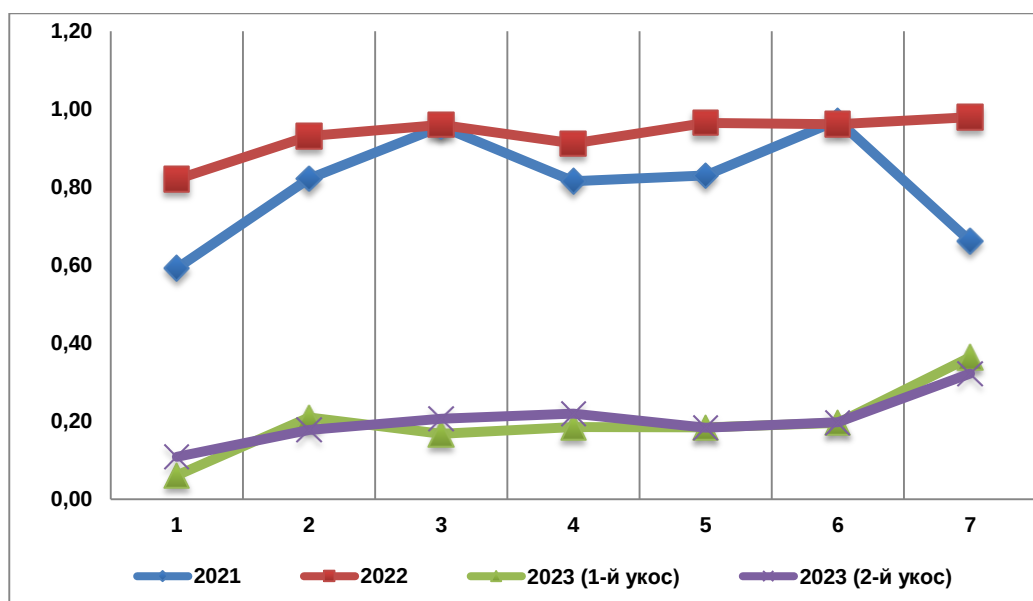


Рис. 3. Коэффициенты накопления меди растениями

Показатель I_A отражает интенсивность поглощения микроэлементов, формирующаяся под влиянием физиолого-биохимических и почвенно-геохимических факторов [15, 21]. Анализ полученных значений продемонстрировал, что в первый год вегетации вико-овсяная смесь и райграс являются аккумуляторами меди энергичного типа ($I_A > 10$).

На второй год вегетации райграса пастбищного интенсивность усвоения микроэлемента снижалась, что позволяет квалифицировать медь как элемент сильного накопления $10 > I_A > 1$ (рис. 4) [21].

