

УДК 631.416.8:631.82:633.2./3.031

**ДЕЙСТВИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ
УДОБРЕНИЙ НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА
ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ СЕНОКОСА**

В.А. Чуйков, кандидат сельскохозяйственных наук
Д.М. Тебердиев, доктор сельскохозяйственных наук
А.В. Родионова, кандидат сельскохозяйственных наук
С.А. Запывалов, научный сотрудник

*ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса»
141055, Россия, Московская область, г. Лобня, ул. Научный городок, корп. 1
vik_lugovod@bk.ru*

**EFFECT OF LONG-TERM USE OF MINERAL FERTILIZERS
FOR AGROCHEMICAL PROPERTIES
SOD-PODZOLIC SOIL OF HAYFIELD**

V.A. Chuykov, Candidate of Agricultural Sciences
D.M. Teberdiev, Doctor of Agricultural Sciences
A.V. Rodionova, Candidate of Agricultural Sciences
S.A. Zapivalov, Researcher

*Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology
141055, Russia, Moscow region, Lobnya, Nauchnyi gorodok str., k. 1
vik_lugovod@bk.ru*

DOI: <https://doi.org/10.33814/AFP-2222-5366-2021-3-49-59>

Влияние длительного применения минеральных удобрений на накопление тяжелых металлов в различных по составу почвах — актуальная проблема в Нечерноземной зоне России. Основной задачей исследований, проводившихся в ФНЦ «ВИК им. В.Р. Вильямса», являлось определение влияния длительного использования минеральных удобрений на агрохимические показатели почвы и накопление тяжелых металлов. Систематическое применение минеральных удобрений на дерново-подзолистой суглинистой почве сенокоса в течение 74 лет не оказало отрицательного влияния на ее агрохимические показатели. Напротив, возросло содержание органического вещества на 30–40% по вариантам опыта. Снизилась кислотность почвы с pH 4,3 до 4,5–5,3. Показано действие минеральных удобрений на содержание в почве подвижных форм меди, цинка, кадмия, свинца и их накопление в растениях. Анализ почвы по слоям показал, что в слое 0–10 см сконцентрировано на 15–20% больше гумуса, подвижных макроэлементов, микроэлементов — меди, цинка. Содержание токсичных элементов (кадмия, свинца) характеризовалось равномерностью их распределения по горизонту 0–20 см. Приведен годовой балансовый расчет использования растениями микроэлементов, поступивших с минеральными удобрениями. Полученные результаты показали, что кормовые травы в процессе вегетации полностью использовали внесенные с мине-

ральными удобрениями медь, цинк, кадмий, свинец и дополнительно потребили из почвы: 68 г/га меди, 268 цинка, 0,2 кадмия, 3 г/га свинца.

Ключевые слова: сенокос, минеральные удобрения, длительное действие, микроэлементы, токсичные элементы, экологическая безопасность.

The effect of long-term use of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals in soils of various compositions is an urgent problem in the Non-Chernozem zone of Russia. The main objective of the research conducted at the Federal Williams Research Center of Forage Production and Agroecology was to determine the effect of long-term use of mineral fertilizers on agrochemical soil parameters and accumulation of heavy metals. Systematic application of mineral fertilizers on the sod-podzolic loamy soil of hayfield for 74 years has not had a negative impact on its agrochemical indicators. On the contrary, the organic matter content increased by 30–40% according to the experimental variants. The acidity of the soil decreased from a pH of 4.3 to 4.5–5.3. The effect of mineral fertilizers on the content of mobile forms of copper, zinc, cadmium, lead in the soil and their accumulation in plants is shown. Analysis of the soil by layers showed that 15–20% more humus, mobile macroelements, microelements – copper, zinc are concentrated in the 0–10 cm layer. The content of toxic elements – cadmium and lead – was characterized by their uniform distribution over the 0–20 cm horizon. An annual balance calculation of the use of microelements supplied with mineral fertilizers to plants is presented. The obtained results showed that the forage grasses during the growing season fully used the copper, zinc, cadmium, lead introduced with mineral fertilizers and additionally consumed from the soil: copper – 68, zinc – 268, cadmium – 0.2, lead – 3 g/ha.

Keywords: hayfield, mineral fertilizers, long-term effect, microelements, toxic elements, environmental safety.

