

УДК 502.55:502.36

Научная статья



Открытый доступ

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-367-2-87-92

Н.Н. Жаркова

Омский государственный аграрный
университет им. П.А. Столыпина, Омск,
Российская Федерация

✉ nn.zharkova@omgau.org

Поступила в редакцию:
22.08.2022

Одобрена после рецензирования:
30.12.2022

Принята к публикации:
31.01.2023

Research article



Open access

DOI: 10.32634/0869-8155-2023-367-2-87-92

Natalya N. Zharkova

Omsk State Agrarian University named after
P.A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

✉ nn.zharkova@omgau.org

Received by the editorial office:
22.08.2022

Accepted in revised:
30.12.2022

Accepted for publication:
31.01.2023

Влияние микроудобрений на содержание микроэлементов в почве при выращивании лекарственных растений

РЕЗЮМЕ

Актуальность. В настоящее время остаются неизученными вопросы минерального питания лекарственных растений эссенциальными элементами, а недостаток в почвах определенных микроэлементов является недооцененным агроэкологическим фактором. Это обуславливает необходимость изучения влияния различных доз цинковых и медных удобрений на содержание подвижных форм цинка и меди в лугово-черноземной почве при возделывании тысячелистника и пижмы обыкновенной в условиях южной лесостепи Западной Сибири.

Методы. Объектами исследований служили лугово-черноземная почва, *Achillea millefolium* L., *Tanacetum vulgare* L. Предшественник — чистый пар. Полевой опыт проводился в течение 2012–2015 гг. на опытном поле Омского ГАУ. Микроудобрения в опытах вносили однократно в год посадки лекарственных растений. Цинковые удобрения ($(\text{CH}_3\text{COOH})_2\text{Zn}$) вносили в дозах 20, 40, 60, 80 кг д. в. / га, медные ($(\text{CH}_3\text{COOH})_2\text{Cu}$) — в дозах 2,4, 4,9, 7,2, 9,7 кг д. в. / га на фоне макроудобрений ($\text{N}_{135}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$). Отбор и анализ почвенных образцов осуществляли ежегодно в фазу отрастания.

Результаты. При проведении исследований установлено, что цинковые и медные удобрения на оптимальном макроэлементном фоне при низком содержании цинка ($< 2,0$ мг/кг) и меди в почве ($< 1,5$ мг/кг) обеспечивали повышение содержания подвижных форм цинка и меди, соответственно, на 108,3% и 54,5% (тысячелистник обыкновенный) и 672,7% и 61,5% (пижма обыкновенная) при внесении их в почву в ацетатной форме. Оптимальные уровни содержания подвижных форм цинка и меди в почве составили для тысячелистника обыкновенного, соответственно, 2,5 мг/кг и 0,17 мг/кг, пижмы обыкновенной 8,5 мг/кг и 0,21 мг/кг.

Ключевые слова: микроудобрения, лугово-черноземная почва, цинк, медь, лекарственные культуры, тысячелистник обыкновенный, пижма обыкновенная, южная лесостепь Западной Сибири.

Для цитирования: Жаркова Н.Н. Влияние микроудобрений на содержание микроэлементов в почве при выращивании лекарственных растений. *Аграрная наука*. 2023; 367(2): 87–92. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-367-2-87-92>

© Жаркова Н.Н.

Effect of microfertilizers on the content of trace elements in soil during cultivation of medicinal plants

ABSTRACT

Relevance. At present, the issues of mineral nutrition of medicinal plants with essential elements remain unstudied, and the lack of certain microelements in soils is an underestimated agroecological factor. This necessitates the study of the effect of different doses of zinc and copper fertilizers on the content of mobile forms of zinc and copper in the meadow-chernozem soil when cultivating *Achillea millefolium* L. and *Tanacetum vulgare* L. in the southern forest-steppe conditions of Western Siberia.

Methods. The research objects were meadow-chernozem soil, *Achillea millefolium* L., *Tanacetum vulgare* L. The field experiment was conducted during 2012–2015 on the experimental field of the Omsk State Agrarian University. Microfertilizers in the experiments were applied once in the year of planting medicinal plants. Zinc fertilizers ($(\text{CH}_3\text{COOH})_2\text{Zn}$) were applied in doses of 20, 40, 60, 80 kg/ha, copper ($(\text{CH}_3\text{COOH})_2\text{Cu}$) in doses of 2.4, 4.9, 7.2, 9.7 kg/ha against macrofertilizer ($\text{N}_{135}\text{P}_{45}\text{K}_{45}$). Soil samples were collected and analyzed annually in the growing phase.

Results. The research revealed that zinc and copper fertilizers on optimal macroelement background at low zinc ($< 2,0$ mg/kg) and copper content in soil ($< 1,5$ mg/kg) provided increase of zinc and copper mobile forms content in soil by 108,3% and 54,5% (*Achillea millefolium* L.) and 672,7% and 61,5% (*Tanacetum vulgare* L.), respectively, when applied in soil in acetate form. Optimal levels of the content of mobile forms of zinc and copper in the soil were 2.5 mg/kg and 0.17 mg/kg for *Achillea millefolium* L. respectively, 8.5 mg/kg and 0.21 mg/kg for *Tanacetum vulgare* L.

Key words: microfertilizers, meadow-chernozem soil, zinc, copper, medicinal crops, *Achillea millefolium* L., *Tanacetum vulgare* L., southern forest-steppe of Western Siberia.

