

УДК 631.416.9

DOI: 10.18522/2308-9709-2025-51-7

Групповой состав соединений цинка в чернозёме южном садового агроценоза

Кучеренко А.В., Бирюкова О.А.

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail:
alkucherenko@bk.ru

Аннотация

Исследование посвящено изучению группового состава соединений Zn в черноземе южном при возделывании черешни. Установлено, что распределение Zn в почвенном профиле чернозёма южного характеризуется аккумулятивным типом, обусловленным биогенными процессами. Выявлена положительная корреляционная зависимость между обменными, комплексными соединениями Zn и содержанием гумуса. Непрочносвязанные соединения Zn отрицательно коррелировали с содержанием CaCO₃ и реакцией почвенного раствора. Определены особенности группового состава Zn в черноземе южном, которые необходимо учитывать при оптимизации минерального питания плодовых культур.

Ключевые слова: групповой состав, цинк, чернозем южный, садовый агроценоз

Group composition of zinc compounds in the calcic chernozem of the garden agrocenosis

Kucherenko Alexey V., Biryukova Olga A.

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, e-mail: alkucherenko@bk.ru

Abstract

This study investigates the group composition of Zn compounds in calcic chernozem under cherry cultivation. It was found that Zn distribution in the soil profile exhibits an accumulative pattern driven by biogenic processes. A positive correlation exists between exchangeable and complexed Zn compounds and humus content. Weakly bound Zn compounds were negatively correlated with CaCO₃ content and soil solution pH. The identified peculiarities of Zn group composition in calcic chernozem should be considered when optimizing mineral nutrition for fruit crops.

Keywords: group composition, zinc, calcic chernozem, garden agrocenosis

Введение

Цинк наряду с другими микроэлементами, является важным элементом питания в поддержании здоровья и плодородия почвы, а также для обеспечения оптимального роста и развития растений. Несмотря на то, что Zn присутствует в почве в относительно небольших количествах, его значение для биохимических и физиологических процессов в растениях трудно переоценить. Он участвует в биосинтезе предшественников хлорофилла и выступает в качестве кофактора для многочисленных ферментов, катализирующих метаболические процессы. Более того, Zn способствует поддержанию целостности биологических мембран и стабилизирует дыхательные процессы, что повышает устойчивость растений к патогенам и неблагоприятным факторам окружающей среды (Битюцкий, 2014; Минеев и др., 2017; Sagwal et al., 2023). В условиях интенсивного сельского хозяйства, дефицит Zn в почве становится все более актуальной проблемой, требующей внимания и комплексного подхода к решению. В черноземах, обладающих высоким потенциалом плодородия, Zn представлен сложным набором соединений, динамика которых определяется совокупностью факторов, включая гранулометрический состав, pH, содержание органического вещества, наличие карбонатов, а также специфику землепользования (Mousavi et al., 2018; Жуйков, 2021). Доступность микроэлементов в значительной степени определяется формой, в которой они находятся, и прочностью их связи с различными компонентами почвы. В связи с этим, микроэлементы в почве принято классифицировать на прочно- и непрочносвязанные соединения (обменные, комплексные и специфически сорбированные). Понимание особенностей этих групп и факторов, влияющих на их динамику, имеет важное значение для оптимизации питания растений и снижения рисков загрязнения окружающей среды (Минкина и др. 2008, 2017; Мотузова, 2009; Санжарова и др., 2019). При возделывании плодовых культур, отличающихся наибольшей требовательностью к минеральному питанию, изучение группового состава соединений цинка в почве приобретает особое значение для повышения продуктивности садовых агроценозов.

Целью исследования было изучение группового состава соединений цинка в чернозёме южном в условиях садового агроценоза.

Объект и методы

Объект исследования – чернозем южный средне гумусированный среднесплодный тяжелосуглинистый на лессовидных суглинках очень теплой южно-европейской фации (Безуглова, Хырхырова, 2008; Вальков и др., 2012). С целью отбора почвенных проб в производственном саду, расположенном

на территории ОАО «Янтарное» Мартыновского района Ростовской области, выделяли элементарные участки (рис.1). В период с 2019 по 2024 годы было заложено и исследовано 16 почвенных разрезов. Отбор проб осуществлялся по слоям (0–20, 20–40, 40–60, 60–80, 80–100 см) согласно ГОСТ Р 58595–2019 и «Методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения» (2003).