Введение. Производство сельскохозяйственной продукции неразрывно связано с использованием минеральных и органических удобрений, извести и других мелиорантов. При внесении их в почву, они наряду с основным назначением – пополнением недостающих элементов в почве – могут при длительном применении оказать влияние на реакцию почвенной среды, подвижность макро- и микроэлементов. Азотные удобрения способствуют увеличению подвижности цинка, кадмия, не оказывают влияние на состояние меди, но уменьшают доступность свинца. Под действием извести и органических удобрений снижается подвижность многих микроэлементов и тяжелых металлов. Действие фосфорных удобрений на потребление растениями тяжелых металлов проявляется в образовании с ними труднорастворимых со-

единений. Калийные удобрения являются химически нейтральными, но при длительном применении вызывают подкисление почвы [1; 2; 3].

Кроме этого, многие исследователи отмечают в составе минеральных удобрений и извести присутствие тяжелых металлов и токсичных элементов и возможное их накопление в почве при использовании удобрений. Их количество в удобрениях, особенно в фосфорных, определяется, в основном, составом используемого сырья [4] и технологией переработки [5].

В работах [6; 7; 8] приведены данные, характеризующие содержание примесей тяжелых металлов в минеральных удобрениях. Азотные удобрения (аммиачная селитра, мочевины, сульфат аммония) содержат в среднем: цинка — 0,5–50 мг/кг, меди — 1,5–15,

кадмия — 0,25, свинца — 1,3 мг/кг. Более высокое содержание примесей металлов определено в фосфорных удобрениях: цинк до 3000 мг/кг, медь до 1000, кадмий — 170, свинец — 92 мг/кг. Калийные удобрения и известь по содержанию тяжелых металлов занимают промежуточное положение между азотными и фосфорными удобрениями. Концентрация тяжелых металлов в органических удобрениях определяется их зольностью и колеблется в пределах: медь — 22 мг/кг, цинк — 566, свинец — 27, кадмий — 0,4 мг/кг сухого вещества.

Анализируя имеющиеся литературные источники, можно отметить, что наибольшее количество примеси тяжелых металлов содержат фосфорные удобрения, в которых основную опасность представляет высокотоксичный элемент кадмий.

Результаты исследований по действию минеральных удобрений и их влиянию на накопление в почвах тяжелых металлов получены, в основном, в непродолжительных опытах с полевыми культурами в системе севооборота. Для более полной оценки их действия с выявлением степени антропогенной нагрузки исследования должны быть проведены в длительных стационарных опытах.

Материалы и методы исследований. В ФНЦ «ВИК им В.Р. Вильямса» действие длительного использования минеральных удобрений на агрохимические показатели почвы, содержание тяжелых металлов и качество растительной продукции изучали в опыте, заложенном в 1946 г. и предназначенном для изучения влияния удобрений на продуктивность сенокоса. Для исследований взяты незаменимые для жизни растений

микроэлементы — медь, цинк, а также высокотоксичные элементы — свинец и кадмий. Определение их в почве и растениях проводится на атомно-абсорбционном спектрофотометре NOVAA 300 с дейтериевым корректором фона, с использованием горючей смеси воздух—ацетилен. Подвижные кислоторастворимые формы тяжелых металлов определяли в вытяжке 1н. HCl при соотношении почвы к раствору 1 : 10 и взбалтывании на ротаторе в течение одного часа.

Почва участка дерново-подзолистая среднесуглинистая, при закладке опыта характеризовалась как сильнокислая (рН 4,3) с низким содержанием гумуса (2,03%), среднеобеспеченная фосфором (50 мг/кг) и калием (70 мг/кг). Травостой создан посевом травосмеси: клевер красный, клевер ползучий, тимофеевка луговая, овсяница луговая, лисохвост луговой, кострец безостый, мятлик луговой.

В опыте фосфорные и калийные удобрения вносили с 1946 г. по 1977 г. в дозе $P_{30}K_{30}$, а с 1977 г. по настоящее время дозы увеличены до $P_{45}K_{90}$ д.в. в связи с низким содержанием этих элементов в почве. Всего за годы проведения опыта по варианту с полным минеральным удобрением $N_{120}P_{45}K_{90}$ в почву внесено (д.в.) 2685 кг/га фосфора, 3780 кг/га калия, 9340 кг/га азота.

Расчеты данных по содержанию тяжелых металлов в отечественных удобрениях [9], представленные в таблице 1, показали, что за весь период проведения исследований в почву сенокоса с минеральными удобрениями дополнительно внесено веществ: 64 г/га меди, цинка — 154, кадмия — 85, свинца — 174 г/га, из которых с азотными удобрениями: ме-

ди — 7,5, цинка — 56, кадмия — 2, свинца — 12 г/га; с фосфорными удобрениями: меди — 39, цинка — 52, кадмия — 9,

свинца — 114 г/га; с калийными удобрениями: меди — 17, цинка — 46, кадмия — 16, свинца — 47 г/га.