For citation: Zharkova N.N. Effect of microfertilizers on the content of trace elements in soil during cultivation of medicinal plants. *Agrarian science*. 2023; 367(2): 87–92. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-367-2-87-92> (In Russian).

© Zharkova N.N.

Введение / Introduction

В последнее время в России и за рубежом наблюдается увеличение потребности в качественном лекарственном сырье, так как долгие годы лекарственное растениеводство находилось в кризисном состоянии. Подсчитано, что потребности в лекарственном сырье покрываются за счет внутреннего рынка страны лишь на 1% [1]. В связи с этим в 2016 г. решением президиума Совета при Президенте РФ была утверждена дорожная карта «Хелснет» Национальной технологической инициативы.

В рамках направления «Превентивная медицина» дорожной карты предусматривается создание к 2035 г. около 300 тыс. фермерских хозяйств, занимающихся выращиванием, первичной переработкой и хранением лекарственного сырья [2], поэтому наряду с восстановлением хозяйственных структур, занимающихся выращиванием лекарственных растений, необходимо изучение агрохимических приемов их возделывания, приспособленных к зональным условиям региона, с целью повышения урожайности и качества. К числу таких регионов относится и Западная Сибирь, которая по почвенно-климатическим условиям и результатам опытных исследований пригодна для возделывания многолетних лекарственных растений [3, 4].

Многочисленными исследованиями последних лет установлено, что одним из главных факторов нарушения функционирования агроэкосистем является несбалансированное питание растений. Многие российские [5–11] и зарубежные [12–14] авторы отмечают дефицит содержания микроэлементов на различных типах почв и целесообразность внесения микроудобрений.

Установлено, что в Российской Федерации потребность почв в медных удобрениях достигает 50–60%, в цинковых — около 90% [15]. Подобная ситуация отмечается и на черноземных почвах Омской области, где содержание подвижного цинка находится на низком уровне (98,9% обследованных площадей), подвижной меди — на низком и среднем уровне (47,1% и 50,0% обследованной площади соответственно) [16].

Проведение химического анализа почвы позволяет оценить содержание в почве элементов минерального питания и выполнить прогноз эффективности применения микроудобрений. Для разработки почвенной диагностики необходимо знать содержание макро- и микроэлементов в почве, а также потребность растений в них в различные периоды их роста и развития для получения высоких урожаев.

В настоящее время остаются неизученными вопросы минерального питания лекарственных растений цинком и медью для условий юга Западной Сибири, а недостаток в почвах микроэлементов является недооцененным агроэкологическим фактором. Это обуславливает необходимость изучения закономерностей действия и последствий микроудобрений в системе «удобрение — почва» в зональных условиях юга Западной Сибири.

Цель исследований — изучить влияние внесения различных доз цинк- и медьсодержащих удобрений

на химический состав лугово-черноземной почвы при возделывании тысячелистника и пижмы обыкновенной.

Материал и методы исследования /

Materials and method

Объектами изучения явились лекарственные растения — лугово-черноземная почва и лекарственные растения семейства сложноцветных (тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L. и пижма обыкновенная *Tanacetum vulgare* L.).

Многолетние полевые опыты с тысячелистником и пижмой обыкновенной проводили на территории опытного поля Омского ГАУ (2012–2015 гг.). Почва опытного участка — лугово-черноземная маломощная малогумусовая тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика почвы (слой 0–30 см) в период закладки полевых опытов (2012 г.) представлена в таблице 1. Подвижные формы микроэлементов определяли методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии согласно ГОСТ Р 50686-94 и ГОСТ Р 50684-94; фосфора и калия согласно ГОСТ 26204-91.

Закладка полевых опытов проводилась по общепринятым методикам, разработанным и утвержденным РАСХН для лекарственных культур [17, 18]. Опыт закладывали в четырехкратной повторности. Учетная площадь делянки — 10 м². Предшественник — чистый пар.

Посадку лекарственных растений осуществляли рассадой в мае. Схема посадки растений — 50 × 10 см. Макро- и микроудобрения вносили однократно в год посадки лекарственных растений в следующих формах: ацетат меди (CH₃COO)₂Cu — 32%, аммиачная селитра N — 34,4%, двойной суперфосфат P₂O₅ — 37%, хлористый калий K — 60%.

Удобрения вносили вручную в рядки. Отбор и анализ почвенных образцов осуществляли ежегодно в фазу отрастания. Почвенные образцы отбирали почвенным буром на глубину 0–30 см по вариантам опыта методом конверта.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика лугово-черноземной почвы опытного поля

Table 1. Agrochemical characteristics of meadow-chnozem soil of the experimental field

Элементы питания	Содержание, мг/кг
N-NO ₃ (водная вытяжка)	7,0
P ₂ O ₅ (метод Ф.В. Чирикова)	216
K ₂ O (метод Ф.В. Чирикова)	419
Cu (атомно-адсорбционный метод*)	0,10
Zn (атомно-адсорбционный метод*)	0,65
Примечание: * — в ацетатно-аммонийном буферном растворе с pH = 4,8.	

