

УДК 631.416.9

DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178



Ссылки для цитирования:

Кучеренко А.В., Бирюкова О.А. Содержание микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2025. Вып. 123. С. 148-178. DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178

Cite this article as:

Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis, Dokuchaev Soil Bulletin, 2025, V. 123, pp. 148-178, DOI: 10.19047/0136-1694-2025-123-148-178

Содержание микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза

© 2025 г. А. В. Кучеренко*, О. А. Бирюкова**

*Южный федеральный университет,
Академия биологии и биотехнологии им. Д. И. Ивановского, Россия,
344080, Ростов-на-Дону, пр-т Стачки, 194/1,*

*<https://orcid.org/0000-0003-4759-7185>, e-mail: alkucherenko@bk.ru,

**<https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>, e-mail: oabirukova@sfnu.ru.

*Поступила в редакцию 11.11.2024, после доработки 13.02.2025,
принята к публикации 03.06.2025*

Резюме: Устойчивое функционирование плодовых агроценозов и получение экологически чистой продукции невозможны без оценки микроэлементного состава почв. В работе представлены результаты изучения содержания и распределения меди, марганца, цинка, железа и никеля в черноземе южном при возделывании черешни (*Prunus avium* L.) в южной зоне садоводства Ростовской области. Отбор почвенных образцов осуществляли по слоям: 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см. Для всех рассматриваемых элементов установлен аккумулятивный тип профильного распределения с наибольшим накоплением в гумусово-аккумулятивном горизонте 0–40 см. Определены запасы микроэлементов в метровом слое почвы. По уровню содержания Cu, Mn, Zn, Fe и Ni можно расположить в следующих убывающих рядах: валовые – Fe > Mn > Zn > Ni > Cu; подвижные – Mn > Fe > Cu > Ni > Zn. Доля подвижных Cu, Zn, Ni, Fe от их общего содержания во всех слоях чернозема южного очень низкая – от 0.02 до 0.45%, для Mn – от 1.67 до 2.04%. Выявлено,

что содержание карбонатов является одним из ключевых факторов, определяющих подвижность микроэлементов в черноземе южном. Установлена обратная корреляционная связь между исследуемыми подвижными соединениями микроэлементов и количеством карбонатов (для Cu $r = -0.88$, для Mn $r = -0.85$, для Zn $r = -0.74$, для Ni $r = -0.85$ и для Fe $r = -0.84$ при $p < 0.05$). Количество Cu, Mn, Zn, Fe и Ni в черноземе южном на территории плодового агроценоза соответствует региональным нормам и не выходит за рамки предельно допустимых концентраций.

Ключевые слова: чернозем южный; микроэлементы; агрохимические показатели; черешня; плодовой агроценоз.

Content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis

© 2025 A. V. Kucherenko*, O. A. Biryukova**

*Southern Federal University,
Academy of Biology and Biotechnologies named after D. I. Ivanovsky,
194/1 Stachki Ave., Rostov-on-Don 344080, Russian Federation,*

*<https://orcid.org/0000-0003-4759-7185>, e-mail: alkucherenko@bk.ru,

**<https://orcid.org/0000-0001-9748-3296>, e-mail: oabirukova@sfedu.ru.

Received 11.11.2024, Revised 13.02.2025, Accepted 03.06.2025

Abstract: Sustainable functioning of fruit agrocenoses and obtaining ecologically clean products are impossible without assessing the microelement content in soils. The paper presents the results of studying the content and distribution of copper, manganese, zinc, iron and nickel in calcic chernozem under cherry (*Prunus avium* L.) cultivated in the southern horticultural zone of the Rostov region. Soil samples were collected from the following layers: 0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm. The accumulative type of profile distribution with the greatest concentration in the humus-accumulative horizon 0–40 cm was established for all the elements under consideration. The stocks of trace elements in the metre layer of soil were determined. According to content levels Cu, Mn, Zn, Fe and Ni can be arranged in the following decreasing series: gross content – Fe > Mn > Zn > Ni > Cu, mobile forms – Mn > Fe > Cu > Ni > Zn. The share of mobile Cu, Zn, Ni, Fe from their total content in all layers of calcic chernozem is very low and vary from 0.02 to 0.45%, for Mn – from 1.67 to 2.04%. It was revealed that the carbonate content is one of the key factors determining the mobility of trace elements in calcic chernozem. An inverse correlation has been established between the studied mobile compounds of trace elements and the amount of carbonates

(for Cu $r = -0.88$, for Mn $r = -0.85$, for Zn $r = -0.74$, for Ni $r = -0.85$ and for Fe $r = -0.84$ at $p < 0.05$). The amount of copper, manganese, zinc, iron and nickel in calcic chernozem in fruit agrocenosis corresponds to regional norms and does not exceed the maximum permissible concentrations.

Keywords: calcic chernozem; trace element; soil fertility parameter; cherry; fruit agrocenosis.

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание плодовых культур на юге России играет важную роль в экономике страны и обеспечивает ее продовольственную безопасность. По данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области, урожай косточковых культур (черешня, вишня, сливы, абрикосы) на Дону в 2022 г. более чем в два раза превысил показатели 2021 г. и составил 4 100 т (Зональные системы земледелия..., 2022). Черешня представляет собой значимую плодовую культуру в сельском хозяйстве благодаря своей способности приносить высокие урожаи на протяжении многих лет. Плоды содержат множество полезных витаминов и биологически активных соединений, таких как легкоусвояемые сахара, органические кислоты, пектиновые, дубильные и минеральные вещества, что делает их ценным источником питательных веществ (Абызова, 2009; Берлова, 2020).

Создание высокопродуктивных, ресурсоэнергоёмких и экологически устойчивых садовых агроценозов требует учета всех почвенных характеристик. Существуют общепринятые критерии для оценки пригодности почвы для сада, в которых учитывается мощность рыхлого слоя, гранулометрический состав, физическое состояние, реакция среды (pH), содержание солей, солонцеватость, глубина залегания грунтовых вод и прочие факторы (Бузоверов и др., 2017; Котельникова, 2021; Методические указания..., 2003; Черников, 2015). В связи с этим становится очевидной потребность в тщательном исследовании элементного состава почвы. Важность изучения содержания микроэлементов, особенно их подвижных соединений, имеет решающее значение для понимания процессов их биодоступности, потенциальной токсичности и воздействия на окружающую среду в сельскохозяйственных районах, подверженных интенсивной антропогенной нагрузке. Это

важно также для регулирования биологических процессов растений и обеспечения высокой и стабильной урожайности.

К микроэлементам, необходимым всем высшим растениям, относятся медь (Cu), марганец (Mn), цинк (Zn), железо (Fe) и никель (Ni). Они участвуют практически во всех метаболических и клеточных функциях: энергетический обмен, первичный и вторичный метаболизм, фотосинтез, защита клеток, стабилизация дыхания, передача сигналов и размножение. Содержание и миграционная активность микроэлементов определяется типом почвы, характером материнских пород и растительности, микробиологической активностью почвы, реакцией среды, содержанием органического вещества и другими геохимическими барьерами (Горбунова, Протасова, 2008; Михайлова, 2019; Зонн, 1982; Kabata-Pendias, 2011).

Оптимальный диапазон содержания микроэлементов по сравнению с макроэлементами невелик, так как незначительный избыток или дефицит может привести к снижению урожайности. В садоводстве недостаток меди, марганца, цинка, железа и никеля часто становится причиной возникновения суховершинности (экзантемы), межжилкового хлороза молодых листьев и других физиологических заболеваний, а также задержки роста и цветения растений, уменьшения размера плодов, что приводит к снижению урожайности. При этом избыточное содержание указанных микроэлементов, способных накапливаться в результате продолжительного использования минеральных удобрений и средств защиты растений в условиях монокультуры, также способно оказывать негативное влияние на получаемую продукцию и здоровье человека. Поэтому все более актуальным становится изучение микроэлементов, которые во многом определяют качество и количество получаемой продукции (Водяницкий, 2003; Гуляева, 2022; Жизневская, 1961; Протасова, Щербаков, 2003).

Цель исследования заключается в изучении валового содержания и подвижных соединений меди, марганца, цинка, железа и никеля по профилю чернозема южного при возделывании черешни.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на базе сельскохозяйственного предприятия ОАО “Янтарное”, которое расположено в Мартыновском районе Ростовской области, в южной зоне садоводства региона (рис. 1). По условиям влагообеспеченности территория исследования относится к “очень засушливому” агроклиматическому району с гидротермическим коэффициентом (ГТК) менее 0.7 и годовым количеством осадков менее 400 мм. По теплообеспеченности теплого периода года регион классифицируется как умеренно жаркий, с суммой активных температур выше 10 °С в пределах 3 200–3 400 °С. Зима характеризуется как умеренно холодная, поскольку средний годовой минимум температуры воздуха составляет ниже 25 °С, а средний абсолютный минимум температуры на глубине залегания узла кущения озимых колеблется ниже 10 °С (Зональные системы земледелия..., 2022).