1. Содержание тяжелых металлов в удобрениях и мелиорантах

Вариант опыта	Содержание, мг/кг						
	Mn	Zn	Cu	Pb	Cd	Ni	Fe
Мочевина, аммиачная селитра	2	6,0	0,8	1,3	0,25	7,5	25
Суперфосфат простой гранулированный	210	19,3	14,3	42,5	3,50	24,8	1650
Хлористый калий	15	12,3	4,5	12,5	4,25	19,3	403
Навоз (зольность 19,5%)	276	121,7	19,8	3,3	0,20	6,5	406
Известь	295	21,0	5,8	37,5	5,50	30,0	1035

Результаты исследований и их обсуждение. На основании полученных результатов исследования установлено, что при использовании минеральных удобрений дополнительно в почву поступают микроэлементы и токсичные элементы. Определено их количество. Также представляется важным изучение ежегодного их накопления в почве, потребляют их растения полностью или частично.

Проведенные нами с этой целью балансовые расчеты по варианту $N_{120}P_{45}K_{90}$ за 2020 г. показали, что с минеральными удобрениями поступило: 1,0 г/га меди, 3,0 г/га цинка, 0,6 г/га кадмия, 3 г/га свинца и вынесено с урожаем 87 ц/га: 68 г/га меди, 268 г/га цинка, 0,8 г/га кадмия, 6 г/га свинца. То есть растения сенокоса полностью использовали годовое поступление меди, цинка, кадмия, свинца и дополнительно вынесли из почвы: 67 г/га меди, 265 г/га цинка, 0,2 г/га кадмия, 3 г/га свинца. Следовательно, длительное использование оптимальных доз минеральных удобрений не приводит к накоплению в почве сенокоса тяжелых металлов и токсичных эле-

ментов. Положительное влияние минеральные удобрения оказали и на другие свойства почвы (табл. 2).

Уменьшилась кислотность почвы с сильнокислой (рН 4,3) до среднекислой (рН 4,5–5,3), при этом действие физиологически кислых удобрений не проявилось или было незначительным. Содержание органического вещества в почве увеличилось на 30–40%. Но запас гумуса в почве остается еще низким, менее 4% в горизонте 10–20 см.

В научной литературе накоплено достаточное количество данных [10], подтверждающих, что длительное применение минеральных удобрений не только снижает содержание гумуса в почве, но и ухудшает его качество: снижается содержание общего углерода, гуминовых кислот и активных компонентов почвы, что приводит к разрушению органического вещества и снижению плодородия почвы. Причиной этому является недостаточное поступление в почву органического вещества и интенсивная его минерализация, вызванная частой обработкой почв.

2. Агрохимические показатели почвы в слое 0–10 и 10–20 см, 2020 г.

Вариант опыта	Горизонт, см	pH _{KCl}	Гидролитическая кислотность, мг-экв./100 г	Гумус, %	Азот, %	Подвижные, мг/кг					
						P ₂ O ₅	K ₂ O	Cu	Zn	Cd	Pb
Без удобрений	0–10	5,08	3,33	4,23	0,151	34,47	71,5	4,6	8,45	0,25	2,90
	10–20	4,88	3,48	2,43	0,121	42,36	33,6	3,10	6,80	0,24	2,64
P ₄₅	0–10	5,09	4,42	4,38	0,145	27,32	128,0	3,90	7,80	0,25	3,10
	10–20	4,95	3,82	2,40	0,129	34,47	67,6	3,0	7,80	0,25	2,95
K ₉₀	0–10	4,78	3,82	3,82	0,148	260,9	58,3	4,10	9,70	0,27	3,50
	10–20	4,68	3,71	2,29	0,121	100,10	33,4	3,45	6,80	0,26	3,24
P ₄₅ K ₉₀	0–10	5,03	4,82	4,22	0,210	243,37	118,0	3,90	10,20	0,27	3,95
	10–20	4,93	3,91	2,27	0,131	83,43	42,7	3,50	7,80	0,28	3,80
N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	0–10	4,85	4,32	4,07	0,152	142,86	58,9	3,65	8,90	0,28	4,30
	10–20	4,70	3,48	2,53	0,123	72,30	39,4	3,56	7,20	0,28	4,10
N ₉₀ P ₄₅ K ₉₀ + 20 т/га навоза 1 раз в 4 года	0–10	4,65	4,05	4,57	0,152	51,10	71,40	5,80	13,0	0,30	2,67
	10–20	4,70	4,05	2,87	0,127	27,70	39,4	4,32	8,30	0,30	2,30