Таблица 2. Схема опыта

Table 2. Experiment scheme

Вид удобрения	Доза, кг д. в./га (доля ПДК-элемента)				
Без удобрений (контроль)	-	-	-	-	-
Фон (НРК)	N ₁₃₅ P ₄₅ K ₄₅	-	-	-	-
Цинковые удобрения	N ₁₃₅ P ₄₅ K ₄₅	Zn ₂₀ (0,25 ПДК)	Zn ₄₀ (0,50 ПДК)	Zn ₆₀ (0,75 ПДК)	Zn ₈₀ (1,0 ПДК)
Медные удобрения	N ₁₃₅ P ₄₅ K ₄₅	Cu _{2,4} (0,25 ПДК)	Cu _{4,9} (0,50 ПДК)	Cu _{7,2} (0,75 ПДК)	Cu _{9,7} (1,0 ПДК)

Таблица 3. Содержание подвижных форм цинка и меди в лугово-черноземной почве под лекарственными растениями в фазу отрастания, средние данные за 2012–2015 гг. ($M \pm SEM$, $n = 40$)

Table 3. Content of mobile forms of zinc and copper in meadow-chnozem soil under medicinal plants in the growing phase, average data for 2012–2015 ($M \pm SEM$, $n = 40$)

Вариант		Тысячелистник обыкновенный		Пижма обыкновенная	
		Цинк, мг/кг	Медь, мг/кг	Цинк, мг/кг	Медь, мг/кг
Контроль		$1,1 \pm 0,07$	$0,09 \pm 0,004$	$1,0 \pm 0,34$	$0,10 \pm 0,007$
$N_{135}P_{45}K_{45}$ (фон)		$1,2 \pm 0,06$	$0,11 \pm 0,001$	$1,1 \pm 0,33$	$0,13 \pm 0,005$
Фон	Zn ₂₀	$1,3 \pm 0,04$	$0,11 \pm 0,001$	$1,7 \pm 0,26^{**}$	$0,15 \pm 0,002^*$
	Zn ₄₀	$1,9 \pm 0,02^{***}$	$0,12 \pm 0,0003$	$6,2 \pm 0,24^{***}$	$0,17 \pm 0,0001^{***}$
	Zn ₆₀	$2,5 \pm 0,09^{***}$	$0,14 \pm 0,002^{**}$	$8,5 \pm 0,50^{***}$	$0,20 \pm 0,003^{***}$
	Zn ₈₀	$2,8 \pm 0,12^{***}$	$0,10 \pm 0,003$	$9,7 \pm 0,63^{***}$	$0,17 \pm 0,0001^{***}$
	Cu _{2,4}	$1,2 \pm 0,06$	$0,12 \pm 0,0003$	$2,0 \pm 0,23^{***}$	$0,17 \pm 0,0001^{***}$
	Cu _{4,9}	$1,4 \pm 0,03$	$0,13 \pm 0,001^{**}$	$2,2 \pm 0,21^{***}$	$0,18 \pm 0,001^{***}$
	Cu _{7,2}	$1,6 \pm 0,01^{***}$	$0,14 \pm 0,002^{**}$	$3,8 \pm 0,03^{***}$	$0,21 \pm 0,004^{***}$
	Cu _{9,7}	$2,0 \pm 0,03^{***}$	$0,17 \pm 0,005^{***}$	$4,2 \pm 0,02^{***}$	$0,23 \pm 0,006^{***}$
ПДК		23	3	23	3

Примечание: * — достоверно относительно контроля на уровне значимости $p \leq 0,05$;
 ** — достоверно относительно фона на уровне значимости $p \leq 0,05$.

Таблица 4. Взаимосвязь между дозами микроудобрений и содержанием подвижных форм цинка и меди в почве под лекарственными растениями

Table 4. Relationship between doses of microfertilizers and content of mobile forms of zinc and copper in soil under medicinal plants

Год жизни культуры	Уравнение регрессии		Коэффициент интенсивности действия b , мг/кг	Коэффициент корреляции (r)
Тысячелистник обыкновенный				
1-й (2012 г.)	$Y_{Zn1} = 0,01 Zn + 0,97$	(1)	0,01	$r = 0,95$
	$Y_{Cu1} = 0,003 Cu + 0,10$	(2)	0,003	$r = 0,97$
2-й (2013 г.)	$Y_{Zn2} = 0,03 Zn + 0,96$	(3)	0,03	$r = 0,88$
	$Y_{Cu2} = 0,006 Cu + 0,11$	(4)	0,006	$r = 0,96$
3-й (2014 г.)	$Y_{Zn3} = 0,04 Zn + 0,71$	(5)	0,04	$r = 0,94$
	$Y_{Cu3} = 0,006 Cu + 0,12$	(6)	0,006	$r = 0,98$
4-й (2015 г.)	$Y_{Zn4} = 0,02 Zn + 1,74$	(7)	0,02	$r = 0,99$
	$Y_{Cu4} = 0,004 Cu + 0,10$	(8)	0,004	$r = 0,95$
Средние данные (2012–2015 гг.)	$Y_{Zn} = 0,02 Zn + 1,05$	(9)	0,02	$r = 0,96$
	$Y_{Cu} = 0,006 Cu + 0,11$	(10)	0,006	$r = 0,96$
	$Y_{Cu} = 0,001 Zn + 0,11$	(11)	0,001	$r = 0,91$
	$Y_{Zn} = 0,08 Cu + 1,08$	(12)	0,08	$r = 0,95$
Пижма обыкновенная				
1-й (2012 г.)	$Y_{Zn1} = 0,001 Zn + 0,71$	(13)	0,001	$r = 0,99$
	$Y_{Cu1} = 0,006 Cu + 0,10$	(14)	0,006	$r = 0,99$
2-й (2013 г.)	$Y_{Zn2} = 0,07 Zn + 0,32$	(15)	0,07	$r = 0,90$
	$Y_{Cu2} = 0,012 Cu + 0,13$	(16)	0,012	$r = 0,97$
3-й (2014 г.)	$Y_{Zn3} = 0,14 Zn + 0,24$	(17)	0,14	$r = 0,95$
	$Y_{Cu3} = 0,015 Cu + 0,19$	(18)	0,015	$r = 0,97$
4-й (2015 г.)	$Y_{Zn4} = 0,32 Zn + 0,17$	(19)	0,32	$r = 0,96$
	$Y_{Cu4} = 0,006 Cu + 0,13$	(20)	0,006	$r = 0,87$
Средние данные (2012–2015 гг.)	$Y_{Zn} = 0,13 Zn + 0,37$	(21)	0,13	$r = 0,97$
	$Y_{Cu} = 0,01 Cu + 0,14$	(22)	0,01	$r = 0,99$
	$Y_{Cu} = 0,001 Zn + 0,13$	(23)	0,001	$r = 0,99$
	$Y_{Zn} = 0,34 Cu + 1,03$	(24)	0,34	$r = 0,95$