Почвенный покров территории исследования представлен черноземом южным среднесиловым тяжелосуглинистым на лёссовидном суглинке, или Calcic Chernozems в соответствии с Международной классификацией почв (World Reference Base..., 2022). Средневзвешенное содержание органического вещества в гумусово-аккумулятивном слое (0–60 см) соответствует низкому уровню. Реакция почвенной среды варьирует от нейтральной до слабощелочной в нижней части профиля (табл. 1). Содержание карбонатов в верхних горизонтах чернозема южного находится в пределах 2.12–7.40%, а на глубине 60–100 см колеблется от 9.52 до 9.68%. Вскипание от 10%-ной соляной кислоты наблюдалось с поверхности.

Возделывание черешни (*Cerasus avium*) на исследуемых участках ведется на протяжении 20 лет. Сорт черешни Лапинс – сильнорослый самоплодный крупный. Плодоношение имеет среднепоздний характер (с середины июня и до конца июля) (Зайнутдинов и др., 2022; Колесникова, 2003). Согласно актам посадки, на одном га располагается 420 плодовых деревьев.

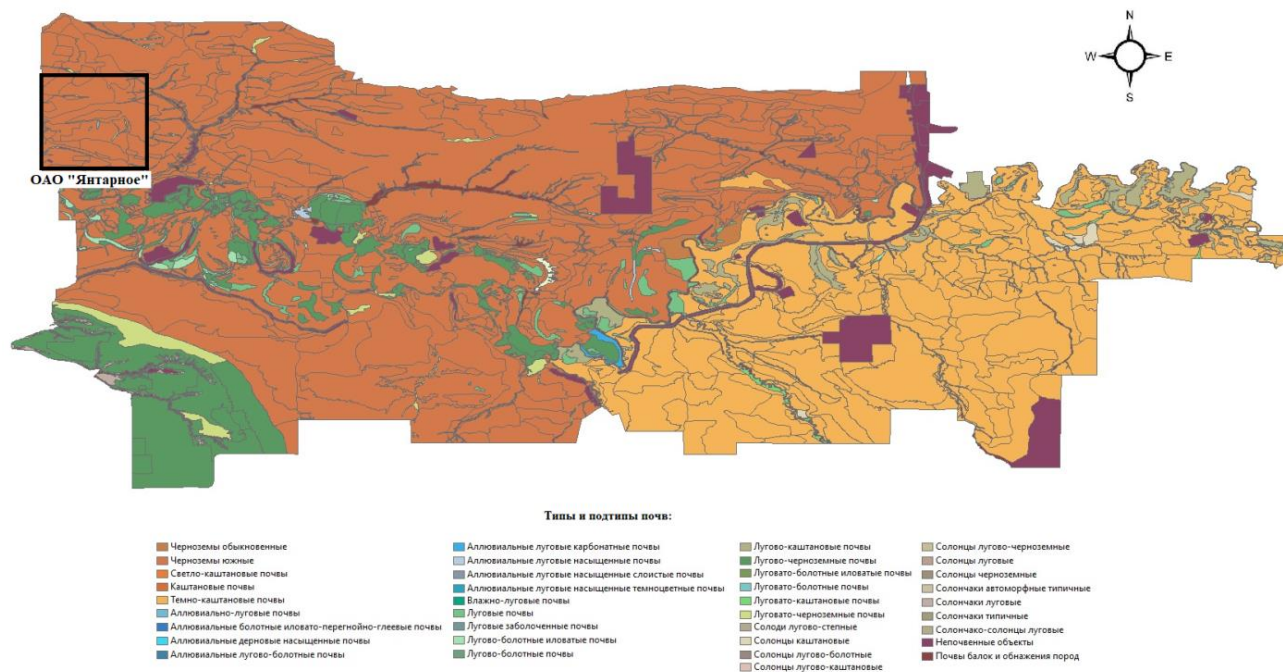


Рис. 1. Карта-схема почвенного покрова ОАО "Янтарное" Мартыновского района Ростовской области.
Fig. 1. Map-scheme of soil cover of JSC "Yantarnoye" Martynovsky district of Rostov region.

Таблица 1. Агрохимическая характеристика и гранулометрический состав чернозема южного плодового агроценоза

Table 1. Agrochemical characteristics and granulometric composition of calcic chernozem in fruit agrocenosis

Слой, см	pH_{H_2O}	$C_{орг}, \%$	$CaCO_3, \%$	Содержание фракций (размер частиц, мм), %	
				< 0.01	< 0.001
0–20	7.1 ± 0.1	2.1 ± 0.4	2.12 ± 0.3	34.9	17.1
20–40	7.3 ± 0.1	2.0 ± 0.4	2.09 ± 0.3	34.1	16.9
40–60	7.3 ± 0.1	1.9 ± 0.4	7.40 ± 1.0	29.5	21.5
60–80	7.5 ± 0.1	1.8 ± 0.4	9.52 ± 1.3	28.7	21.3
80–100	7.7 ± 0.1	1.8 ± 0.4	9.68 ± 1.3	24.5	28.5

Для боронования, дискования, культивации, пахоты, опрыскивания насаждений, внесения удобрений применяли гусеничные тракторы класса 2-3 Т-54В, Т-74 и ДТ-75, а для более легких работ по уходу за садами и перевозок – колесные тракторы МТЗ-80, МТЗ-82.

В начале мая проводили совместную обработку фунгицидом “Раек” (действующее вещество (д. в.): дифеноконазол) и инсектицидом “Кунгфу” (д. в.: лямбда-цигалотрин) с нормой расхода препаратов 0.2 и 0.4 л/га соответственно, а в конце месяца – фунгицидом “Грануфло” (д. в.: тиаметоксам) с инсектицидом “Кунгфу Супер” (д. в.: тиаметоксам + лямбда-цигалотрин) согласно регламентам применения: 2.0 кг/га и 0.15 л/га соответственно. На стадии бутонизации – начала цветения применяли листовую обработку “Новалоном” (19–19–19 + 2MgO + МЭ (Mn 0.035%, Cu 0.015%, Mo 0.002%, S 1.5%, Fe 0.08%, Zn 0.035%, B 0.02%)) в дозе 2 кг/га.

Исследуемая территория характеризуется однородным почвенным покровом, поэтому для репрезентативности отобранных проб на двух производственных участках общей площадью около 17.7 га было выделено четыре элементарных участка, каждый по 4.5 га, на которых заложили почвенные разрезы. Отбор образцов по слоям (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см) был проведен согласно ГОСТ Р 58595–2019 и “Методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения”. Общее содержание меди, марганца, цинка, железа, никеля определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на приборе “Спектроскан МАКС – GV” (Методические указания..., 1992). Определение содержания подвижных соединений микроэлементов проводилось атомно-абсорбционным способом после их извлечения ацетатно-аммонийным буферным раствором с pH 4.8 (Минеев и др., 2001). Органическое вещество определяли в соответствии с ГОСТ 26213–2021; pH водной вытяжки – ГОСТ 26423–85. Плотность сложения почв определяли буровым методом, количество карбонатов – объемным методом с помощью кальциметра Шейблера (Безуглова, Морозов, 1987). Гранулометрический состав – методом пипетки (Вадюнина, Корчагина, 1986).

Средневзвешенное содержание органического вещества в

гумусово-аккумулятивном слое (0–60 см) определяли по формуле:

$$C_{\text{орг. средневзв. \%}} = \frac{(a_1 \cdot 20) + (a_2 \cdot 20) + (a_3 \cdot 20)}{60},$$

где $a_{1,2,3}$ – содержание органического вещества в слоях почвы 0–20, 20–40, 40–60 см соответственно, %; 60 – мощность гумусово-аккумулятивного слоя, см.

Для изучения процесса накопления и перемещения микро-элементов по профилю чернозема южного рассчитывали коэффициент радиальной дифференциации по формуле (Глазовская, 1988; Ковальчик и др., 2017):

$$R = \frac{C_{\text{в.г.}}}{C_{\text{н.г.}}},$$

где $C_{\text{в.г.}}$ – количество элемента в верхнем горизонте, мг/кг; $C_{\text{н.г.}}$ – количество элемента в нижнем слое почвы, мг/кг. При $R > 1$ элемент накапливается в верхнем слое почвы, если же $R < 1$, то происходит его вынос.

Для определения степени контрастности радиальной дифференциации использовали градацию, предложенную И.А. Авессаломовой (2012). Если $R > 1$: слабая (1–1.5), средняя (1.5–5.0), сильная (> 5.0). При $R < 1$ слабая контрастность соответствует значениям 1–0.5, средняя – < 0.5 .