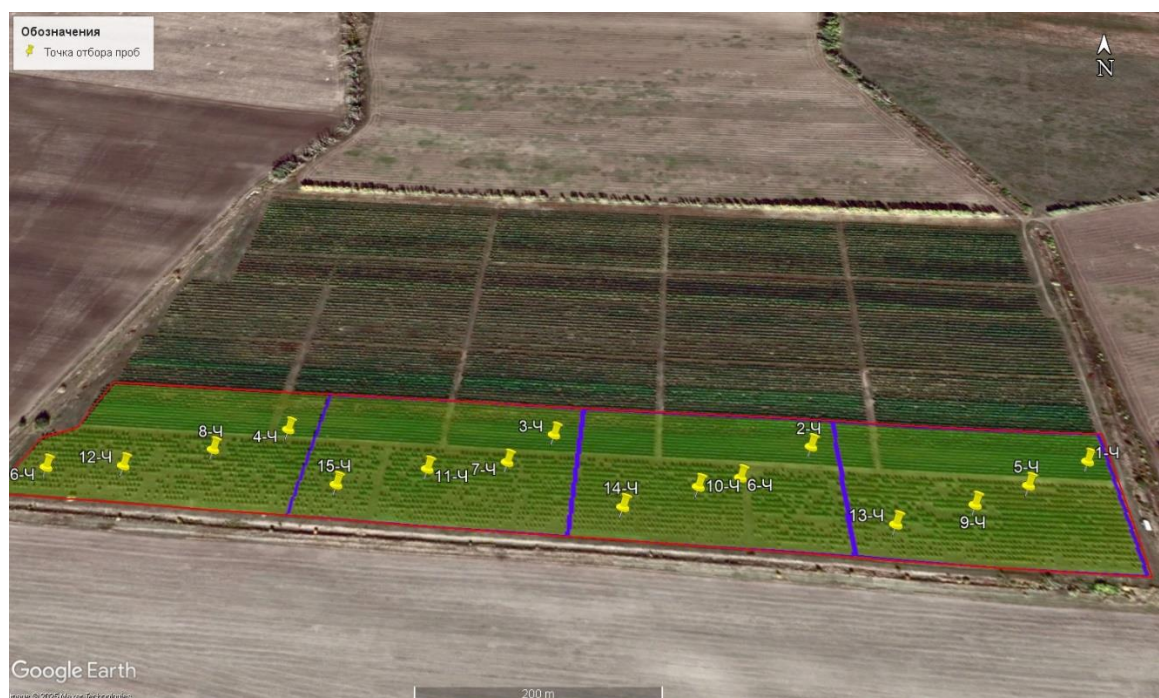


Рисунок 1 – Картосхема расположения разрезов (точек отбора) на территории ОАО «Янтарное» Мартыновского района Ростовской области в условиях садового агроценоза

Валовое содержание Zn определяли с помощью рентгенофлуоресцентного анализа на приборе «Спектроскан МАКС–GV». Для определения непрочносвязанных соединений Zn в почве использовали метод параллельного экстрагирования: обменные (1н. NH_4Ac pH 4,8 (ААБ), комплексные (1 % раствор ЭДТА в NH_4Ac pH 4,8), специфически сорбированные (1н. HCl), с последующим применением атомно-абсорбционной спектрометрии. По разнице между содержанием Zn в вытяжках ЭДТА в ААБ и ААБ рассчитали количество комплексных соединений, специфически сорбированные – по разнице между содержанием Zn в вытяжках HCl и ААБ. Цинк в составе прочносвязанных соединений устанавливали по разности между валовым содержанием в почве и его непрочносвязанными формами (Садовникова, 1997; Минеев и др., 2001; Минкина и др., 2017). Органическое вещество определяли в соответствии с ГОСТ 26213–2021; pH водной вытяжки – ГОСТ 26423–85; количество