Микроудобрения вносили в дозах предельно допустимых концентраций (ПДК): 0,25; 0,5; 0,75; 1,0 (табл. 2). В расчете учитывали содержание микроэлементов до посадки и ПДК Zn и Cu в почве (23 мг/кг и 3 мг/кг) (СанПИН 1.2.3685-21).

На основании ранее проведенных исследований с многолетними культурами [19] расчет фона ($N_{135}P_{45}K_{45}$) проводили с учетом потребности растений в удобрениях в основное внесение.

Статистическая обработка экспериментальных данных методами вариационного (C_v , %) и корреляционного анализа (r), а также наименьшая существенная разница в опыте ($HCP_{0,5}$) проводились по Методике полевого опыта [17] с использованием компьютерных программ Microsoft Office Excel и Diana.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты многолетних исследований содержания подвижных форм микроэлементов в почве в полевых опытах с лекарственными растениями представлены в таблице 3.

В среднем за годы исследований при внесении расчетных доз цинковых удобрений в пределах оптимальной дозы (60 кг д. в. Zn/га, исходя из урожайных данных) содержание подвижного цинка в почве под растениями тысячелистника обыкновенного в фазу отрастания повышалось с 1,3 мг/кг до 2,5 мг/кг, подвижной меди — с 0,11 мг/кг до 0,14 мг/кг почвы.

В опыте с пижмой обыкновенной в вариантах с внесением цинковых удобрений в пределах оптимальной дозы 60 кг д. в. / га (по урожайным данным) содержание Zn было заметно выше и изменялось от 1,7 мг/кг до 8,5 мг/кг, Cu — от 0,15 мг/кг до 0,20 мг/кг.

Содержание подвижных форм микроэлементов в почве увеличивалось прямо пропорционально вносимым дозам медных удобрений. Так, в опыте с тысячелистником обыкновенным дозы Cu от 2,4 кг до 9,7 кг д. в. / га в среднем за 2012–2015 гг. повышали содержание Cu с 0,12 мг/кг до 0,17 мг/кг, Zn — с 1,2 мг/кг до 2,0 мг/кг.

В исследованиях с пижмой обыкновенной медные удобрения в дозах 2,4–7,2 кг д. в. / га повышали концентрацию Cu в почве на 30,8–61,5%, Zn — на 81,8–245,5% по сравнению с фоном. Содержание подвижных

форм цинка и меди в почве под лекарственными растениями не превышало установленной ПДК для этих элементов (табл. 3).

Математическая обработка полученных многолетних данных 2012–2015 гг. в опытах с многолетними лекарственными растениями позволила получить уравнения зависимости содержания подвижного Zn (Y_{Zn}) и Cu (Y_{Cu}) в слое почвы 0–30 см от доз вносимых ацетатных форм цинковых и медных удобрений по годам проводимых исследований (табл. 4, уравнения 1–24).

В 2012 году при внесении каждого килограмма цинковых удобрений под тысячелистник обыкновенный в дозах 20, 40, 60 кг д. в. / га на фоне NPK коэффициент интенсивности действия цинковых удобрений b на содержание Zn в слое почвы 0–30 см составил 0,01 мг/кг (табл. 4, уравнение 1).

Для повышения содержания подвижного Zn на 1 мг/кг почвы требуется внести 100 кг Zn-удобрений ($r = 0,95$). Каждый килограмм Cu-удобрений, внесенных до оптимальных доз (9,7 кг д. в. / га), повышал содержание подвижной Cu в почве на 0,003 мг/кг, $r = 0,97$ (табл. 4, уравнение 2).

В последующие годы (2013–2015 гг.) коэффициенты интенсивности последствия Zn-удобрений b на содержание Zn в почве составили: 2013 г. — 0,03 мг/кг ($r = 0,88$, уравнение 3), 2014-й — 0,04 мг/кг ($r = 0,94$, уравнение 5), 2015-й — 0,02 мг/кг ($r = 0,99$, уравнение 7).

Отсюда можно сделать вывод, что для повышения содержания Zn на 1 мг/кг почвы в среднем за годы последствия требуется внести 33,3 кг Zn-удобрений, что указывает на повышение коэффициента b интенсивности действия внесенных доз удобрений на лугово-черноземную почву в годы последствия.

Коэффициент интенсивности последствия Cu-удобрений b составил в 2013–2014 гг. 0,006 (табл. 4, уравнения 4, 6), в 2015-м — 0,004 мг/кг (табл. 4, уравнение 8). Таким образом, из уравнений 1–8 следует, что влияние Zn- и Cu-удобрений на химический состав почвы зависит от года жизни культуры.