Запасы микроэлементов (ЗМЭ) в черноземе южном рассчитывались по формуле (Асылбаев, 2015; Корчагина и др., 2014):

$$\text{ЗМЭ} \left(\frac{\text{кг}}{\text{га}} \right) = \frac{a \cdot h \cdot d \cdot 10^7}{10^6} = a \cdot h \cdot d \cdot 10,$$

где a – содержание элемента в слое почвы, мг/кг; h – глубина слоя, м; d – плотность почвы, г/см³; 10^7 – коэффициент пересчета массы слоя почвы 1 га в кг; 10^6 – коэффициент пересчета мг в кг.

Согласно ГОСТ Р 70281-2022, цинк относится к химическим веществам 1-го класса опасности, медь и никель – 2-го, марганец – 3-го. В качестве ориентира для оценки загрязнения почвы валовыми и подвижными соединениями этих элементов использовали предельно допустимые концентрации (ПДК), утвержденные Сан-ПиН 1.2.3685–21.

В связи с продолжительным возделыванием черешни в условиях монокультуры, использованием на протяжении долгих лет минеральных удобрений и средств защиты растений возникает необходимость в эколого-геохимической оценке состояния почвы, которая учитывает коэффициент концентрации химического вещества (K_c) и суммарный показатель загрязнения (Z_c). K_c определяется как отношение фактического содержания i -го химического элемента (C_i) в почвенной пробе к его фоновой концентрации (C_{fi}) (Ковальчик и др., 2017; Шацкая и др., 2020). Фоновое содержание Cu, Mn и Zn взяты у В.А. Акимцева (1962), а Ni и Fe – у Е.И. Гончарука (1986).

По формуле Ю.Е. Саета определяли суммарный показатель загрязнения почвы (Ковальчик и др., 2017; Шацкая и др., 2020):

$$Z_c = K_c - (n - 1),$$

где K_c – сумма коэффициентов концентрации компонентов загрязнения; n – количество учитываемых загрязняющих веществ с $K_c > 1.0$.

Категорию суммарного загрязнения почв определяли по существующим параметрам: допустимая ($Z_c < 16$), умеренно опасная ($16 < Z_c < 32$), опасная ($32 < Z_c < 128$), чрезвычайно опасная ($Z_c > 128$) (Ковальчик и др., 2017; Корчагина и др., 2014; Гигиенические нормативы..., 2021; Шацкая и др., 2020).

Корреляционный анализ полученных результатов проводили в программе Microsoft Excel. Аппроксимация экспериментальных данных реализована путем построения диаграммы по исходным данным с последующим подбором подходящей аппроксимирующей функции (линии тренда) (Курзаева, 2016). Коэффициент детерминации позволяет оценить точность аппроксимации и может принимать значения от 0 до 1:

- если $R^2 \geq 0.95$, то это свидетельствует о высокой точности аппроксимации;

- при $0.75 \leq R^2 < 0.95$ аппроксимация оценивается как удовлетворительная, модель в целом адекватно описывает явление;

- если $0.5 \leq R^2 < 0.75$, это указывает на слабую аппроксимацию, в таком случае модель слабо описывает явление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общее содержание меди, марганца, цинка, никеля и железа в гумусово-аккумулятивном горизонте чернозема южного плодowego агроценоза составляло соответственно – 58.3, 803.5, 98.7, 64.3, 39 703 мг/кг (рис. 2). Вниз по профилю почвы происходит снижение количества этих элементов.

Согласно данным статистического анализа, коэффициент детерминации для валового никеля составляет 0.98 (рис. 2d), что указывает на высокую точность аппроксимации ($R^2 \geq 0.95$); для меди $R^2 = 0.94$ (рис. 2a), для марганца $R^2 = 0.88$ (рис. 2b), для цинка $R^2 = 0.91$ (рис. 2c), для железа $R^2 = 0.94$ (рис. 2e), что говорит об адекватном описании явления ($0.75 \leq R^2 < 0.95$).

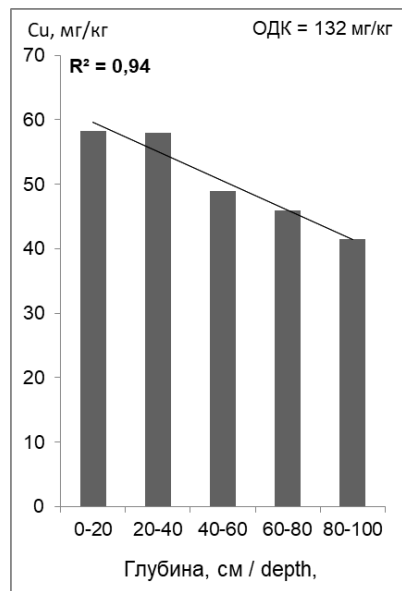
Вычисленные коэффициенты радиальной дифференциации, указывают на поверхностно-аккумулятивный тип профильного распределения при слабой степени контрастности (рис. 3) (Авессаламова, 2012; Минкина и др., 2017).

Ресурсный подход в оценке качества почв позволяет оценить запасы микроэлементов в метровой толще почвы в расчете на единицу площади (Корчагина и др., 2014). Согласно полученным данным, чернозем южный обладает довольно высокими запасами валовых микроэлементов в слое почвы 0–100 см. По этому показателю их ряд накопления в черноземе южном плодowego агроценоза выглядит следующим образом: Fe > Mn > Zn > Ni > Cu (табл. 2).

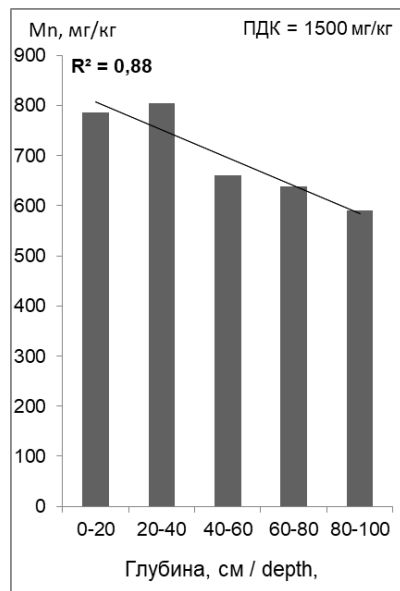
Таблица 2. Запасы валового содержания микроэлементов в черноземе южном плодowego агроценоза (0–100 см), кг/га

Table 2. Stocks of gross content of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocnosis (0–100 cm), kg/ha

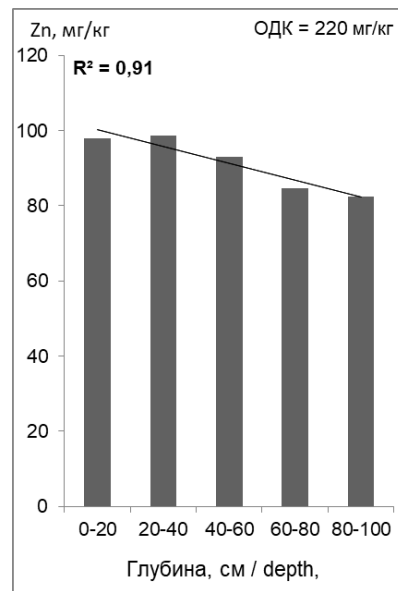
Cu	Ni	Zn	Fe	Mn
131.84	148.99	238.64	93194.87	1814.71



(a)



(b)



(c)

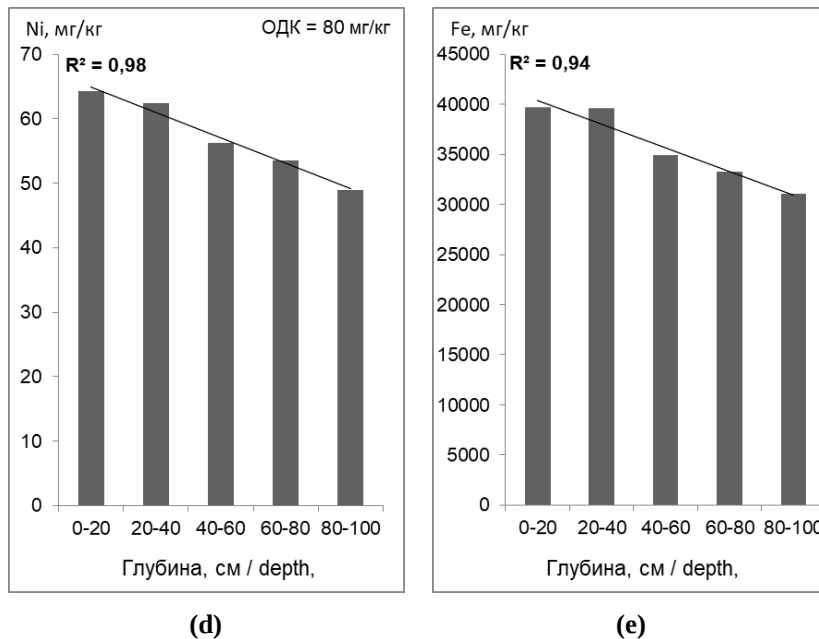


Рис. 2. Распределение валового содержания Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) по профилю чернозема южного плодового агроценоза, мг/кг почвы.