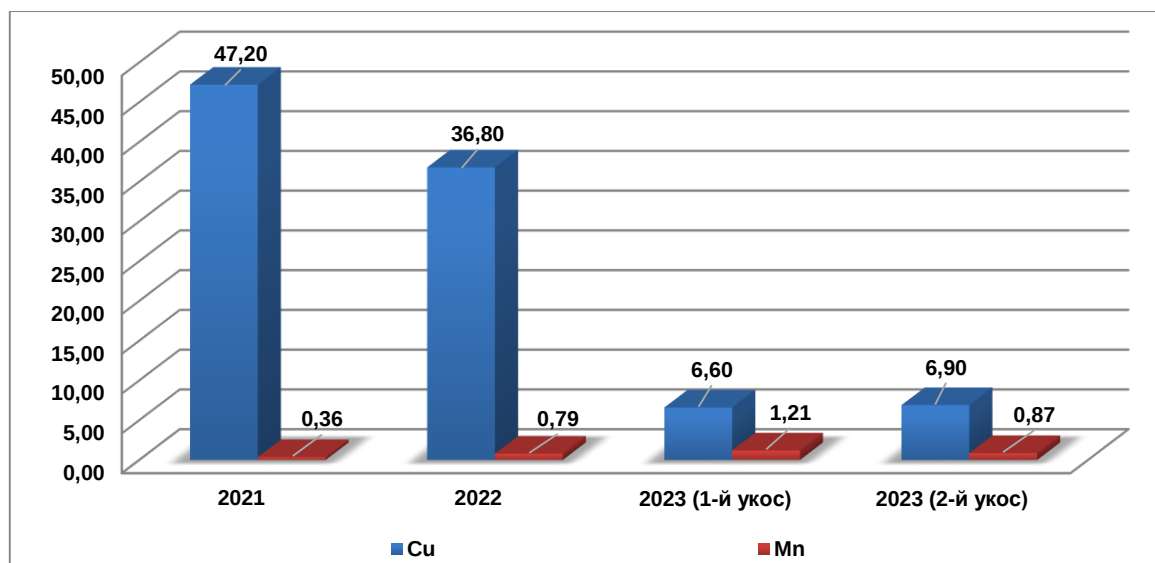


Рис. 4. Индекс аккумуляции меди и марганца растениями за 2021–2023 гг.

Марганец, наоборот, является элементом среднего захвата ($1 > I_A > 0,1$) в первый, второй и во второй укос третьего года эксперимента. На третий год вегетации

сильный захват марганца ($10 > I_A > 1$) райграсом пастбищным зафиксирован в растениях первого укоса, что также показывает и коэффициент накопления. По-видимому, это связано с потребностью в микроэлементе в фазе спелости зерна райграса.

Биогеохимическая активность (БХА) – суммарная величина индекса аккумуляции, которая отображает общую способность миграции микроэлементов в растения. БХА изменяется от 7,81 до 47,56. Максимальные значения БХА отмечены в 2021 и 2022 гг., что и доказывают коэффициенты накопления и индекс аккумуляции.

В первый год вегетации все варианты с внесением удобрений, в том числе содержащие компост ОСВ, продемонстрировали статистически значимое повышение продуктивности травостоя по сравнению с контрольным вариантом (рис. 5).

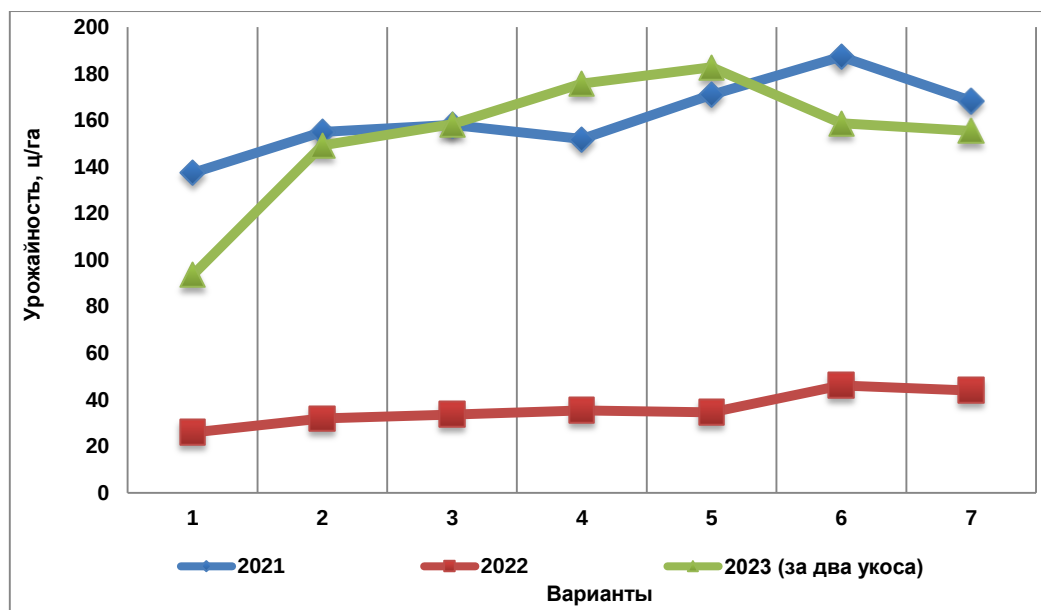


Рис. 5. Урожайность бобово-злаковых и злаковых трав зеленой массы, ц/га: 2021 г. – НСР₀₅ = 20,6; 2022 г. – НСР₀₅ = 16,3; 2023 г. (за два укоса) – НСР₀₅ = 37,0

Применение органических удобрений в дозе 20 т/га стимулировало прирост фитомассы, однако статистически достоверная прибавка урожайности вико-овсяной смеси зафиксирована при добавлении минеральных удобрений в комбинации с компостом ОСВ. Двойная доза органических удобрений существенно увеличила продуктивность: максимальный выход зеленой массы отмечен при внесении навоза в повышенной дозе (+ 38,08% к контролю).