В среднем за годы исследований в опыте с тысячелистником обыкновенным разовое внесение каждого килограмма Zn-удобрений повышает содержание в почве (в пределах оптимальной дозы) Zn на 0,02 мг/кг, Cu — на 0,001 мг/кг (табл. 4, уравнения 9, 11), внесение Cu-удобрений увеличивает содержание Cu на 0,006 мг/кг, Zn — на 0,08 мг/кг почвы (табл. 4, уравнения 10, 12).

Установлено, что коэффициенты интенсивности действия микроудобрений (b) на химический состав почвы при возделывании тысячелистника в течение первых трех лет жизни культуры (как по Zn, так и по Cu) увеличивались соответственно: 0,01 мг/кг → 0,03 мг/кг → 0,04 мг/кг и 0,003 г/кг → 0,006 мг/кг → 0,006 мг/кг, что связано с растворимостью микроэлементов в годы последствия.

По годам проводимых исследований коэффициенты интенсивности действия Zn-удобрений bZn закономерно повышаются: 0,001 мг/кг → 0,07 мг/кг → 0,14 мг/кг → 0,32 мг/кг (уравнения 13, 15, 17, 19). В среднем за 2012–2015 гг. 1 кг Zn/га равен 0,13 мг/кг, то есть для повышения подвижного Zn в почве на 1 мг/кг необходимо внести 7,7 кг Zn-удобрений (табл. 4, уравнение 21).

В годы действия и последствия внесенных Cu-удобрений в лугово-черноземную почву коэффициенты интенсивности действия b_{Cu} каждого килограмма Cu характеризовались низкими величинами. Так, в 2012 г. b_{Cu} был равен 0,006 мг/кг, в последующие годы (2013–2015 гг.) варьировал в пределах 0,006–

0,015 мг/кг (табл. 4, уравнения 14, 16, 18, 20). Исходя из этих нормативов, в среднем за годы исследований 1 мг подвижной Cu на 1 кг почвы эквивалентен 100 кг Cu-удобрений (табл. 4, уравнение 23).

Согласно уравнениям 21, 22, оптимальный уровень содержания подвижных форм Zn и Cu в лугово-черноземной почве соответствует оптимальному прогнозу питания: Zn — 8,2 мг/кг, Cu — 0,21 мг/кг (фактически в почве: Zn — 8,5 мг/кг, Cu — 0,20 мг/кг).

Поступившие в почву макро- и микроудобрения способны влиять на мобильность и ряда других элементов [20–23], поэтому на основе экспериментальных данных (табл. 3) были получены не только прямые, но и обратные связи между Zn и Cu.

Было выявлено, что Cu-удобрения в большей степени повышали содержание подвижного Zn в почве в сравнении с Zn-удобрениями. Коэффициент интенсивности действия b 1 кг внесенной Cu на содержание Zn в почве в среднем за годы исследований в зависимости от культуры составлял 0,08 мг/кг (тысячелистник — табл. 4, уравнение 12), 0,34 мг/кг (пижма — табл. 4, уравнение 24).

Zn-удобрения в меньшей степени повышали содержание Cu в почве — 0,001 мг/кг (тысячелистник, пижма — табл. 4, уравнение 11; табл. 4, уравнение 23).

Из вышесказанного следует, что Cu-удобрения повышают содержание не только Cu в почве, но и Zn. Это позволяет сделать вывод о наличии синергизма между Cu и Zn, тем самым снизить антропогенную нагрузку на почву и растения при внесении микроудобрений.

Исследования, проведенные в 2012–2015 гг., дали возможность получить математические уравнения 1–24), отображающие зависимость содержания Zn и Cu в почве от доз применяемых микроудобрений. Эти уравнения позволяют связать накопление микроэлементов в почве с дозами применяемых микроудобрений.

Выявленные в ходе исследований коэффициенты интенсивности действия единицы поступившего в почву микроэлемента b (мг/кг) позволяют произвести ориентировочный прогноз накопления Zn и Cu в лугово-черноземной почве при внесении микроудобрений, используя формулу 1:

$$C_{\text{опт}} = D \cdot b + C_n, \quad (1)$$

где C_n и $C_{\text{опт}}$ — содержание микроэлемента в почве до C_n и после $C_{\text{опт}}$ применения удобрений, мг/кг почвы; D — оптимальная доза внесения микроэлемента, кг/га; b — коэффициент интенсивности действия, мг/кг почвы.

Подставив в формулу 25 лучшие дозы Zn (60 кг д. в. / га) и Cu (9,7, 7,2 кг д. в. / га) для конкретных лекарственных культур, получим оптимальные уровни содержания микроэлементов в системе «почва — растение» (табл. 5).

Для диагностирования микроэлементного питания многолетних лекарственных культур и в дальнейшем расчета доз применяемых микроудобрений наибольший интерес представляют уравнения 1, 2 (табл. 4) и 13, 14 (табл. 5).