карбонатов – газовольметрическим методом. Процесс аккумуляции – миграции Zn по профилю изучали путем расчета коэффициента радиальной дифференциации по формуле (Ковальчик и др., 2017):

$$R = \frac{C_{в.с.}}{C_{н.с.}},$$

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

По соотношению групп соединений металлов почвы дали оценку их подвижности и выразили ее в виде коэффициента подвижности (K_p). K_p представляет собой отношение содержания непрочносвязанной группы (НС) к содержанию прочносвязанной группы (ПС) соединений элемента в почве (Минкина и др., 2008):

$$K_p = \frac{НС}{ПС}$$

Статистическую обработку данных проводили в пакете программ STATISTICA 13.3 при $p < 0,05$. Для аппроксимации экспериментальных данных строилась диаграмма рассеяния, по которой подбиралась аппроксимирующая функция (линия тренда) (Курзаева, 2016). Качество аппроксимации оценивалось с помощью коэффициента детерминации (R^2). При $R^2 \geq 0,95$ аппроксимация считается высокоточной, при $0,75 \leq R^2 < 0,95$ – удовлетворительной, а при $0,5 \leq R^2 < 0,75$ – слабой.

Результаты и обсуждение

Валовое содержание Zn в слое 0–20 см чернозема южного составляет 94,5 мг/кг. Фоновое значение этого микроэлемента в черноземе южном – около 69,0 мг/кг, а в целом в почвах региона его содержание находится в пределах от 24,0 до 150,0 мг/кг. При этом наибольшие количества Zn отмечены для почв многолетних насаждений (Акимцев и др., 1962; Алексеенко и др., 2002). Имеются данные (Ковальский, Андрианова, 1970; Сборникова, Кизильштейн, 1990; Бурачевская, 2014; Кучеренко, Бирюкова, 2023) о повышении количества цинка в почвах Ростовской области со временем. Согласно полученным результатам, Zn аккумулируется на глубине 0–40 см, снижаясь на 11,0 % до 80–100 см (рис.2). В распределении Zn по профилю не обнаружено статистически достоверных изменений концентрации, что подтверждается непараметрическим критерием Вилкоксона.

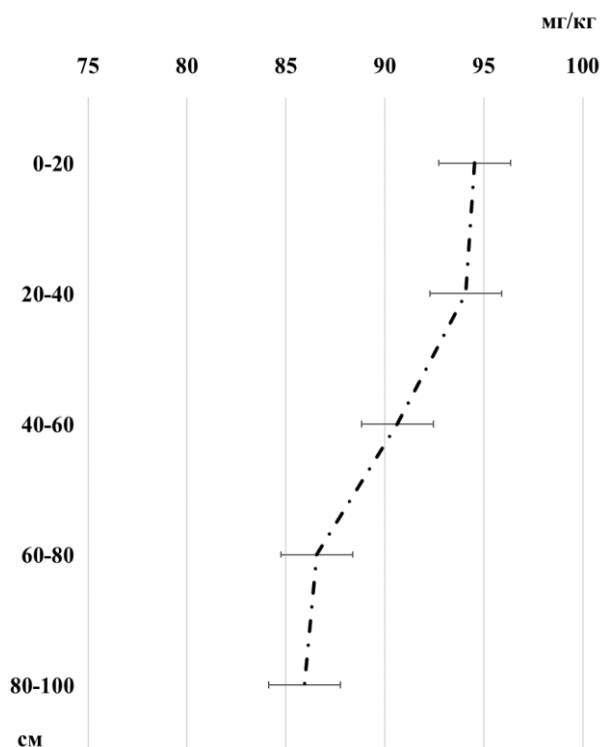


Рисунок 2 – Внутрипрофильное распределение валового содержания Zn в черноземе южном садового агроценоза (n=24), мг/кг почвы

Вычисленные коэффициенты радиальной дифференциации, указывают на поверхностно-аккумулятивный тип профильного распределения Zn в чернозёме южном при возделывании черешни (рис. 3). Коэффициент детерминации ($R^2 = 0,93$) свидетельствуют о том, что модель в целом адекватно описывает явление.