На необрабатываемых почвах и почвах сенокосов содержание гумуса находится в равновесном состоянии, так как происходит постоянная подпитка почвы остатками травостоев [9]. Одним из основных показателей качества гумуса является отношение С:N, чем оно ниже, тем больше гумус обогащен азотом. Для определения соотношения С:N иногда используют косвенный метод Вольфа, в котором расчетный коэффициент 1,724 умножают на содержание углерода в гумусе [11]. Коэффициент 1,724 получен из расчета, что в гумусе содержится 58% углерода.

Для дерново-подзолистой суглинистой почвы опытного участка С:N составляет: $C = 3,30\% : 1,724 = 1,91$, где 3,30% — содержание гумуса; $C:N = 1,91 : 0,14 = 13,6$.

Соотношение 10,0 и менее характерно для качества гумуса в черноземах, для дерново-подзолистых почв — 11–15. Для

почвы опытного участка С:N составляет 13,6, что можно считать оптимальным.

Отмечено влияние длительного применения минеральных удобрений на другие агрохимические показатели. Увеличилось содержание подвижного фосфора, особенно в вариантах с этим удобрением, до 107–180 мг/кг, что, согласно классификации обеспеченности почв, считается повышенным. Содержание обменного калия по вариантам опыта колебалось в пределах от 55 до 97 мг/кг, это характеризует почву как среднеобеспеченную.

При закладке опыта в почве не проводилось определение подвижных форм тяжелых микроэлементов — меди, цинка и токсичных элементов — кадмия и свинца, так как в то время отсутствовали методы их определения, поэтому полученные нами результаты (табл. 2) являются исходными. Согласно данным химического анализа, после 74 лет систе-

матического внесения минеральных удобрений почва участка на сенокосе была высоко обеспечена подвижной медью (3,6–5,0 мг/кг) и цинком (8,0–10,0 мг/кг) почвы. Содержание в почве подвижных форм кадмия и свинца составило 0,25–0,30 мг/кг и 2,5–4,20 мг/кг соответственно.

Итак, длительное применение минеральных удобрений в опыте при сенокосном использовании положительно отразилось на агрохимической характеристике почвы. Повышенное содержание подвижных форм меди, цинка, свинца и кадмия в почве не превышает ОДК, разрешенные ГН 2.1.72517-09, которые допускают концентрацию: меди — 5 мг/кг, цинка — 23 мг/кг, кадмия — 0,5 мг/кг, свинца — 5 мг/кг [12].

В опыте на сенокосе перезалужение не проводилось на протяжении всего периода исследования. За это время на поверхности почвенного покрова сформировался плотный слой дернины, который, согласно данным других исследователей [4], может оказывать влияние на распределение минеральных и органических соединений в зоне корнеобитаемого слоя.

С этой целью верхний гумусовый горизонт проанализирован по слоям 0–10 и 10–20 см. Полученные данные (табл. 2) показали, что кислотность почвы оказалась практически одинаковой по всему горизонту 0–20 см, а действие минеральных удобрений на величину рН были ничтожными.

Как и предполагалось, значительно больше накопилось органического вещества и азота в слое 0–10 см. Содержание гумуса по всем вариантам опыта превысило на 0,89–0,99%, а гидролизуемого

азота — на 0,014–0,015%. Более высокая концентрация минеральных элементов отмечена в слое 0–10 см. Содержание фосфора превышало на 40–80 мг/кг, а калия — на 10–15 мг/кг их значения в горизонте 10–20 см.

Согласно литературным данным некоторых исследователей [13], накопление и вымывание токсичных элементов, попавших в почву, в значительной степени зависит от содержания гумуса, который связывает и удерживает ряд токсичных металлов, в первую очередь медь и цинк, которых в гумусовом горизонте в десятки раз больше, чем в минеральной части почвы.

Результаты наших исследований показали, что хотя концентрация меди на 0,5–1,5 мг/кг и цинка на 1,0–1,5 мг/кг в слое 0–10 см превышает среднее по горизонту 0–20 см, однако их содержание достаточно высоко представлено и в зоне всего корнеобитаемого слоя.