Fig. 2. Distribution of gross content of Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) in the profile of calcic chernozem in fruit agrocenosis, mg/kg of soil.

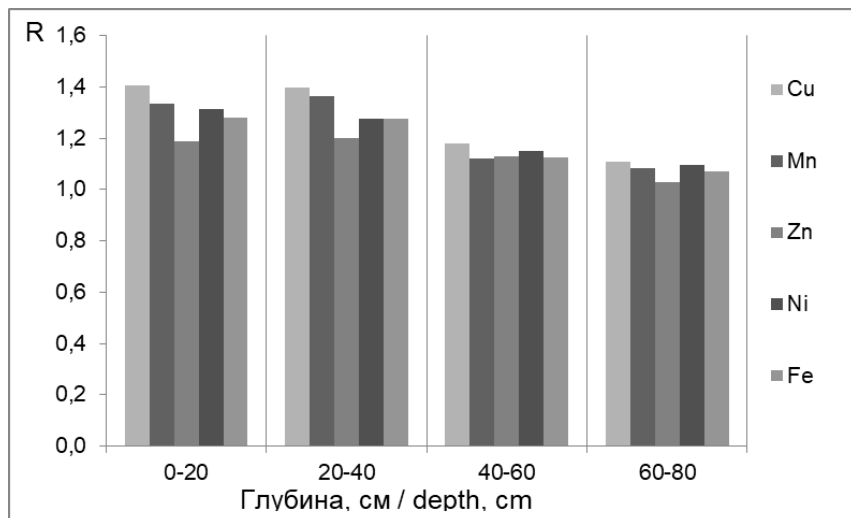


Рис. 3. Радиальная дифференциации общего содержания Cu, Mn, Zn, Ni, Fe по профилю чернозема южного.

Fig. 3. Radial differentiation of the gross content of Cu, Mn, Zn, Ni, Fe in the profile of calcic chernozem.

Тяжелые металлы в почве садовых агроценозов могут обнаруживаться не только из-за техногенного загрязнения. Причиной может быть длительное выращивание в условиях монокультуры, а также использование удобрений и средств защиты растений. В минеральных удобрениях тяжелые металлы присутствуют в качестве примесей. Больше всего ими обогащены фосфорные удобрения, в которых концентрация тяжелых металлов может достигать следующих значений: Mn – 2 942, Cu – 1 000, Zn – 3 000, Ni – 32, Fe – 1 650 мг/кг. Азотные и калийные удобрения в наибольших количествах имеют примеси Mn, Cu, Zn, Ni, Fe – до 1 000 мг/кг (Карпова, 2006; Санжарова и др., 2019). Для установления суммарного показателя загрязнения чернозема южного рассчитаны коэффициенты концентрации каждого элемента питания (табл. 3).

Таблица 3. Значения коэффициентов концентрации валового содержания микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза (0–100 см)

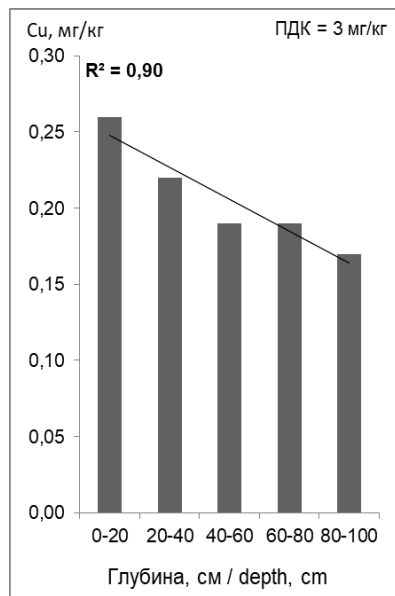
Table 3. Values of concentration coefficients of gross trace element content in calcic chernozem of fruit agrocenosis (0–100 cm)

Элемент	Коэффициент концентрации, K_c
Cu	1.69
Ni	1.43
Zn	1.40
Fe	0.94
Mn	0.82

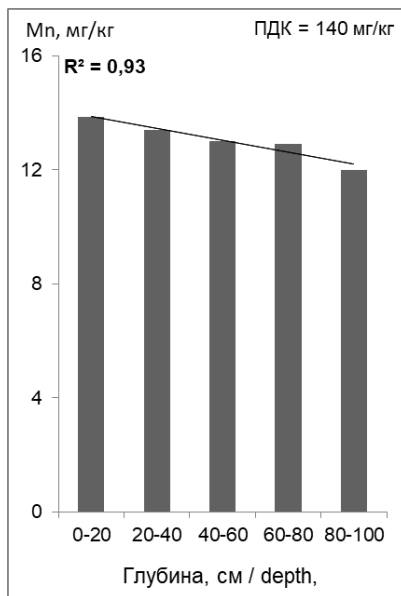
Наиболее надежной основой для научного расчета потребности возделываемых культур в микроудобрениях являются данные агрохимического обследования на содержание подвижных форм микроэлементов, поскольку именно они являются доступными для растений. Содержание меди снижается вниз по профилю на 35% – с 0.26 до 0.17 мг/кг (рис. 4а), марганца – на 13%, с 13.85 до 12.00 мг/кг (рис. 4б), цинка – на 67%, с 0.06 до 0.02 мг/кг (рис. 4с), никеля – на 80%, с 0.05 до 0.01 мг/кг (рис. 4д), железа – на 17%, с 9.50 до 7.92 мг/кг (рис. 4е). Значения коэффициента детерминации для подвижных соединений меди ($R^2 = 0.90$), марганца ($R^2 = 0.93$), цинка ($R^2 = 0.82$), никеля ($R^2 = 0.92$) и железа ($R^2 = 0.83$) свидетельствуют о том, что модель в целом адекватно описывает явление (рис. 4).

Коэффициенты радиальной дифференциации указывают на постепенное снижение содержания меди, марганца, никеля и железа вниз по профилю чернозема южного, что соответствует аккумулятивному типу профильного распределения (рис. 5).

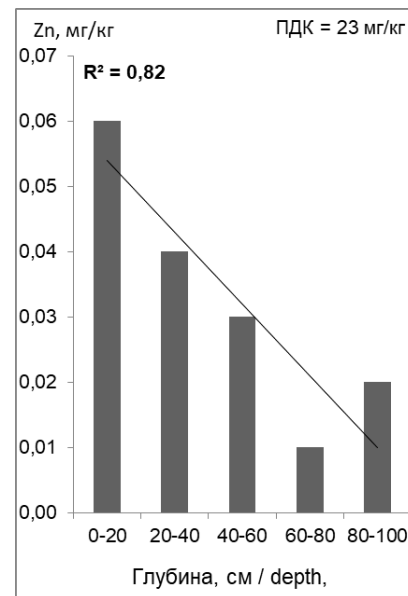
Расчет запасов микроэлементов в слое почвы мощностью 0–100 см дает возможность оценить их реальное количество и составить ряд накопления подвижных соединений изучаемых элементов питания в черноземе южном плодового агроценоза: $Mn > Fe > Cu > Ni = Zn$ (табл. 4).



(a)



(b)



(c)

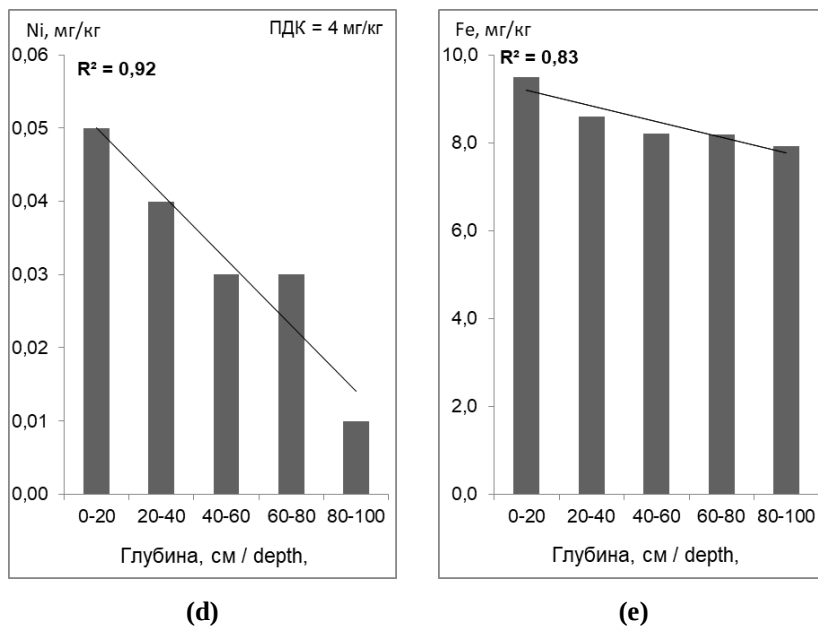


Рис. 4. Распределение подвижных соединений Cu (а), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) по профилю чернозема южного плодового агроценоза, мг/кг почвы.