Полученные на основе данных уравнений нормативные количественные характеристики (b_{Zn} — 0,01 мг/кг, 0,001 мг/кг, b_{Cu} — 0,003 мг/кг, 0,006 мг/кг) и установленные оптимальные параметры ($C_{\text{опт}}$) Zn и Cu в слое почвы 0–30 см (табл. 6) дают возможность рассчитать дозы удобрений (D) для создания оптимальных уровней элементов питания в почве для конкретных лекарственных культур по формуле 2:

$$D = (C_{\text{опт}} - C_{\phi}) / b, \text{ кг д. в. / га}, \quad (2)$$

Таблица 5. Оптимальные уровни содержания микроэлементов в лугово-черноземной почве для изучаемых лекарственных растений

Table 5. Optimal levels of trace elements in meadow-chnozem soil for the studied medicinal plants

Год жизни растений	Оптимальная доза, кг д. в. / га	Коэффициент интенсивности действия b	Cn, мг/кг	Прогнозирование Сопт, мг/кг	Фактическое содержание микроэлементов, мг/кг	Ошибка, %
Тысячелистник обыкновенный						
1-й год (2012 г.)	Zn ₆₀	0,01	1,01	1,61	1,6	-
	Cu _{9,7}	0,003	0,10	0,13	0,13	-
2-й год (2013 г.)	Zn ₆₀	0,03	1,25	3,1	2,8	10,7
	Cu _{9,7}	0,006	0,11	0,17	0,17	-
3-й год (2014 г.)	Zn ₆₀	0,04	0,99	3,4	3,1	9,7
	Cu _{9,7}	0,006	0,12	0,18	0,18	-
4-й год (2015 г.)	Zn ₆₀	0,02	1,70	2,9	2,7	7,4
	Cu _{9,7}	0,004	0,11	0,15	0,15	-
В среднем за 2012–2015 гг.	Zn ₆₀	0,02	1,24	2,4	2,5	-4,0
	Cu _{9,7}	0,005	0,11	0,16	0,17	-5,9
Пижма обыкновенная						
1-й год (2012 г.)	Zn ₆₀	0,001	0,71	0,77	0,79	-2,5
	Cu _{7,2}	0,006	0,10	0,14	0,14	-
2-й год (2013 г.)	Zn ₆₀	0,06	0,87	4,5	5,0	-10,0
	Cu _{7,2}	0,012	0,12	0,21	0,21	-
3-й год (2014 г.)	Zn ₆₀	0,14	0,99	9,4	8,8	6,8
	Cu _{7,2}	0,015	0,18	0,29	0,29	-
4-й год (2015 г.)	Zn ₆₀	0,32	1,66	20,9	19,2	8,9
	Cu _{7,2}	0,006	0,13	0,17	0,18	-5,6
В среднем за 2012–2015 гг.	Zn ₆₀	0,13	1,06	8,9	8,5	4,7
	Cu _{7,2}	0,01	0,13	0,20	0,21	-4,8

где C_{ϕ} — фактическое содержание Zn и Cu в почве, мг/кг; b — коэффициент интенсивности действия удобрения на создание элемента питания в почве.

Подставив в формулу 2 оптимальные уровни содержания Zn и Cu в почве, коэффициенты интенсивности

действия микроудобрений b на химический состав почвы, формулы расчета оптимальных доз Zn- и Cu-удобрений для лекарственных растений будут иметь вид:

$$D_{Zn} = (1,61_{опт} - 1,01_{\phi}) / 0,01 = 60 \text{ кг д. в. / га} \quad (3)$$

$$D_{Cu} = (0,13_{опт} - 0,10_{\phi}) / 0,003 = 10 \text{ кг д. в. / га} \quad (4)$$

$$D_{Zn} = (0,77_{опт} - 0,71_{\phi}) / 0,001 = 60 \text{ кг д. в. / га} \quad (5)$$

$$D_{Cu} = (0,14_{опт} - 0,10_{\phi}) / 0,006 = 6,7 \text{ кг д. в. / га} \quad (6)$$

Таким образом, установленные количественные характеристики между химическим составом почвы и внесенными дозами микроэлементов в почву имеют большое значение при разработке системы применения удобрений под конкретную культуру.

Выводы / Conclusions

На основании проведенных исследований и выявленных математических зависимостей установлены коэффициенты интенсивности действия единицы Zn и Cu, внесенных в составе удобрения в почву, на ее химический состав (содержание подвижных Zn и Cu): b_{Zn} и b_{Cu} — 0,01 и 0,003 (тысячелистник) и 0,001 и 0,006 (пижма). Определены оптимальные уровни содержания подвижных форм Zn и Cu в лугово-черноземной почве для: тысячелистника обыкновенного — 2,5 мг/кг и 0,17 мг/кг, пижмы обыкновенной —

8,5 мг/кг и 0,21 мг/кг соответственно.

Установленные оптимальные уровни содержания микроэлементов в почве, коэффициенты интенсивности действия Zn и Cu позволяют проводить расчеты доз микроудобрений в основное внесение.

Автор несет ответственность за свою научную работу и представленные данные в научной статье.

The author is responsible for his scientific work and the data presented in the scientific article.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Черкашина Е.В., Шурухина А.Н. Развитие и совершенствование эфиромасличной и лекарственной отрасли. *Известия Дагестанского ГАУ*. 2020; 3(7): 59–65.
- Козко А.А., Цицилин А.Н. Перспективы и проблемы возрождения лекарственного растениеводства в России. *Биология растений и садоводство: теория, инновации*. 2018; 146: 18–25.
- Загумеников В.Б., Дмитрук С.Е., Загуменикова Т.Н. [и др.] Возделывание лекарственных растений в условиях Западной Сибири и Центрального Казахстана. Томск: ЗАО «Издательство научно-технической литературы». 2001; 196.
- Аникина А.Ю., Басалаева И.В., Бушковская Л.М. [и др.]. Лекарственные и эфиромасличные культуры: особенности возделывания на территории Российской Федерации. Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лекарственных и ароматических растений». 2021; 256.
- Аристархов А.Н., Виноградов В.В., Яковлева Т.А. Эффективность разных форм и доз цинковых удобрений при внесении под яровую и озимую пшеницу *Triticum aestivum* L. в Нечерноземье. *Проблемы агрохимии и экологии*. 2019; 4: 39–42. DOI 10.26178/AE.2019.17.13.004