Несмотря на более высокий уровень гумуса в дерновом слое 0–10 см, содержание подвижного кадмия характеризовалось равномерностью его распределения по всему слою 0–20 см. По наблюдениям некоторых авторов [1; 13], для кадмия более свойственна миграция по профилю, чем накопление в верхних горизонтах почвы, так как органическое вещество не влияет или оказывает очень слабое действие на подвижность кадмия в почве. Также слабо изменялась подвижность свинца в почве от содержания гумуса.

Как отмечено выше, почва опытного участка в достаточной степени обеспечена элементами питания, что благоприятно отразилось на химическом составе травостоя. Содержание фосфора в расте-

ниях в среднем составляет 0,25–0,50% сухого вещества и может колебаться в пределах 0,1–1,9% в зависимости от биологических особенностей растений, возраста и доз фосфорного питания [14]. Содержание фосфора в растениях по вариантам опыта в наших исследованиях

характеризовалось средними значениями (0,17–0,42%) (табл. 3).

Содержание калия в кормах колеблется около 1%, но может изменяться в интервале 0,3–2,5% в зависимости от содержания подвижных форм, удобрений и стадии вегетации.

3. Содержание минеральных элементов, микроэлементов и тяжелых металлов в кормовых травах при длительном применении минеральных удобрений (среднее за 2019–2020 гг.)

Вариант опыта	В сухом веществе, мг/кг				В % на сухое вещество	
	медь	цинк	кадмий	свинец	P ₂ O ₅	K ₂ O
Без удобрений	5,10	27,6	0,13	0,97	0,17	1,06
P ₄₅	4,76	27,2	0,11	0,99	0,42	1,72
K ₉₀	5,76	27,2	0,14	1,03	0,42	1,53
P ₄₅ K ₉₀	5,2	259	0,13	1,03	0,47	1,41
N ₁₂₀ P ₄₅ K ₉₀	8,03	31,2	0,16	1,04	0,17	0,80
N ₉₀ P ₄₅ K ₉₀ + 20 т/га навоза	6,33	27,9	0,16	1,27	0,43	0,86

Характерной особенностью калия является его многократное использование растениями в процессе вегетации, так как он легко перемещается из старых тканей в молодые. В исследованиях на сенокосе травы были достаточно высоко обеспечены калием (1,06–1,70%) с незначительными колебаниями содержания по вариантам опыта. Снижение концентрации калия в варианте с полным минеральным удобрением до 0,80%, вероятно, связано с «эффектом разбавления», вследствие более высокого урожая трав.

В последнее время медь и цинк стали относить к тяжелым элементам, исходя только из массы атомов: медь — 63,54, цинк — 65,37, хотя оба микроэлемента являются обязательными для растений, а медь — это единственный элемент, улучшающий рост растений в условиях азотного питания [15; 16].

В опыте растения сенокоса в достаточной степени обеспечены медью (5–8 мг/кг) и цинком (27–31 мг/кг). Не наблюдалось изменение их содержания под действием фосфорно-калийных удобрений, но азотные удобрения на этом фоне способствовали увеличению их потребления, как и в опытах других авторов [17; 18; 19].

Максимальное содержание кадмия в растениях составляло 0,16 мг/кг, а свинца — 1,27 мг/кг. Достоверной связи между подвижностью в почве и содержанием в растениях не наблюдалось, но азотные удобрения на фосфорно-калийном фоне незначительно стимулировали их потребление растениями сенокоса. Содержание кадмия и свинца в травах было ниже допустимого уровня и не представляло опасности для окружающей среды и животных (табл. 4) [20].

4. Допустимая концентрация токсичных минеральных элементов в кормах

Элемент	Вид корма				
	сено	сенаж	силос	зеленые корма	искусственно высушенные корма
мг/кг, не более					
Кадмий	0,25	0,30	0,30	0,10–0,07	0,50
Свинец	2,0	5,0	0,8	0,6–0,3	5,0
Мышьяк	0,5	0,5	0,5	0,5	2,0
Ртуть	0,10	0,05	0,05	0,05	0,10

Основной задачей стационарного опыта являлось изучение длительного действия минеральных удобрений на продуктивность сенокоса и формирование агрофитоценозов при различных технологических системах. Результаты опыта указывают на существенные различия состава травостоя в зависимости от доз вносимых удобрений. Так, раздельное применение фосфорных (P_{45}) и калийных удобрений (K_{90}), как и без внесения удобрений, способствовало формированию низовозлакового травостоя, основную долю которого занимает овсяница красная (до 70%), доля бобовых видов составляет до 13%. Верховые злаки в составе травостоя практически отсутствуют.