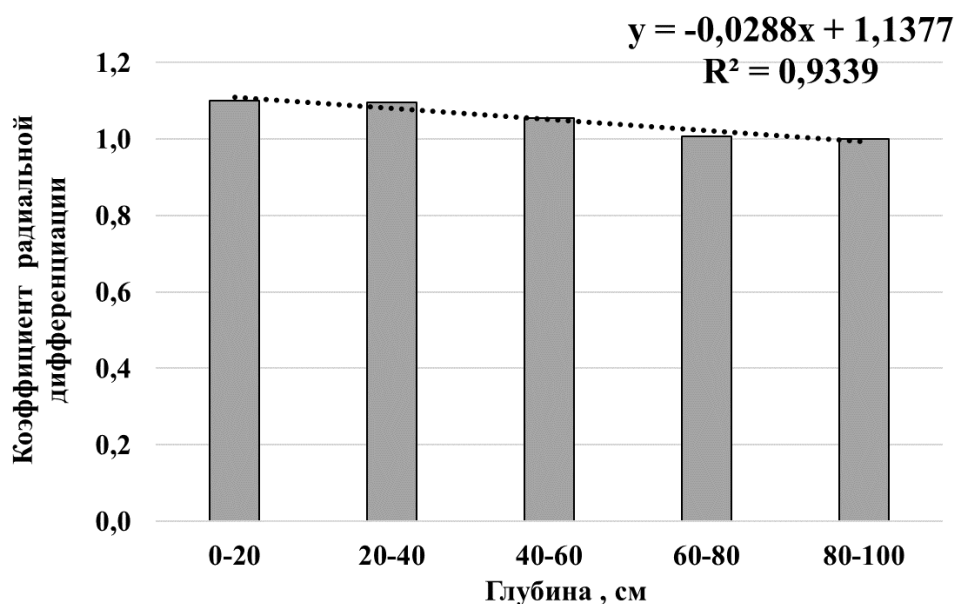


Рисунок 3 – Радиальная дифференциация валового содержания Zn по профилю чернозема южного садового агроценоза

Черноземы в регионе характеризуются высоким валовым содержанием Zn, но при этом его подвижность ограничена присутствием карбонатов (Хорошкин, 1971; Минкина и др., 2009). Прочносвязанные соединения Zn в слоях от 0–20 до 80–100 см представляют значительную часть от его валового содержания — 99,0 %. Коэффициент подвижности Zn в гумусово-аккумулятивном слое почвы невелик и составляет 0,01. Образование малорастворимых соединений Zn снижает его доступность: взаимодействие Zn с фосфатами приводит к формированию $Zn_3(PO_4)_2$, а с карбонатами – $ZnCO_3$. Эти процессы существенно ухудшают доступность цинка растениям, способствуя развитию его дефицита (Kabata-Pendias, 2011; Mousavi et al., 2018; Rahman et al., 2020). Доля непрочносвязанных соединений низкая — 1,0 %. Обменные, комплексные и специфически сорбированные соединения от общего содержания непрочносвязанных составляют соответственно 3,0–8,0 %; 21,0–27,0 %; 64,0–76,0 % (рис.4).