REFERENCES

- Cherkashina E.V., Shurukhina A.N. Development and improvement of the ethereal and medicinal industry. *Proceedings of Dagestan State Agrarian University*. 2020; 3(7): 59–65 (In Russian).
- Kozko A.A., Tsitsilin A.N. Prospects and problems of revival of medicinal plant growing in Russia. *Plant biology and horticulture: theory, innovations*. 2018; 146: 18–25 (In Russian).
- Zagumennikov V.B., Dmitruk S.E., Zagumennikova T.N. [et al.] Cultivation of medicinal plants in the conditions of Western Siberia and Central Kazakhstan. Tomsk: ZAO Publishers of Scientific and Technical Literature. 2001; 196 (In Russian).
- Anikina A.Y., Basalaeva I.V., Bushkovskaya L.M. [et al.] Medicinal and essential oil-bearing crops: peculiarities of cultivation in the Russian Federation. Moscow: Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Research Institute of Medicinal and Aromatic Plants». 2021; 256 (In Russian).
- Aristarkhov A.N., Vinogradov V.V., Yakovleva T.A. Effectiveness of different forms and doses of zinc fertilizers when applied to spring and winter wheat *Triticum aestivum* L. in Non-Chernozem region. *Problems of agrochemistry and ecology*. 2019; 4: 39–42 (In Russian). DOI 10.26178/AE.2019.17.13.004

6. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях. Москва: Мир. 1989; 439.
7. Жаркова Н.Н., Сухоцкая В.В., Ермохин Ю.И. Содержание некоторых биологически активных веществ и химических элементов в лекарственном сырье *Echinacea purpurea* (L.) Moench под влиянием эссенциального микроэлемента Cu. *Сельскохозяйственная биология*. 2020; 55(3): 588–596. DOI 10.15389/agrobiology.2020.3.588rus
8. Пейве Я.В. Агрохимия и биохимия микроэлементов. Москва: Наука. 1980; 430.
9. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Ковалев С.С., Осипов М.А. Влияние микроудобрений на продуктивность агроценоза ячменя озимого при его размещении на черноземе выщелоченном Западного Предкавказья. Энтузиасты аграрной науки. *Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 310-летию Йогану Готтшальку Вальериусу и 90-летию академика Ефимова Виктора Никифоровича*. Краснодар. 2019; 156–165.
10. Дериглазова Г.М., Митрохина О.А., Боева Н.Н. Значение некорневой обработки отдельными микроэлементами и комплексными удобрениями посевов зерновых культур. *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2011; 3: 45–47.
11. Митрохина О.А. Оценка содержания и баланса основных микроэлементов в пахотных почвах ЦЧР. *Агрохимический вестник*. 2020; 5: 58–64. DOI 10.24411/1029-2551-2020-10070
12. Monreal C.M., DeRosa M., Mallubhotla S.C. et al. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. *Biol. Fertil. Soils* 2016; 52(3): 423–437. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
13. Oliver M.A., Gregory P.J. Soil, food security and human health: a review *Eur. J. Soil Sci.* 2015; 66: 257–276. <https://doi.org/10.1111/ejss.12216>
14. Voortman R., Bindraban P.S. Beyond N and P: Toward a Land Resource Ecology Perspective and Impactful Fertilizer Interventions in Sub-Saharan Africa. VFRC Report 2015/1. Virtual Fertilizer Research Center. Washington D.C. 2015; 49.
15. Аристархов А.Н., Кирпичников Н.А., Виноградов В.В. Эффективность применения цинковых удобрений под озимую пшеницу. *Плодородие*. 2019; 2(107): 7–11. DOI 10.25680/S19948603.2019.107.02
16. Красницкий В.М. Эколого-агрохимическая оценка плодородия почв и эффективности применения удобрений в Западной Сибири: дисс. ... д-ра с.-х. наук. Омск. 2002; 52.
17. Брыкин А.И. Проведение полевых опытов с лекарственными культурами Москва: Минмедпром. 1981; 60.
18. Майсурадзе Н.И. Методика исследований при интродукции лекарственных растений. Обзорная информация. Москва: ЦБНТИ Медпром. 1984; 32.
19. Тищенко Н.Н. Диагностика минерального питания, эффективности удобрений, величины и качества урожая тысячелистника обыкновенного *Achillea millefolium* L. на лугово-черноземной почве Западной Сибири: автореферат диссертации кандидат сельскохозяйственных наук. Омск. 2010; 16.
20. Ермаков В.В. Современные тенденции развития биогеохимии в условиях техногенеза биосферы. Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах. *Сборник материалов II Международной школы-семинара для молодых исследователей «Биогеохимия химических элементов и соединений в природных средах», посвященной памяти профессора В.Б. Ильина. Тюмень*. 2020; 9–27.
21. Ермохин Ю.И., Красницкий В.М. Введение йода в систему «почва — растение — идентификация ответной реакции растений» по изменению содержания макро- и микроэлементов. Современные достижения в экологии, почвоведении и земледелии. *Сборник материалов Междуна. науч.-практ. конф.* Кокшетау. 2019; 544–554.
22. Ермохин Ю.И., Синдирева А.В. О взаимосвязях в питании растений и применении удобрений. Плодородие почв и оценка продуктивности земледелия. *Материалы научно-производственной конференции с международным участием*. Тюмень. 2018; 118–132.
23. Жаркова Н.Н., Сухоцкая В.В., Ермохин Ю.И. Оценка элементного химического состава лекарственного сырья *Achillea millefolium* L. и *Echinacea purpurea* L. при внесении в почву цинка и меди. *Земледелие*. 2021; 1: 19–22. DOI 10.24411/0044-3913-2021-10105
6. Kabata-Pendias A., Pendias H. Micronutrients in soils and plants. Moscow: Mir. 1989; 439 (In Russian).
7. Zharkova N.N., Sukhotskaya V.V., Ermokhin Y.I. The content of some biologically active substances and chemical elements in medicinal raw materials *Echinacea purpurea* (L.) Moench under the influence of the essential trace element Cu. *Agricultural Biology*. 2020; 55(3): 588–596 (In Russian). DOI 10.15389/agrobiology.2020.3.588rus
8. Peyve Y.V. Agrochemistry and biochemistry of microelements. Moscow: Nauka. 1980; 430 (In Russian).
9. Sheudzen A.Kh., Bondareva T.N., Kovalev S.S., Osipov M.A. Effect of microfertilizers on the productivity of winter barley agrocenosis in its placement on leached chernozem of the Western Caucasus. Enthusiasts of Agrarian Science. *Collection of articles on the materials of the All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 310th anniversary of Johan Gottschalk Wallerius and the 90th anniversary of Academician Efimov Viktor Nikiforovich*. Krasnodar. 2019; 156–165 (In Russian).
10. Deriglazova G.M., Mitrokhina O.A., Boeva N.N. The significance of foliar treatment with separate microelements and complex fertilizers of grain crops. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*. 2011; 3: 45–47 (In Russian).
11. Mitrokhina O.A. Evaluation of the content and balance of major trace elements in arable soils of the Central Chernobyl Region. *Agrochemical Bulletin*. 2020; 5: 58–64 (In Russian). DOI 10.24411/1029-2551-2020-10070
12. Monreal C.M., DeRosa M., Mallubhotla S.C. et al. Nanotechnologies for increasing the crop use efficiency of fertilizer-micronutrients. *Biol. Fertil. Soils* 2016; 52(3): 423–437. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1073-5>
13. Oliver M.A., Gregory P.J. Soil, food security and human health: a review *Eur. J. Soil Sci.* 2015; 66: 257–276. <https://doi.org/10.1111/ejss.12216>
14. Voortman R., Bindraban P.S. Beyond N and P: Toward a Land Resource Ecology Perspective and Impactful Fertilizer Interventions in Sub-Saharan Africa. VFRC Report 2015/1. Virtual Fertilizer Research Center. Washington D.C. 2015; 49.
15. Aristarkhov A.N., Kirpichnikov N.A., Vinogradov V.V. Effectiveness of zinc fertilizers for winter wheat. *Fertility*. 2019; 2(107): 7–11 (In Russian). DOI 10.25680/S19948603.2019.107.02
16. Krasnitsky V.M. Ecological and agrochemical assessment of soil fertility and the effectiveness of fertilizers in Western Siberia: diss. ... Doctor of Agricultural Sciences. Omsk. 2002; 52 (In Russian).
17. Brykin A.I. Conducting field experiments with medicinal crops Moscow: Minmedprom. 1981; 60 (In Russian).
18. Maisuradze N.I. Research methods in the introduction of medicinal plants. Review information. Moscow: Central Bureau of Scientific and Technical Information Medprom. 1984; 32 (In Russian).
19. Tishchenko N.N. Diagnostics of mineral nutrition, the effectiveness of fertilizers, the size and quality of the yield of yarrow *Achillea millefolium* L. on the meadow-chernozem soil of Western Siberia: dissertation abstract candidate of agricultural sciences. Omsk. 2010; 16 (In Russian).
20. Ermakov V.V. Modern trends in the development of biogeochemistry in the conditions of technogenesis of the biosphere. Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments. Collection of materials of the II International School-seminar for young researchers «Biogeochemistry of chemical elements and compounds in natural environments», dedicated to the memory of Professor V.B. Ilyin. Tyumen. 2020; 9–27.
21. Ermokhin Y.I., Krasnitsky V.M. Introduction of iodine into the «soil — plant — identification of plant response» system for changes in the content of macro- and microelements. Modern achievements in ecology, soil science and agriculture. Collection of materials of the International Scientific and Practical Conference. Kokshetau. 2019; 544–554. (In Russian).
22. Ermokhin Y.I., Sindireva A.V. On the relationship in plant nutrition and fertilizer application. Soil fertility and assessment of agricultural productivity. *Materials of the scientific and production conference with international participation*. Tyumen. 2018; 118–132 (In Russian).
23. Zharkova N.N., Sukhotskaya V.V., Ermokhin Y.I. Assessment of the elemental chemical composition of medicinal raw materials *Achillea millefolium* L. and *Echinacea purpurea* L. when applying zinc and copper in the soil. *Farming*. 2021; 1: 19–22 (In Russian). DOI 10.24411/0044-3913-2021-10105

ОБ АВТОРАХ:

Наталья Николаевна Жаркова, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Институтская пл., 1, г. Омск, 644008, Российская Федерация
E-mail: nn.zharkova@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-2970-328X>

ABOUT THE AUTHORS:

Natalya Nikolaevna Zharkova, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1, Institutskaya sq., Omsk, 644008, Russian Federation
E-mail: nn.zharkova@omgau.org
<https://orcid.org/0000-0003-2970-328X>