В вариантах с полной минеральной подкормкой ($N_{120}P_{45}K_{90}$) из пяти видов верховых злаков и двух видов бобовых в составе высеянной при залужении травосмеси сохранился на 74-й год опыта только лисохвост луговой (до 70% массы), который в этих условиях обитания, вероятно, обладает большей конкурентоспособностью. При применении полного минерального удобрения с дозой азота 120 кг/га бобовые виды практически выпадают из состава. Виды разнотравья занимают до 7–10% общей массы урожая.

Заключение.

1. Длительное систематическое применение минеральных удобрений на сенокосе не оказало отрицательного действия на агрохимические свойства почвы. Дерново-подзолистая суглинистая почва опытного участка была достаточно высоко обеспечена подвижными формами фосфора, калия, меди, цинка. Содержание подвижных форм кадмия и свинца не превышало допустимого уровня безопасности их в почве. Улучшились другие агрохимические показатели: уменьшилась кислотность почвы с рН 4,3 до рН 4,5–5,0, содержание органического вещества в почве по вариантам опыта возросло на 30–40%.

2. Внесение за годы проведения опыта с минеральными удобрениями примеси микроэлементов (меди, цинка) и токсичных элементов (кадмия, свинца) оказало влияние на увеличение их подвижности в почве и содержание в травах. В зависимости от варианта опыта травосмеси сенокоса содержали оптимальное количество меди, цинка, а содержание кадмия и свинца было значительно ниже допустимого уровня, предусмотренного ТС201/00ТС.

3. Балансовые исследования по использованию растениями сенокоса примесей микроэлементов и токсичных эле-

ментов, поступивших с минеральными удобрениями за год, показали, что растения сенокосов полностью использовали внесенные примеси меди, цинка, кадмия и свинца.

4. Длительное применение минеральных удобрений на сенокосах отразилось на видовом составе травостоев. Применение фосфорных и калийных удобрений

приводило к перестройке фитоценоза в низовозлаковый тип травостоя. Совместное применение фосфорно-калийных удобрений несколько увеличивало долю верховых злаков (до 26,5%). Применение полного минерального удобрения ($N_{120}P_{45}K_{90}$) способствовало сохранению ранее высеванных злаков (лисохвоста лугового, мятлика лугового).

Литература

1. Файза Салама Али Салама, Моавад Абузид, Обухов А.И. Влияние органических удобрений на подвижность свинца в почве и поступление его в растения // Вестник МГУ. Серия 17: Почвоведение. – 1993. – № 4. – С. 45–51.
2. Чуйков В.А., Моругина М.П. Влияние минерального питания на содержание микроэлементов в злаковых травах при посеве в чистом виде и в смеси // Кормопроизводство : сб. науч. тр. – М. : ВИК, 1975. – С. 124–129.
3. Ильин В.Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение. – Новосибирск : Наука, 1991. – 151 с. ISBN 5020294225.
4. Потатуева Ю.А, Сидоренкова С.Г., Прищеп Е.Г. Агрэкологическое значение примесей тяжелых металлов и токсичных элементов в удобрениях // Агрохимия. – 2002. – № 1. – С. 85–95.
5. Влияние длительного применения фосфорных удобрений на накопление в почве и растениях тяжелых металлов и токсичных элементов / Ю.А. Потатуева, А.Д. Касицкий, Ю.И. Хлыстовский [и др.] // Агрохимия. – 1994. – № 11. – С. 98–113.
6. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях : Пер. с англ. – М. : Мир, 1989. – 439 с.
7. Карпова С.Ю. Влияние длительного внесения удобрений на содержание микроэлементов и тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве в льянном севообороте : дис. ... канд. биол. наук (06.01.04). – М., 2000. – 165 с.
8. Пугаев С.В., Еряшев А.П. Влияние минеральных удобрений на накопление тяжелых металлов козлятником восточным (*Galega orientalis* Lam.) на черноземе выщелоченном тяжелосуглинстом // Агрохимия. – 2013. – № 6. – С. 60–68.
9. Попова А.А. Влияние минеральных и органических удобрений на состояние тяжелых металлов в почвах // Агрохимия. – 1991. – № 3. – С. 62–67.
10. Завьялова Н.Е. Гумусное состояние дерново-подзолистых почв Предуралья // Влияние длительного применения удобрений на органическое вещество почв : коллективная монография / ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова; под общ. ред. В.Г. Сычева, Л.К. Шевцовой. – М., 2010. – С. 190–230.
11. Королев В.А., Громовик А.И. К вопросу о расчете содержания гумуса в почвах разного типа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия, биология, фармация. – 2018. – № 2. – С. 152–156.
12. Титова В.И., Дабахов М.В., Дабахова Е.В. Экоотоксикология тяжелых металлов : учебное пособие. – Нижний Новгород, 2001. – 135 с.
13. Токсичность кадмия в болотно-торфяной низинной почве для растений ячменя / Л.Н. Ульяненко, А.С. Филипас, С.В. Круглов, Н.Н. Лой, Н.С. Степанчикова // Агрохимия. – 2012. – № 7. – С. 68–73.