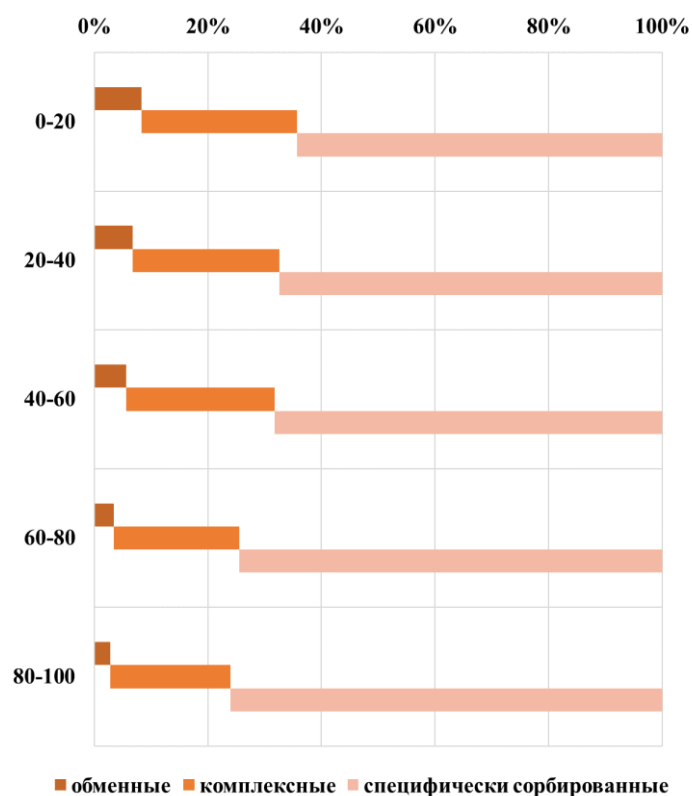


Рисунок 4 – Процентное соотношение непрочносвязанных соединений Zn в черноземе южном садового агроценоза

Для непрочносвязанных соединений Zn установлена общая закономерность профильного распределения — максимальное накопление в верхнем слое (0–20 см) с постепенным снижением с глубиной (80–100 см). Содержание обменного Zn достоверно уменьшается вниз по профилю на 75,0 %: с 0,08 до 0,02 мг/кг. Установлена умеренная изменчивость комплексных соединений Zn, особенно в нижних слоях, что говорит о его достаточно равномерном распределении в профиле почвы. Содержание комплексного Zn достоверно убывает на 37,0 % с 0,27 до 0,17 мг/кг. Для специфически сорбированных соединений Zn выявлена высокая изменчивость (около 40,0 % во всех слоях) по профилю чернозема (рис.5).

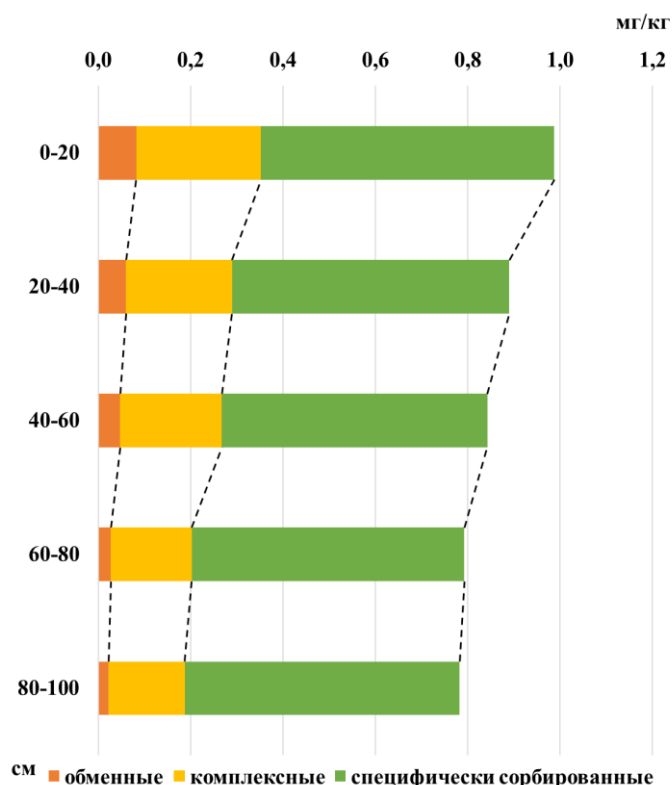


Рисунок 5 – Внутривертикальное распределение непрочносвязанных соединений Zn в черноземе южном садового агроценоза, мг/кг почвы

Коэффициенты радиальной дифференциации указывают на постепенное снижение содержания непрочносвязанных соединений цинка вниз по профилю чернозема южного, что соответствует аккумулятивному типу профильного распределения (рис. 6). Коэффициент детерминации ($R^2 = 0,96$) свидетельствуют о том, что модель в целом адекватно описывает явление.