Урожайность райграса пастбищного в 2022 г. характерна для его продуктивности в первый год вегетации, что обусловлено развитием корневой системы и узла кущения растений. Однако отмечены различия между вариантами, что и подтверждает дисперсионный анализ: максимальная продуктивность получена на вариантах внесения органических удобрений в дозе 40 т/га – прибавка 69,23–77,30% к контролю. На второй год вегетации наблюдалась достоверная разница суммарной урожайности за два укоса, которая зависела от фона удобрений: на вариантах применения органических удобрений в комплексе с минеральными урожайность повысилась до 87,9–95,4%, тогда как на варианте применения только органических – до 59,5–69,6% [10].

Корреляционный анализ не выявил зависимости между урожайностью бобово-злаковых, злаковых трав и содержанием меди и марганца в почве: урожайность не зависела от валового и подвижного содержания микроэлементов (связь слабая/умеренная).

Выводы

1. Однократное внесение компоста на основе осадка сточных вод (ОСВ) в дозах 20 и 40 т/га как в чистом виде, так и в сочетании с минеральными удобрениями ($N_{30}P_{30}K_{30}$) обеспечило поступление меди и марганца в пахотный горизонт на уровне, сопоставимом с применением полуперепревшего подстильного навоза КРС в аналогичных дозах.

Значения концентрации микроэлементов в почве и растениях не превышали гигиенических нормативов (ПДК/ОДК и МДУ), обеспечивая поступление меди и марганца в пахотный горизонт в пределах физиологической нормы, не вызывая токсического угнетения растений.

2. Биогеохимическая оценка интенсивности поглощения элементов продемонстрировала видоспецифичность аккумуляции:

- медь классифицирована как элемент энергичного накопления ($I_A > 10$) в первый год вегетации и сильного захвата ($10 > I_A > 1$) на второй год;

- марганец преимущественно относится к элементам среднего захвата ($1 > I_A > 0,1$; среднее $I_A = 0,67$), за исключением первого укоса райграса второго года вегетации, где зафиксировано сильное накопление, вероятно, обусловленное повышенной физиологической потребностью культуры в фазе генеративного развития.

Рассчитанные значения биогеохимической активности ($BXA = 7,81-47,56$) подтверждают максимальную интенсивность миграции микроэлементов по цепи «почва – растение» в 2021–2022 гг., что согласуется с данными по коэффициентам накопления и индексам аккумуляции.

3. Установлено отсутствие статистически значимой зависимости продуктивности бобово-злакового и злакового агроценозов от содержания меди и марганца в почве, что свидетельствует о нелимитирующем характере данных микроэлементов в условиях проведенного эксперимента.

Список источников

1. Битюцкий Н.П. Необходимые микроэлементы растений: учебник для студентов биологических специальностей. Санкт-Петербург: Изд-во ДЕАН, 2005. 255 с.
2. Бускунова Г.Г., Ягафарова Г.А. Тяжелые металлы в системе «почва – дикорастущее лекарственное растение» (на примере *Cichorium intybus* L.) // Самарский научный вестник. 2022. Т. 11, № 1. С. 36–42. DOI: 10.55355/snv2022111103.
3. Воскресенская О.Л., Алябышева Е.А., Половникова М.Г. Большой практикум по биоэкологии: учебное пособие. Йошкар-Ола: Изд-во Марийского государственного университета, 2006. 107 с.
4. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2022. 12 с.
5. ГОСТ 26483-85. Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение ее pH по методу ЦИНАО. Москва: Издательство стандартов, 1985. 4 с.
6. ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО. Москва: Стандартинформ, 2013. 12 с.
7. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2012. 11 с.

8. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований): учебное пособие. 5-е изд., доп. и перераб. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
9. Ельчиногова О.А., Пузанов А.В., Рождественская Т.А. и др. Микроэлементы в межгорно-котловинных агроландшафтах Горного Алтая // Агрохимия. 2021. № 6. С. 16–27. DOI: 10.31857/S0002188121060041.
10. Ельшаева И.В., Титова В.И., Пинаева А.С. Влияние осадка сточных вод на агрохимическую характеристику дерново-подзолистой почвы и урожайность трав // Плодородие. 2024. № 1(136). С. 71–74. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.18.
11. Ефимов В.Н., Донских И.Н., Царенко В.П. Система удобрения: учебник для студентов высших учебных заведений по агрономическим специальностям. Москва: КолосС, 2002. 319 с.
12. Ильин В.Б. Тяжелые металлы и неметаллы в системе почва – растение: монография. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 2012. 220 с.
13. М-02-902-125-2005. Методика количественного химического анализа. Определение As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn (кислоторастворимые формы) в почвах и донных отложениях атомно-абсорбционным методом. Санкт-Петербург, 2005. 32 с.
14. Медведев С.С. Физиология растений: учебник. Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского государственного университета, 2004. 336 с.
15. Перельман А.И. Очерки геохимии ландшафта. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Издательская группа URSS, 2021. 400 с.
16. Пинаева А.С. Накопление никеля вико-овсяной смесью и райграсом пастбищным из дерново-подзолистой почвы в условиях многолетнего опыта с осадками сточных вод // Агрохимический вестник. 2025. № 3. С. 96–100. DOI: 10.24412/1029-2551-2025-3-018.
17. Руководящий документ РД 52.18.289-90. Методические указания. Методика выполнения измерений массовой доли подвижных форм металлов (меди, цинка, никеля, кадмия кобальта, хрома, марганца) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. Обнинск: НПО «Тайфун», 1990. 36 с.
18. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: санитарные правила и нормы: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 24.12.2020 № 53. Москва, 2020. 645 с.
19. Титова В.И., Дабахова Е.В., Дабахов М.В. Агро- и биохимические методы исследования состояния экосистем: учебное пособие для вузов. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2011. 170 с.
20. Царенко В.П., Воробейков Г.А., Ефремова М.А. Полевые и вегетационные исследования по агрохимии и физиологии. Санкт-Петербург: Лань, 2023. 192 с.
21. Цыгвинцев П.Н., Гончарова Л.И., Манин К.В. и др. Определение оптимального содержания меди в почвах разного типа на основании динамической модели ее накопления в надземной биомассе и корнях растений (на примере ячменя *Hordeum vulgare* L.) // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. С. 570–577. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.3.570rus.
22. Hansch R., Mendel R.R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl) // Current Opinion in Plant Biology. 2009. Vol. 12(3). Pp. 259–266. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.006.
23. Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants. 4th edition, revised. USA, Boca Raton, Florida: CRC Press Inc., 2011. 534 p.

References

1. Bityutsky N.P. Essential microelements for plants: textbook for students of biological specialties. Saint Petersburg: DEAN Publishing House; 2005. 255 p. (In Russ.).
2. Buskunova G.G., Yagafarova G.A. Heavy metals in the system “soil – wild medicinal plant” (on the example of *Cichorium intybus* L.). *Samara Journal of Science*. 2022;11(1):36-42. DOI: 10.55355/snv202222111103. (In Russ.).
3. Voskresenskaya O.L., Alyabyisheva E.A., Polovnikova M.G. Great Workshop on Bioecology: study guide. Yoshkar-Ola: Mari State University Publishers; 2006. 107 p. (In Russ.).
4. GOST 26213-2021. Soils. Methods for determination of organic matter. Moscow: Russian Institute for Standardization Publishers; 2022. 12 p. (In Russ.).
5. GOST 26483-85. Soils. Preparation of salt extract and determination of its pH by CINA method. Moscow: State Committee for Standardization Publishers; 1985. 4 p. (In Russ.).
6. GOST R 54650-2011. Soils. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Kirsanov method in modified by CINA. Moscow: Standardinform Publishers; 2013. 12 p. (In Russ.).
7. GOST R 54651-2011. Organic fertilizers on basis ou sewage sludge. Specifications. Moscow: Standardinform Publishers; 2012. 11 p. (In Russ.).
8. Dospikhov B.A. Field-plot Technique (with the Basics of Statistical Processing of Results of Research and Experiments): study guide. 5th edition, revised and enlarged. Moscow: Agropromizdat Publishers; 1985. 351p. (In Russ.).