14. Кутузова А.А., Привалова К.Н., Федорова Л.Д. Зависимость между содержанием в почве подвижного фосфора, урожаем травостоя бобово-злакового пастбища и эффективностью фосфорных удобрений // *Химия в сельском хозяйстве*. – 1982. – № 10. – С. 18–23.
15. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Ленинград : Агропромиздат, 1987. – 142 с.
16. Чернавина И.А. Физиология и биохимия микроэлементов. – М. : Высшая школа, 1970. – 310 с.
17. Моругина М.П., Чуйков В.А. Влияние азотных и фосфорных удобрений на содержание меди в злаковых пастбищных травах при различной обеспеченности почв подвижной медью // *Агрохимия*. – 1973. – № 6. – С. 89–94.
18. Пейве Я.В. Биохимия микроэлементов и проблемы азотного питания растений // *Вестник АН СССР*. – 1965. – № 5. – С. 21–25.
19. Минеральные элементы в кормах и методы их анализа / В.М. Косолапов, В.А. Чуйков, Х.К. Худякова, В.Г. Косолапова. – М. : Угрешская типография, 2019. – 272 с. ISBN 9785918500378 (DOI 10.33814/monography_1654).
20. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве: Гигиенические нормативы ГН 2.1.7 2511-09. – М. : Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 10 с.

References

1. Fayza Salama Ali Salama, Moavad Abuzid, Obukhov A.I. Vliyaniye organicheskikh udobreniy na podvizhnost' svintsya v pochve i postupleniye yego v rasteniya [Influence of organic fertilizers on the mobility of lead in the soil and its entry into plants]. *Vestnik MGU. Seriya 17: Pochvovedeniye [Bulletin of the Moscow State University. Series 17: Soil Science]*, 1993, no. 4, pp. 45–51.
2. Chuykov V.A., Morugina M.P. Vliyaniye mineral'nogo pitaniya na sodержaniye mikroelementov v zlakovykh travakh pri poseve v chistom vide i v smesi [The influence of mineral nutrition on the content of trace elements in cereal grasses when sown in pure form and in a mixture]. *Kormoproizvodstvo [Fodder production : collection of scientific papers]*. Moscow, 1975, pp. 124–129.
3. Ilin V.B. Tyazhelyye metally v sisteme pochva–rasteniye [Heavy metals in the soil–plant system.]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991, 151 p., ISBN 5020294225.
4. Potatueva Yu.A., Sidorenkova S.G., Prishchep E.G. Agroekologicheskoye znacheniye primesey tyazhelykh metallov i toksichnykh elementov v udobreniyakh [Agroecological significance of impurities of heavy metals and toxic elements in fertilizers]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]*, 2002, no. 1, pp. 85–95.
5. Potatueva Yu.A., Kasitskiy A.D., Khlystovskiy Yu.I. et al. Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya fosfornykh udobreniy na nakopleniye v pochve i rasteniyakh tyazhelykh metallov i toksichnykh elementov [Influence of long-term use of phosphoric fertilizers on the accumulation of heavy metals and toxic elements in soil and plants]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]*, 1994, no. 11, pp. 98–113.
6. Kabata-Pendias A., Pendias Kh. Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh [Microelements in soils and plants]. Translated from English. Moscow, Mir Publ., 1989, 439 p.
7. Karpova S.Yu. Vliyaniye dlitel'nogo vneseniya udobreniy na sodержaniye mikroelementov i tyazhelykh metallov v dernovo-podzolistoy pochve v l'nyanom sevooborote [The effect of long-term fertilization on the content of trace elements and heavy metals in sod-podzolic soil in flax crop rotation : Dis. ... Cand. Biol. Sciences]. Moscow, 2000, 165 p.
8. Pugaev S.V., Eryashev A.P. Vliyaniye mineral'nykh udobreniy na nakopleniye tyazhelykh metallov kozlyatnikom vostochnym (*Galega orientalis* Lam.) na chernozeme vyzhelochennom tyazhelosuglinistom [The influence of mineral fertilizers on the accumulation of heavy metals by the oriental goat's rue (*Galega orientalis* Lam.) on leached heavy loamy chernozem]. *Agrokhimiya [Agrochemistry]*, 2013, no. 6, pp. 60–68.