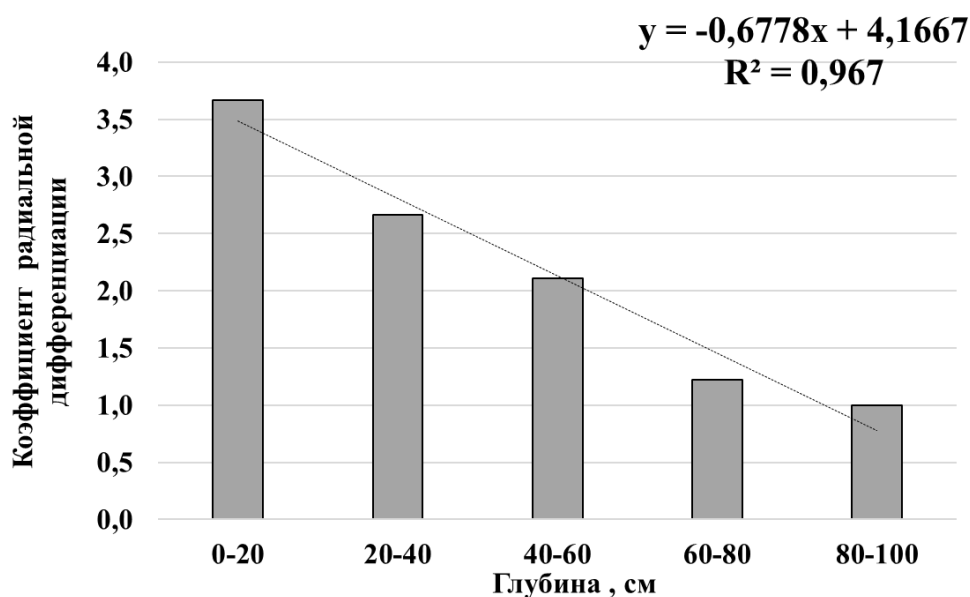


Рисунок 6 – Радиальная дифференциация непрочносвязанных соединений Zn по профилю чернозема южного садового агроценоза

Содержание и распределение Zn зависит от физико-химических свойств почвы. При возделывании черешни максимальное содержание гумуса за все годы исследования выявлено на глубинах 0–20 см (3,5 %) и 20–40 см (3,2 %). Для pH_{H_2O} почвенного раствора установлена тенденция к увеличению с 0–20 по 80–100 см: от 7,3 до 8,2. Содержание $CaCO_3$ в слое 0–20 и 20–40 см достигает 2,2 и 2,5% соответственно. На глубине 40–60 см заметно направленное увеличение количества $CaCO_3$ к слою 60–80 см, где оно составляет 5,9 %, возрастая на 0,9 % в слое 80–100 см.

Роль органического вещества почвы в связывании Zn велика. Его взаимодействие с гумусом может происходить путем ионного обмена, комплексообразования и адсорбции (Минкина и др., 2009; Бурачевская, 2014). Заметная положительная корреляционная связь установлена между обменными, комплексными соединениями Zn и содержанием гумуса: $r=0,78$ и $r=0,85$ соответственно.

Карбонаты способствуют накоплению микроэлементов в форме, которая трудно растворяется и малодоступна для растений. Это подтверждает обнаруженная обратная корреляционная связь между непрочносвязанными соединениями Zn и $CaCO_3$: обменные ($r=-0,79$), комплексные ($r=-0,87$) и специфически сорбированные ($r=-0,44$). Реакция почвенного раствора отрицательно коррелирует с обменными ($r=-0,64$) и комплексными ($r=-0,62$) соединениями Zn ($r=-0,64$).

Исследуемый чернозём южный в условиях садового агроценоза характеризуется низкой обеспеченностью подвижным Zn (Методические указания, 2003; Гончаренко и др., 2016). Недостаточный уровень содержания доступного для растений Zn чаще всего проявляется на карбонатных почвах за счет образования $ZnCO_3$ (Самофалова, 2009). Полученные результаты указывают на необходимость внесения цинковых удобрений в целях повышения устойчивости и продуктивности садового агроценоза.

Заключение

Распределение валового содержания и непрочносвязанных соединений Zn в профиле чернозёма южного при возделывании черешни имеет аккумулятивный характер, с повышенным содержанием элемента в верхних горизонтах (0–40 см), что обусловлено биогенными процессами.

Основная часть Zn в черноземе южном садового агроценоза представлена прочносвязанными соединениями. Доля непрочносвязанных соединений рассматриваемых микроэлементов от их валового содержания составляет 1,0 %.