Fig. 4. Distribution of mobile compounds Cu (a), Mn (b), Zn (c), Ni (d), Fe (e) in the profile of calcic chernozem of fruit agrocenosis, mg/kg of soil.

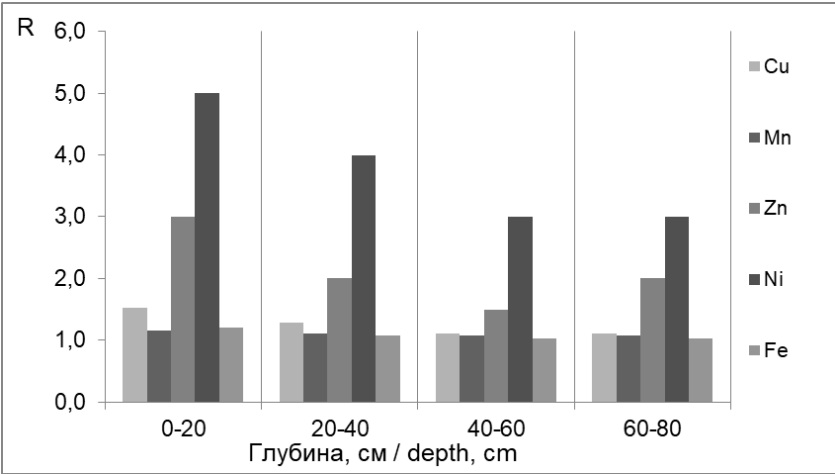


Рис. 5. Радиальная дифференциация подвижных Cu, Mn, Zn, Ni, Fe по профилю чернозема южного.

Fig. 5. Radial differentiation of mobile Cu, Mn, Zn, Ni, Fe compounds along the profile of calcic chernozem

Таблица 4. Запасы подвижных соединений микроэлементов в черноземе южном плодового агроценоза (0–100 см), кг/га.

Table 4. Stocks of mobile compounds of trace elements in calcic chernozem of fruit agrocenosis (0–100 cm), kg/ha.

Cu	Ni	Zn	Fe	Mn
0.54	0.08	0.08	22.20	34.09

Анализ показал обратную корреляцию между изучаемыми микроэлементами и количеством карбонатов: для меди $r = -0.88$, для марганца $r = -0.85$, для цинка $r = -0.74$, для никеля $r = -0.85$ и для железа $r = -0.84$ (при $p < 0.05$).

Накопление общего содержания меди, марганца, цинка, никеля и железа в слое 0–40 см отражает процесс биоаккумуляции, что является характерной чертой их распределения в почвенном профиле черноземов (рис. 2) (Жуйков, 2020; Лукин, Жуйков, 2021;

Medvedeva et al., 2022). Наряду с этим их прочному закреплению способствует высокое содержание органического вещества, тяжелый гранулометрический состав, сравнительно высокая емкость катионного обмена, а также присутствие глинистых минералов в почве. Аккумуляция исследуемых микроэлементов в верхней части почвенного профиля также свидетельствует о современном антропогенном влиянии (Кучеренко и др., 2021; Минкина и др., 2011; Kabata-Pendias, 2011; Zhao, Duo, 2002).

Коэффициенты радиальной дифференциации указывают на то, что общее содержание исследуемых биогенных микроэлементов уменьшается вниз по профилю чернозема южного. Наибольшее их накопление происходит в слое 0–40 см (рис. 3).

Суммарный показатель загрязнения чернозема южного плодородного агроценоза равен 2.5, что соответствует допустимой категории загрязнения почв ($Z_c < 16$). Превышений гигиенических нормативов по общему содержанию меди, марганца, цинка и никеля не обнаружено по всему профилю чернозема. Законодательно утвержденные предельно и ориентировочно допустимые концентрации как валового, так и подвижного железа в почвах отсутствуют. Кларк железа в почвах составляет 38 000 мг/кг (Гончарук, Сидоренко, 1986). По данным Д.С. Орлова (1985), А.Х. Шеуджена с соавт. (2015), валовое содержание железа в почвах колеблется в широких пределах – от 0.05 до 15%, в черноземах – около 3–6%, что соответствует значениям, полученным в ходе нашего исследования.

Для подвижных соединений изучаемых микроэлементов установлена тенденция постепенного снижения их содержания с увеличением глубины (с 0–20 до 80–100 см) (рис. 4). На аккумулятивный тип профильного распределения меди, марганца, никеля и железа в черноземе южном указывают коэффициенты радиальной дифференциации (рис. 5). Наименьшее количество микроэлементов обнаружено на глубине 60–80 см, где находится так называемый “щелочной барьер”. На уровне 80–100 см при дальнейшем увеличении щелочности почвенного раствора концентрация цинка возрастает из-за образования растворимых цинкатов (Кучеренко, 2023; Лукин, Жуйков, 2021). Как отмечают М.А. Глазовская (1988), Н.А. Протасова и А.П. Щербаков (2003, 2004), накопление

микроэлементов в верхних слоях почвы контролируется характером и положением геохимических барьеров, в роли которых в черноземных почвах выступают гумусовый и карбонатный горизонты, определяющие закономерности профильного распределения микроэлементов.

Исследуемая почва характеризуется средней обеспеченностью медью и марганцем: 0.21–0.50 и 11.0–20.0 мг/кг соответственно. Обеспеченность цинком остается низкой, составляя менее 2.0 мг/кг (Методические указания..., 2003). Такая ситуация может быть обусловлена значительным выносом этих микроэлементов из почвы, что происходит при отсутствии сбалансированного применения микроудобрений. Недостаточный уровень содержания доступного для растений цинка чаще всего проявляется на карбонатных почвах за счет образования $ZnCO_3$ (Самофалова, 2009; Baghdadi, Sadowski, 1998). Хотя никель и железо играют важную роль в минеральном питании растений, участвуя в ключевых физиологических и биохимических процессах, для этих элементов не существует отдельной классификации по обеспеченности почв. Разработка такой градации требует дальнейших исследований в системе “почва-растение”.

Ежегодно 8–10-летние деревья черешни поглощают элементы питания в количестве: Cu – 0.016 кг/га, Mn – 0.249, Zn – 0.074, Fe – 0.684 кг/га (Роева, 2018). Если на одном гектаре расположено 420 деревьев, то вынос микроэлементов составит: Cu – 6.7 кг/га, Mn – 104.6, Zn – 31.1, Fe – 287.3 кг/га, что свидетельствует о недостаточном количестве исследуемых микроэлементов в почве для получения стабильного и качественного урожая.

Доля подвижных Cu, Zn, Ni, Fe от их общего содержания во всех слоях чернозема южного низкая – от 0.02 до 0.45%, для Mn – от 1.67 до 2.04%. Из-за таких факторов, как высокое содержание гумуса, карбонатов, а также из-за щелочной реакции почвенного раствора и тяжелого гранулометрического состава подвижность микроэлементов в черноземе южном снижается (Кучеренко и др., 2021; Протасова, Щербаков, 2004).

Карбонаты способствуют накоплению микроэлементов в форме, которая трудно растворяется и малодоступна для растений. Это подтверждает обнаруженная обратная корреляционная связь

между исследуемыми микроэлементами и количеством карбонатов. Такие зависимости согласуются с работами других исследователей и могут объясняться как адсорбцией и осаждением, так и взаимодействием между этими элементами. Так, Д.В. Жуйков в своих работах (2019, 2020) связывает переход микроэлементов в труднодоступные для растений формы с высокой окарбоначенностью черноземов. Т.М. Минкина (2008) утверждает, что подвижность Cu и Zn обусловлена преимущественно соединениями металлов, удерживаемых карбонатами.

По всему профилю исследованного чернозема южного не обнаружены превышения гигиенических нормативов рассматриваемых микроэлементов, что указывает на безопасность использования данной почвы в сельском хозяйстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Содержание и распределение Cu, Mn, Zn, Ni и Fe в черноземе южном садового агроценоза характеризуется их активным накоплением в гумусово-аккумулятивных горизонтах, что свойственно почвам черноземного типа.

Коэффициенты радиальной дифференциации в профиле чернозема южного указывают на поверхностно-аккумулятивный тип накопления валового содержания Cu, Mn, Zn, Ni, Fe, характеризующийся слабой степенью контрастности. У подвижных соединений изучаемых микроэлементов степень контрастности различная: для Cu, Mn и Fe – слабая, для Zn и Ni – средняя, что обусловлено генетическими особенностями почвы и свойствами элементов.

Установлены ряды запаса микроэлементов в метровом слое почвы: для валового содержания – $Fe > Mn > Zn > Ni > Cu$, для подвижных соединений – $Mn > Fe > Cu > Ni > Zn$. Обеспеченность чернозема южного подвижными соединениями Cu и Mn – средняя, Zn – низкая. Это связано с их активным выносом в период формирования урожая черешни и указывает на необходимость внесения в почву микроудобрений.