9. Elchinina O.A., Puzanov A.V., Rozhdestvenskaya T.A. et al. Microelements in agrolandscapes of Altai Intermountain Basins. *Agricultural Chemistry*. 2021;6:16-27. DOI: 10.31857/S0002188121060041. (In Russ.).
10. Elshaeva I.V., Titova V.I., Pinaeva A.S. Influence of sewage sludge on agrochemical parameters of soddy-podzolic soil and grass productivity. *Plodorodie*. 2024;1(136):71-74. DOI: 10.25680/S19948603.2024.136.18. (In Russ.).
11. Efimov V.N., Donskikh I.N., Tsarenko V.P. Fertilizer system: textbook for students of higher educational institutions in agronomic specialties. Moscow: KolosS Publishers; 2002. 319 p. (In Russ.).
12. Ilyin V.B. Heavy metals and non-metals in the system "soil – plant": monograph. Novosibirsk: Nauka Publishers (Siberian Department); 2012. 220 p. (In Russ.).
13. M-02-902-125-2005. A methodology for quantitative chemical analysis. Determination of As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn (acid-soluble forms) in soils and bottom deposits by atomic absorption method. St. Petersburg; 2005. 32 p. (In Russ.).
14. Medvedev S.S. Plant physiology: textbook. St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University; 2004. 336 p. (In Russ.).
15. Perelman A.I. Essays on Landscape Geochemistry. 2nd edition, revised and enlarged. Moscow: URSS Publishing Group; 2021. 400 p. (In Russ.).
16. Pinaeva A.S. Nickel accumulation by vetch-oat mixture and pasture ryegrass from soddy-podzolic soil under conditions of long-term experiment with sewage sludge. *Agrochemical Herald*. 2025;3:96-100. DOI: 10.24412/1029-2551-2025-3-018. (In Russ.).
17. Guidance document RD 52.18.289-90. Methodological guidelines. A methodology for measuring the mass fraction of mobile forms of metals (copper, zinc, nickel, cadmium, cobalt, chromium, manganese) in soil samples by atomic absorption analysis. Obninsk: Research & Production Association Tayfun Publishers; 1990. 36 p. (In Russ.).
18. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans: sanitary rules and regulations: approved by Resolution No. 53 of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 24.12.2020. Moscow, 2020. 645 p. (In Russ.).
19. Titova V.I., Dabakhova E.V., Dabakhov M.V. Agro- and biochemical methods for studying the state of ecosystems: textbook for universities. Nizhny Novgorod: Volga Vyatka Academy of Public Administration Publishers; 2011. 170 p. (In Russ.).
20. Tsarenko V.P., Vorobeikov G.A., Efremova M.A. Field and vegetation research on agrochemistry and phytophysiology. St. Petersburg: Lan' Publishers; 2023. 192 p. (In Russ.).
21. Tsygvintsev P.N., Goncharova L.I., Manin K.V. et al. Estimation of the optimal Cu content in different soil types based of the dynamic model for copper accumulation in above ground parts and roots (on the example of barley *Hordeum vulgare* L. plants). *Agricultural Biology*. 2018;53:570-577. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.3.570rus. (In Russ.).
22. Hansch R., Mendel R.R. Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Current Opinion in Plant Biology*. 2009;3(12):259-266. DOI: 10.1016/j.pbi.2009.05.006.
23. Kabata-Pendias A. Trace elements in soil and plants. 4th edition, revised. USA, Boca Raton, Florida: CRC Press Inc.; 2011. 534 p.

Сведения об авторах

А.С. Пинаева – соискатель кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой, научный сотрудник лаборатории экологического контроля объектов окружающей среды ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», pinaeva95@inbox.ru.

И.В. Ельшаева – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры почвоведения и агрохимии им. Л.Н. Александровой ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный аграрный университет», elshaevaiv@mail.ru.

Information about the authors

A.S. Pinaeva, Degree Candidate, the Dept. of Soil Science and Agrochemistry named after L.N. Aleksandrova, Research Scientist, Laboratory of Ecological Control of Environmental Objects, Saint Petersburg State Agrarian University, pinaeva95@inbox.ru.

I.V. Elshaeva, Candidate of Agricultural Sciences, Docent, the Dept. of Soil Science and Agrochemistry named after L.N. Aleksandrova, Saint Petersburg State Agrarian University, elshaevaiv@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 20.03.2026; принята к публикации 27.03.2026.

The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 20.03.2026; accepted for publication 27.03.2026.

© Пинаева А.С., Ельшаева И.В., 2026