Установлены статистически значимые корреляционные зависимости между Zn и физико-химическими свойствами чернозёма южного. Валовое

содержание, обменные и комплексные соединения Zn положительно связаны с содержанием гумуса. непрочносвязанные соединения Zn отрицательно коррелируют с рН и количеством карбонатов в почве.

Агрохимическая оценка степени обеспеченности чернозёма южного подвижными соединениями микроэлемента показала низкий уровень содержания Zn. Это обусловлено особенностями группового состава Zn в черноземе южном и интенсивностью поглощения этого элемента питания черешней в процессе формирования урожая.

Литература

- Акимцев В. В., Болдырева А. В., Голубев С. Н [и др.] Содержание микроэлементов в почвах Ростовской области // Микроэлементы и естественная радиоактивность: материалы 3-го межвузовского совещания. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского ун-та, 1962. С. 38–41.
- Алексеев В. А., Суворинов А. В., Алексеев В. А., Бофанова А. Б. Металлы в окружающей среде. Почвы геохимических ландшафтов Ростовской области. Учебное пособие. М.: Логос, 2002. 312 с.
- Безуглова О. С., Хырхырова М. М. Почвы Ростовской области: учебное пособие. Ростов н/Д.: Изд-во ЮФУ, 2008. 352 с.
- Битюцкий Н. П. Минеральное питание растений: учебное пособие. Санкт-Петербург. СПбГУ, 2014. 540 с.
- Бурачевская М. В. Фракционный состав соединений тяжелых металлов в черноземах обыкновенных Нижнего Дона. Дисс. ... канд. биол. наук. Ростов-на-Дону, 2014. 214 с.
- В. Г. Сычев, А. Н. Аристархов, И. В. Володарская [и др.]. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2003. 240 с.
- Вальков В. Ф., Казеев К. Ш., Колесников С. И. Почвы Ростовской области: генезис, география и экология. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2012. 316 с.
- Гончаренко Т. П., Жицкая Л. И., Хоменко Е. М. Агрохимическая оценка обеспеченности черноземов типичных подвижными формами микроэлементов // Евразийский союз ученых. 2016. № 3-5(24). С. 85–88.
- ГОСТ Р 58595-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Почвы. Отбор проб. Дата введения 10.10.2019. М.: Стандартинформ, 2019.
- Соборникова И. Г., Кизильштейн Л. Я. Медь, цинк, свинец в почвах и растениях полыни г. Ростова-на-Дону и его окрестностей // Изв. Сев.-Кав. центра выс. школы. Естест. науки. 1990. № 4. С. 3-8.

- Ковальский В. В., Андрианова Г. А. Микроэлементы в почвах СССР. М. 1970. 179 с.
- Ковальчик Н. В., Смыкович Л. И., Карпиченко А. А. Распространенность и виды миграции химических элементов. Минск: БГУ, 2017. 111 с.
- Курзаева Л. В. Регрессионный анализ в электронных таблицах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. Т. 12. № 7. С. 1234–1238.
- Кучеренко А. В., Бирюкова О. А. Содержание и распределение разных форм меди и цинка в черноземе южном в ампелоценозах Ростовской области // Наука Юга России. 2023. Т. 19. № 3. С. 47–55.
- Минеев В. Г., Сычев В. Г., Амелянчик О. А., Большеева 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.
- Минеев В. Г., Сычѳв В. Г., Гамзиков Г. П., Шеуджен А. Х., Агафонов Е. В., Белоус Н. М., Сапаров А. С. Учебник /под ред. В. Г. Минеева. М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.
- Минкина Т. М., Мотузова Г. В., Назаренко О. Г. Состав соединений тяжелых металлов в почвах. Ростов-на-Дону: «Эверест», 2009. 208 с.
- 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.
- Садовникова Л. К. Использование почвенных вытяжек при изучении соединений тяжелых металлов // Химия в сельском хозяйстве. 1997. № 2. С. 37–40.
- Самофалова И. А. Химический состав почв и почвообразующих пород: учебное пособие. Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО "Пермская ГСХА", 2009. 132 с.
- Хорошкин М. Н. Химическая природа, биологическая активность марганца, меди, цинка и применение их под зерновые культуры в Ростовской области: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Баку, 1971. 54 с.
- Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. N.Y.: Taylor and Francis Group Publishers LLC, 2011. 505 p.
- Mousavi S. M., Motesharezadeh B., Hosseini H. M. et al. Geochemical fractions and phytoavailability of Zinc in a contaminated calcareous soil affected by biotic and abiotic amendments // Environ Geochem Health. 2018. P.1221–1235.
<https://doi.org/10.1007/s10653-017-0038-z>