Подтверждает значимость влияния карбонатов на подвижность микроэлементов в черноземе южном выявленная обратная корреляционная связь между содержанием исследуемых подвиж-

ных соединений микроэлементов и CaCO_3 : для меди $r = -0.88$, для марганца $r = -0.85$, для цинка $r = -0.74$, для никеля $r = -0.85$ и для железа $r = -0.84$ (при $p < 0.05$).

Суммарный показатель загрязнения валовыми Cu, Mn, Zn, Ni и Fe ($Z_c = 2.5$) свидетельствует об экологически чистом состоянии почвы плодового агроценоза, что позволяет получать безопасную и качественную продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абызова А.А.* Хозяйственно-биологическая оценка сортов и форм вишни и черешни в условиях Центрально-Черноземного региона: Автореф. дис. ... к. с.-х. н.: 06.01.05. Мичуринск, 2009. 23 с.
2. *Авессаломова И.А.* Катенарная геохимическая организация таежных ландшафтов Восточно-Европейской равнины // Геохимия ландшафтов и география почв. 100 лет со дня рождения М.А. Глазовской. М.: АПР, 2012. С. 97–117.
3. *Акимцев В.В.* Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность: материалы 3-го межвузовского совещания. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1962. С. 38–41.
4. *Асылбаев И.Г.* Тяжелые металлы второго класса опасности в почвах и породах Южного Урала: запасы и оценка загрязнения // Плодородие. 2015. № 5. С. 58–63.
5. *Берлова Т.Н.* Степень изученности вопроса хозяйственно-ценных признаков черешни // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2020. № 137. С. 112–117. DOI: <https://doi.org/10.36305/0513-1634-2020-137-112-117>.
6. *Бузоверов А.В., Дорошенко Т.Н., Рязанова Л.Г.* Южное плодоводство: почвенная агротехника, удобрение, орошение. СПб.: Лань, 2017. 128 с.
7. *Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А.* Методы исследования физических свойств почв. М.: Агропромиздат, 1986. 416 с.
8. *Водяницкий Ю.Н.* Химия и минералогия почвенного железа. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева, 2003. 236 с.
9. *Глазовская М.А.* Геохимия природных и техногенных ландшафтов. М.: Высшая школа, 1988. 328 с.
10. *Гончарук Е.И., Сидоренко Г.И.* Гигиеническое нормирование химических веществ в почве. М.: Медицина, 1986. 320 с.
11. *Горбунова Н.С., Протасова Н.А.* Формы соединений марганца, меди и цинка в черноземах Центрально-Черноземного региона // Вестник ВГУ.

2008. № 2. С. 77–85.

12. *Гуляева А.А.* Вишня и черешня. Орел: ФГБНУ ВНИИСПК, 2022. 86 с.

13. *Жизневская Г.Я.* Об эффективности совместного внесения молибдена и меди под сельскохозяйственные культуры // Микроэлементы и урожай. Рига, 1961. С. 77–104.

14. *Жуйков Д.В.* Мониторинг содержания марганца в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 3. С. 19–22. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10304>.

15. *Жуйков Д.В.* Мониторинг содержания микроэлементов (Mn, Zn, Co) в агроценозах юго-западной части Центрально-Черноземного района России // Земледелие. 2020. № 5. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10503>.

16. *Зайнутдинов З.З., Рязанова Л.Г., Дорошенко Т.Н., Гайченя М.И.* Оценка устойчивости сортов черешни к стресс-факторам южного региона России // Климат, экология, сельское хозяйство Евразии: материалы XI Международной науч.-практ. конф. Иркутск, 2022. С. 31–36.

17. *Зонн С.В.* Железо в почвах. М.: Наука, 1982. 208 с.

18. *Карпова Е.А.* Эколого-агрохимические аспекты длительного применения удобрений: состояние тяжелых металлов в агроэкосистемах: Автореф. дис. ... д. б. н.: 06.01.04. Москва, 2006. 48 с.

19. *Ковальчик Н.В., Смыкович Л.И., Карпиченко А.А.* Распространенность и виды миграции химических элементов. Минск: БГУ, 2017. 111 с.

20. *Колесникова А.Ф.* Вишня, черешня. Харьков: Фолио; М.: АСТ, 2003. 255 с.

21. *Корчагина К.В., Смагин А.В., Решетина Т.В.* Оценка техногенного загрязнения городских почв на основе профильного распределения тяжелых металлов и плотности сложения // Почвоведение. 2014. № 8. С. 988–997. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X14080085>.

22. *Котельникова О.Б.* Проблемы садового агроценоза в условиях климатических изменений // Биотехнологические приемы производства и переработки сельскохозяйственной продукции: материалы Всероссийской (национальной) науч.-практ. конф. Курск, 2021. Ч. 2. С. 56–60.

23. *Курзаева Л.В.* Регрессионный анализ в электронных таблицах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 12. № 7. С. 1234–1238.

24. *Кучеренко А.В., Бирюкова О.А.* Цинк в черноземе южном в условиях плодового агроценоза // II Никитинские чтения “Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии в природных и антропогенных ландшафтах”: материалы Международной науч. конф. Пермь, 2023.

С. 196–202.

25. Кучеренко А.В., Бирюкова О.А., Кучменко Е.В. Содержание и распределение Mn в черноземе южном при возделывании различных сельскохозяйственных культур // Живые и биокосные системы. 2021. № 36. DOI: <https://doi.org/10.1822/2308-9709-2021-36-1>.

26. Кучеренко А.В., Бирюкова О.А., Медведева А.М., Минкина Т.М., Шерстнев А.К. Содержание и распределение Mn, Zn и Cu в черноземе южном // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сб. науч. трудов XXII Международной науч.-практ. конф. М.: РУДН, 2021. С. 484–488.

27. Лукин С.В., Жуйков Д.В. Мониторинг содержания марганца, цинка и меди в почвах и растениях Центрально-Черноземного района России // Почвоведение. 2021. № 1. С. 60–69. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321010099>.

28. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

29. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с.

30. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амелянчик О.А., Болишева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижукова В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 689 с.

31. Зональные системы земледелия в Ростовской области на 2022–2026 гг. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области. Ростов н/Д, 2022. 734 с.

32. Минкина Т.М. Соединения тяжелых металлов в почвах Нижнего Дона, их трансформация под влиянием природных и антропогенных факторов: Автореф. дис. ... д. б. н. Ростов н/Д, 2008. 49 с.

33. Минкина Т.М., Пинский Д.Л., Манджиева С.С., Антоненко Е.М., Сушкова С.Н. Влияние гранулометрического состава на поглощение меди, свинца и цинка черноземными почвами Ростовской области // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1304–1311.

34. Минкина Т.М., Федоров Ю.А., Невидомская Д.Г., Польшина Т.Н., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А. Тяжелые металлы в почвах и растениях устья реки Дон и побережья Таганрогского залива // Почвоведение. 2017. № 9. С. 1074–1089. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317070067>.

35. Михайлова Л.А., Субботина М.Г., Алёшин М.А. Удобрение и диагностика минерального питания плодово-ягодных культур. Пермь: Минсельхоз РФ, Перм. гос. аграр.-тех. ун-т им. академика Д.Н. Прянишникова, 2019. 247 с.

36. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. 376 с.
37. Санжарова Н.И., Цыгвинцев П.Н., Анисимов В.С., Гераськин С.А., Кузнецов В.К., Лой Н.Н., Пименов Е.П., Панов А.В., Ратников А.Н., Санжаров А.И., Гончарова Л.И., Свириденко Д.Г., Арышева С.П., Анисимова Л.Н., Дикарев А.В., Попова Г.И., Переволоцкая Т.В., Суслов А.А., Фригидова Л.М., Васильев Д.В., Курбаков Д.Н., Спиридонов С.И. Тяжелые металлы в агроценозах: миграция, действие, нормирование. Обнинск: Изд-во ФГБУ «ВНИИРАЭ», 2019. 398 с.
38. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021.
39. Безуглова О.С., Морозов И.В. Физико-химический анализ почв. Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 1996. 40 с.
40. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Особенности формирования микроэлементного состава зональных почв Центрального Черноземья // Почвоведение. 2004. № 1. С. 50–59.
41. Протасова Н.А., Щербаков А.П. Микроэлементы (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) в черноземах и серых лесных почвах Центрального Черноземья. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. 368 с.
42. Роева Т.А. Минеральное питание как фактор продуктивности и качества плодов вишни, черешни // Современное садоводство. 2018. № 2. С. 48–69. DOI: <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2018-10208>.
43. Самофалова И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород. Пермь: Изд-во Перм. ГСХА, 2009. 132 с.
44. Черников Е.А. Оценка пригодности черноземов южных для создания продуктивных плодовых агроэкосистем // Научные труды Северо-Кавказского зонального научно-исследовательского института садоводства и виноградарства. 2015. Т. 7. С. 73–77.
45. Шацкая С.С., Красовская А.Ю., Сторожко И.В., Удальцов Е.А. Анализ содержания подвижных форм тяжелых металлов в почвах зоны влияния Новосибирского оловянного комбината // Химия в интересах устойчивого развития. 2020. Т. 28. № 5. С. 501–507. DOI: <https://doi.org/10.15372/KhUR20202560>.
46. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н., Гуторова О.А. Содержание и состояние железа в черноземе выщелоченном Западного Предкавказья в условиях агрогенеза // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2015. № 107. С. 967–983.
47. Baghdadi M., Sadowski A. Estimation of nutrient requirements of sour cherry // Acta Hort. 1998. No. 468. P. 515–522. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.468.64>.

48. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022. 234 p.
49. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. N.Y.: Taylor and Francis Group Publishers LLC, 2011. 505 p.
50. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Kucherenko A.V., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Mazarji M. The effect of resource-saving tillage technologies on the mobility, distribution and migration of trace elements in soil // Environmental Geochemistry and Health. 2022. Vol. 45. P. 85–100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01193-6>.
51. Zhao S.-L., Duo L.-A. Initial growth effect and ecological threshold of *Festuca arundinacea* L. under progressive stress of Cu^{2+} and Zn^{2+} // Acta Ecologica Sinica. 2002. Vol. 22(7). P. 1098–1105.

REFERENCES

1. Abyzova A.A., Khozyaistvenno-biologicheskaya otsenka sortov i form vishni i chereshni v usloviyakh Tsentral'no-Chernozemnogo regiona: Avtoref. dis. ... k. s.-kh. n. (Economic and biological evaluation of varieties and forms of cherry under the conditions of the Central Black Earth Region, Extended abstract of Cand. Agri. Sci. thesis), Michurinsk, 2009, 23 p.
2. Avessalomova I.A., Katenarnaya geokhimicheskaya organizatsiya taezhnykh landshaftov Vostochno-Evropeiskoi ravniny (Catenary geochemical organisation of taiga landscapes of the East European Plain), In: *Geokhimiya landshaftov i geografiya pochv. 100 let so dnya rozhdeniya M.A. Glazovskoi* (Geochemistry of landscapes and geography of soils. 100 years since the birth of M.A. Glazovskaya), Moscow: APR, 2012, pp. 97–117.
3. Akimtsev V.V., Soderzhanie mikroelementov v pochvakh Rostovskoi oblasti (Content of trace elements in soils of Rostov region), *Mikroelementy i estestvennaya radioaktivnost': materialy 3-go mezhvuzovskogo soveshchaniya* (Microelements and natural radioactivity: Proc. 3rd interuniversity meeting), Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. un-ta, 1962, pp. 38–41.
4. Asylbaev I.G., Tyazhelye metally vtorogo klassa opasnosti v pochvakh i porodakh Yuzhnogo Urala: zapasy i otsenka zagryazneniya (Heavy metals of the second hazard class in soils and rocks of the Southern Urals: reserves and pollution assessment), *Plodородie*, 2015, No. 5, pp. 58–63.
5. Berlova T.N., Stepen' izuchennosti voprosa khozyaistvenno-tsennykh priznakov chereshni (Extent of study of the issue of economically valuable traits of sweet cherries), *Byulleten' Gosudarstvennogo Nikitskogo botanicheskogo sada*, 2020, No. 137, pp. 112–117, DOI:

<https://doi.org/10.36305/0513-1634-2020-137-112-117>.

6. Buzoverov A.V., Doroshenko T.N., Ryazanova L.G., *Yuzhnoe plodovodstvo: pochvennaya agrotekhnika, udobrenie, oroshenie* (Southern fruit growing: soil agronomy, fertilisation, irrigation), Saint-Petersburg: Lan', 2017, 128 p.
7. Vadyunina A.F., Korchagina Z.A., *Metody issledovaniya fizicheskikh svoystv pochv* (Methods of research of physical properties of soils), Moscow: Agropromizdat, 1986, 416 p.
8. Vodyanitskii Yu.N., *Khimiya i mineralogiya pochvennogo zheleza* (Chemistry and mineralogy of soil iron), Moscow: Pochv. in-t im. V. V. Dokuchaeva, 2003, 236 p.
9. Glazovskaya M.A., *Geokhimiya prirodnkh i tekhnogennykh landshaftov* (Geochemistry of natural and anthropogenic landscapes), Moscow: Vysshaya shkola, 1988, 328 p.
10. Goncharuk E.I., Sidorenko G.I., *Gigienicheskoe normirovanie khimicheskikh veshchestv v pochve* (Hygienic rationing of chemical substances in soil), Moscow: Meditsina, 1986, 320 p.
11. Gorbunova N.S., Protasova N.A., *Formy soedinenii margantsa, medi i tsinka v chernozemakh Tsentral'no-Chernozemnogo regiona* (Forms of manganese, copper and zinc compounds in chernozems of the Central Chernozem region), *Vestnik VGU*, 2008, No. 2, pp. 77–85.
12. Gulyaeva A.A., *Vishnya i chereshnya* (Cherry and sweet cherry), Orel: FGBNU VNIISPK, 2022, 86 p.
13. Zhiznevskaya G.Ya., *Ob effektivnosti sovmestnogo vneseniya molibdena i medi pod sel'skokhozyaistvennyye kul'tury* (On the effectiveness of joint application of molybdenum and copper for agricultural crops), *Mikroelementy i urozhai*, Riga, 1961, pp. 77–104.
14. Zhuikov D.V., *Monitoring sodержaniya margantsa v agrotsenozakh* (Monitoring of manganese content in agroecosystems), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, Vol. 33, No. 3, pp. 19–22, DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2019-10304>.
15. Zhuikov D.V., *Monitoring sodержaniya mikroelementov (Mn, Zn, Co) v agrotsenozakh yugo-zapadnoi chasti Tsentral'no-Chernozemnogo raiona Rossii* (Monitoring of the content of trace elements (Mn, Zn, Co) in agroecosystems of the south-western part of the Central Chernozem region of Russia), *Zemledelie*, 2020, No. 5, pp. 9–13, DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10503>.
16. Zainutdinov Z.Z., Ryazanova L.G., Doroshenko T.N., Gaichenya M.I., *Otsenka ustoichivosti sortov cheresni k stress-faktoram yuzhnogo regiona Rossii* (Evaluation of resistance of cherry varieties to stress factors in the southern region of Russia), *Klimat, ekologiya, sel'skoe khozyaistvo Evrazii*

(Climate, ecology, agriculture of Eurasia), Proc. 11th Int. Sci. and Pract. Conf., Irkutsk, 2022, pp. 31–36.

17. Zonn S.V., *Zhelezo v pochvakh* (Iron in soils), Moscow: Nauka, 1982, 208 p.

18. Karpova E.A., *Ekologo-agrokhimicheskie aspekty dlitel'nogo primeneniya udobrenii: sostoyanie tyazhelykh metallov v agroekosistemakh: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Ecological and agrochemical aspects of long-term application of fertilisers: the state of heavy metals in agroecosystems, Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Moscow, 2006, 48 p.

19. Koval'chik N.V., Smykovich L.I., Karpichenko A.A., *Rasprostranennost' i vidy migratsii khimicheskikh elementov* (Prevalence and types of migration of chemical elements), Minsk: BGU, 2017, 111 p.

20. Kolesnikova A.F., *Vishnya, chereshnya* (Cherry, sweet cherry), Khar'kov: Folio, 2003, 255 p.

21. Korchagina K.V., Smagin A.V., Reshetina T.V., Otsenka tekhnogennoho zagryazneniya gorodskikh pochv na osnove profil'nogo raspredeleniya tyazhelykh metallov i plotnosti slozheniya (Assessment of technogenic pollution of urban soils based on the profile distribution of heavy metals and density of composition), *Pochvovedenie*, 2014, No. 8, pp. 988–997, DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X14080085>.

22. Kotel'nikova O.B., *Problemy sadovogo agrotsenoza v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii* (Problems of garden agrocenosis in the conditions of climatic changes), *Biotehnologicheskie priemy proizvodstva i pererabotki sel'skokhozyaistvennoi produktsii* (Biotechnological methods of production and processing of agricultural products), Proc. of the All-Russian (national) Sci. and Pract. Conf., Kursk, 2021, Vol. 2, pp. 56–60.

23. Kurzaeva L.V., *Regressionnyi analiz v elektronnykh tablitsakh* (Regression analysis in spreadsheets) *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy*, 2016, Vol. 12, No. 7, pp. 1234–1238.

24. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., *Tsink v chernozeme yuzhnom v usloviyakh plodovogo agrotsenoza* (Zinc in southern chernozem in conditions of fruit agrocenosis), *Aktual'nye problemy pochvovedeniya, agrokhimii i ekologii v prirodnykh i antropogennykh landshaftakh* (Actual problems of soil science, agrochemistry and ecology in natural and anthropogenic landscapes), Proc. of the Int. Sci. Conf., Perm', 2023, pp. 196–202.

25. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Kuchmenko E.V., *Soderzhanie i raspredelenie Mn v chernozeme yuzhnom pri vozdeleyvanii razlichnykh sel'skokhozyaistvennykh kul'tur* (Mn content and distribution in the southern chernozem under cultivation of different crops), *Zhivye i biokosnye sistemy*, 2021, No. 36, DOI: <https://doi.org/10.1822/2308-9709-2021-36-1>.

26. Kucherenko A.V., Biryukova O.A., Medvedeva A.M., Minkina T.M.,

Sherstnev A.K., Soderzhanie i raspredelenie Mn, Zn i Cu v chernozeme yuzhnom (Content and distribution of Mn, Zn and Cu in southern chernozem), *Aktual'nye problemy ekologii i prirodopol'zovaniya* (Actual problems of ecology and nature management), Proc. of XXII Int. Sci. and Pract. Conf., Moscow: RUDN, 2021, pp. 484–488.

27. Lukin S.V., Zhuikov D.V., Monitoring sodержaniya margantsa, tsinka i medi v pochvakh i rasteniyakh Tsentral'no-Chernozemnogo raiona Rossii (Monitoring of the Contents of Manganese, Zinc, and Copper in Soils and Plants of the Central Chernozemic Region of Russia), *Pochvovedenie*, 2021, No. 1, pp. 60–69, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229321010099>.

28. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh sel'khozugodii i produktsii rastenievodstva* (Methodical instructions for determination of heavy metals in soils of agricultural lands and crop production), Moscow: TsINAO, 1992, 61 p.

29. *Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skokhozyaistvennogo naznacheniya* (Methodological guidelines for the comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural land), Moscow: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003, 240 p.

30. Mineev V.G., Sychev V.G., Amel'yanchik O.A., Bolysheva T.N., Gomonova N.F., Durygina E.P., Egorov V.S., Egorova E.V., Edemskaya N.L., Karpova E.A., Prizhukova V.G., *Praktikum po agrokhimii* (Practicum on agrochemistry), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 2001, 689 p.

31. *Zonal'nye sistemy zemledeliya v Rostovskoi oblasti na 2022–2026 gg* (Zonal systems of farming in the Rostov region for 2022–2026), Ministerstvo sel'skogo khozyaistva i prodovol'stviya Rostovskoi oblasti, Rostov-na-Donu, 2022, 734 p.

32. Minkina T.M., *Soedineniya tyazhelykh metallov v pochvakh Nizhnego Dona, ikh transformatsiya pod vliyaniem prirodnikh i antropogennykh faktorov: Avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* (Heavy metal compounds in the soils of the Lower Don, their transformation under the influence of natural and anthropogenic factors: Extended abstract of Dr. Biol. Sci. thesis), Rostov-na-Donu, 2008, 49 p.

33. Minkina T.M., Pinskii D.L., Mandzhieva S.S., Antonenko E.M., Sushkova S.N., Vliyanie granulometricheskogo sostava na pogloshchenie medi, svintsa i tsinka chernozemnymi pochvami Rostovskoi oblasti (Influence of granulometric composition on the absorption of copper, lead and zinc by chernozem soils of the Rostov region), *Pochvovedenie*, 2011, No. 11, pp. 1304–1311.

34. Minkina T.M., Fedorov Yu.A., Nevidomskaya D.G., Pol'shina T.N., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Tyazhelye metally v pochvakh i rasteniyakh ust'ya reki Don i poberezh'ya Taganrogskogo zaliva (Heavy

metals in soils and plants of the don river estuary and the Taganrog Bay coast), *Pochvovedenie*, 2017, No. 9, pp. 1074–1089, DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317070067>.

35. Mikhailova L.A., Subbotina M.G., Aleshin M.A., *Udobrenie i diagnostika mineral'nogo pitaniya plodovo-yagodnykh kul'tur* (Fertilisation and diagnostics of mineral nutrition of fruit and berry crops), Perm': Minsel'khov RF, Perm. gos. agrar.-tekh. un-t im. akademika D.N. Pryanishnikova, 2019, 247 p.

36. Orlov D.S., *Khimiya pochv* (Chemistry of soils), Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1985, 376 p.

37. Sanzharova N.I., Tsygvintsev P.N., Anisimov V.S., Geras'kin S.A., Kuznetsov V.K., Loi N.N., Pimenov E.P., Panov A.V., Ratnikov A.N., Sanzharov A.I., Goncharova L.I., Sviridenko D.G., Arysheva S.P., Anisimova L.N., Dikarev A.V., Popova G.I., Perevolotskaya T.V., Suslov A.A., Frigidova L.M., Vasil'ev D.V., Kurbakov D.N., Spiridonov S.I., *Tyazhelye metally v agrotsenozakh: migratsiya, deistvie, normirovanie* (Heavy metals in agrocnoses: migration, action, rationing), Obninsk: Izd-vo FGBU "VNIIRAE", 2019, 398 p.

38. SanPin 1.2.3685-21. Hygienic norms and requirements for ensuring safety and (or) harmlessness of habitat factors for humans, 2021.

39. Bezuglova O.S., Morozov I.V., *Fiziko-khimicheskii analiz pochv* (Physico-chemical analysis of soils), Rostov-na-Donu: Izd-vo Rost. un-ta, 1996, 40 p.

40. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., *Osobennosti formirovaniya mikroelementnogo sostava zonal'nykh pochv Tsentral'nogo Chernozem'ya* (Features of formation of microelement composition of zonal soils of the Central Black Earth Region), *Pochvovedenie*. 2004, No. 1, pp. 50–59.

41. Protasova N.A., Shcherbakov A.P., *Mikroelementy (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Su, So, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, V, I, Mo) v chernozemakh i serykh lesnykh pochvakh Tsentral'nogo Chernozem'ya* (Microelements (Cr, V, Ni, Mn, Zn, Cu, Co, Ti, Zr, Ga, Be, Ba, Sr, B, I, Mo) in chernozems and grey forest soils of the Central Black Earth Region), Voronezh: Izd-vo VGU, 2003, 368 p.

42. Roeva T.A., *Mineral'noe pitanie kak faktor produktivnosti i kachestva plodov vishni, chereshni* (Mineral nutrition as a factor of productivity and quality of fruits of cherry, sweet cherry), *Sovremennoe sadovodstvo*, 2018, No. 2, pp. 48–69, DOI: <https://doi.org/10.24411/2312-6701-2018-10208>.

43. Samofalova I.A., *Khimicheskii sostav pochv i pochvoobrazuyushchikh porod: ucheb. posobie* (Chemical composition of soils and soil-forming rocks: textbook), Perm': Izd-vo Perm. GSKhA, 2009, 132 p.

44. Chernikov E.A., *Otsenka prigodnosti chernozemov yuzhnykh dlya sozdaniya produktivnykh plodovykh agroekosistem* (Assessment of the suitability of southern chernozems for the creation of productive fruit

agroecosystems), *Nauchnye trudy Severo-Kavkazskogo zonal'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sadovodstva i vinogradarstva*, 2015, Vol. 7, pp. 73–77.

45. Shatskaya S.S., Krasovskaya A.Yu., Storozhko I.V., Udaltsov E.A., Analiz soderzhaniya podvizhnykh form tyazhelykh metallov v pochvakh zony vliyaniya Novosibirskogo olovyannogo kombinata (Analysis of the content of mobile forms of heavy metals in soils of the zone of influence of the Novosibirsk tin smelter), *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*, 2020, Vol. 28, No. 5, pp. 501–507, DOI: <https://doi.org/10.15372/KhUR20202560>.

46. Sheudzhen A.Kh., Bondareva T.N., Gutorova O.A., Soderzhanie i sostoyanie zheleza v chernozeme vyshchelochennom Zapadnogo Predkavkaz'ya v usloviyakh agrogeneza (Content and state of iron in chernozem leached chernozem of the Western Precaucasus under conditions of agrogenesis), *Politematicheskii setevoy elektronnyi nauchnyi zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2015, No. 107, pp. 967–983.

47. Baghdadi M., Sadowski A., Estimation of nutrient requirements of sour cherry, *Acta Hort.*, 1998, No. 468, pp. 515–522, DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.468.64>.

48. IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 2022, 234 p.

49. Kabata-Pendias A., *Trace elements in soils and plants*. 4th ed., N.Y.: Taylor and Francis Group Publishers LLC, 2011, 505 p.

50. Medvedeva A.M., Biryukova O.A., Kucherenko A.V., Ilchenko Y.I., Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Mazarji M., The effect of resource-saving tillage technologies on the mobility, distribution and migration of trace elements in soil, *Environmental Geochemistry and Health*, 2022, Vol. 45, pp. 85–100, DOI: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01193-6>.

51. Zhao S.-L., Duo L.-A., Initial growth effect and ecological threshold of *Festuca arundinacea* L. under progressive stress of Cu^{2+} and Zn^{2+} , *Acta Ecologica Sinica*, 2002, Vol. 22(7), pp. 1098–1105.