9. Popova A.A. Vliyaniye mineral'nykh i organicheskikh udobreniy na sostoyaniye tyazhelykh metallov v pochvakh [Influence of mineral and organic fertilizers on the state of heavy metals in soils]. *Agrokimiya [Agrochemistry]*, 1991, no. 3, pp. 62–67.
10. Zavyalova N.E. Gumusnoye sostoyaniye dernovo-podzolistykh pochv Predural'ya [The humus state of sod-podzolic soils in the Cis-Urals]. *Vliyaniye dlitel'nogo primeneniya udobreniy na organicheskoye veshchestvo pochv [Influence of long-term use of fertilizers on the organic matter of soils : collective monograph]*. Eds.: V.G. Sychev, L.K. Shevtsova. Moscow, 2010, pp. 190–230.
11. Korolev V.A., Gromovik A.I. K voprosu o raschete sodержaniya gumusa v pochvakh raznogo tipa [On the issue of calculating the content of humus in soils of different types]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Khimiya, biologiya, farmatsiya [Bulletin of the Voronezh State University. Series: Chemistry, Biology, Pharmacy]*, 2018, no. 2, pp. 152–156.
12. Titova V.I., Dabakhov M.V., Dabakhova E.V. Ekotoksikologiya tyazhelykh metallov [Ecotoxicology of heavy metals]. Nizhniy Novgorod, 2001, 135 s.
13. Ulyanenko L.N., Filipas A.S., Kruglov C.V., Loy N.N., Stepanchikova N.S. Toksichnost' kadmiya v bolotno-torfyanoy nizinnoy pochve dlya rasteniy yachmenya [Toxicity of cadmium in bog-peat lowland soil for barley plants]. *Agrokimiya [Agrochemistry]*, 2012, no. 7, pp. 68–73.
14. Kutuzova A.A., Privalova K.N., Fedorova L.D. Zavisimost' mezhdru sodержaniyem v pochve podvizhnogo fosfora, urozhayem travostoya bobovo-zlakovogo pastbishcha i effektivnost'yu fosfornykh udobreniy [The relationship between the content of mobile phosphorus in the soil, the yield of grass stand of a legume-cereal pasture and the effectiveness of phosphorus fertilizers]. *Khimiya v sel'skom khozyaystve [Chemistry in agriculture]*, 1982, no. 10, pp. 18–23.
15. Alekseev Yu.V. Tyazhelyye metally v pochvakh i rasteniyakh [Heavy metals in soils and plants]. Leningrad, Agropromizdat Publ., 1987, 142 p.
16. Chernavina I.A. Fiziologiya i biokhimiya mikroelementov [Physiology and Biochemistry of Microelements.]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1970, 310 p.
17. Morugina M.P., Chuykov V.A. Vliyaniye azotnykh i fosfornykh udobreniy na sodержaniye medi v zlakovykh pastbishchnykh travakh pri razlichnoy obespechennosti pochv podvizhnoy med'yu [Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on the copper content in cereal pasture grasses with different soil supply with mobile copper]. *Agrokimiya [Agrochemistry]*, 1973, no. 6, pp. 89–94.
18. Peyve Ya.V. Biokhimiya mikroelementov i problemy azotnogo pitaniya rasteniy [Biochemistry of trace elements and problems of nitrogen nutrition of plants]. *Vestnik AN SSSR [Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR]*, 1965, no. 5, pp. 21–25.
19. Kosolapov V.M., Chuykov V.A., Khudyakova Kh.K., Kosolapova V.G. Mineral'nyye elementy v kormakh i metody ikh analiza [Mineral elements in feed and methods of their analysis]. Moscow, Ugreshskaya tipografiya Publ., 2019, 272 p. ISBN 9785918500378 (DOI 10.33814/monography_1654).
20. Oriyentirovochno dopustimyye kontsentratsii (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve: Gigiyenicheskiye normativy GN 2.1.7 2511-09 [Approximately permissible concentrations (APC) of chemical substances in the soil: Hygienic standards GN 2.1.7 2511-09]. Moscow, Federal Center for Hygiene and Epidemiology of Rospotrebnadzor Publ., 2009, 10 p.