- Rahman A., Sofi Ahmad J., Javeed I., Malik Hussain. T, Nisar S. Role of Micronutrients in Crop Production //International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020. 11. P. 2265-2287.
- Sagwal A., Wadhwa P., Shubham and Kaushal, S. Essentiality of Micronutrients in Soil. A Review // International Journal of Plant & Soil Science. 2023. P. 56–65. DOI:<https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i244297>.

References

- Akimtsev V.V., Boldyreva A.V., Golubev S.N [et al.] Microelement content in soils of the Rostov region // Microelements and natural radioactivity: materials of the 3rd interuniversity conference. Rostov n / D: Rostov University Publishing House, 1962. P. 38-41.
- Alekseenko V. A., Suvorinov A. V., Alekseenko V. A., Bofanova A. B. Metals in the environment. Soils of geochemical landscapes of the Rostov region. Study guide. Moscow: Logos, 2002. 312 p.
- Bezuglova O. S., Khirkhyrova M. M. Soils of the Rostov Region: a tutorial. Rostov n / D.: Publishing House of Southern Federal University, 2008. 352 p.
- Bityutskiy N. P. Mineral nutrition of plants: a textbook. St. Petersburg. SPbSU, 2014. 540 p.
- Burachevskaya M. V. Fractional composition of heavy metal compounds in ordinary chernozems of the Lower Don. Diss. for the degree of Cand. of Biological Sciences. Rostov-on-Don, 2014. 214 p.
- Goncharenko T. P., Zhitskaya L. I, Khomenko E. M. Agrochemical assessment of the provision of typical chernozems with mobile forms of microelements // Eurasian Union of Scientists. 2016. № 3-5 (24). P. 85-88.
- GOST R 58595-2019. National standard of the Russian Federation. Soils. Sampling. Date of introduction 10.10.2019. Moscow: Standartinform, 2019.
- Khoroshkin M. N. Chemical nature, biological activity of manganese, copper, zinc and their application for grain crops in the Rostov region: Abstract of a doctor of agricultural sciences dissertation. - Baku, 1971. 54 p.
- Kovalchik N. V., Smykovich L. I., Karpichenko A. A. Prevalence and types of migration of chemical elements. Minsk: BSU, 2017. 111 p.
- Koval'skii V.V., Andrianova G.A. Microelements in soils of the USSR. Moscow, 1970. 179 p.
- Kucherenko A. V., Biryukova O. A. Content and distribution of different forms of copper and zinc in southern chernozem in ampelocenoses of Rostov region // Science of the South of Russia. 2023. T.19. № 3. С. 47-55.
- Kurzaeva L. V. Regression analysis in spreadsheets // International Journal of Applied and Fundamental Research. - 2016. Vol. 12. № 7. Pp. 1234-1238.

Mineev V. G., Sychev V. G., Gamzikov G. P., Sheudzhen A. Kh., Agafonov E. V., Belous N. M., Saparov A. S. Textbook; edited by V. G. Mineev. M.: Publishing house of the All-Russian Research Institute of Agronomy named after D. N. Pryanishnikov, 2017. 854 p.

Minkina T. M., Fedorov Yu. A., Nevidomskaya D. G., Polshina T. N., Mandzhieva S. S., Chaplygin V. A. Heavy metals in soils and plants of the Don River mouth and the coast of the Taganrog Bay // Soil Science. 2017. № 9. P. 1074-1089.

Minkina T. M., Motuzova G. V., Nazarenko O. G. Composition of heavy metal compounds in soils. Rostov-on-Don: Everest, 2009. 208 p.

Sadovnikova L.K. Use of soil extracts in the study of heavy metal compounds // Chemistry in agriculture. 1997. № 2. P. 37-40.

Samofalova I. A. Chemical composition of soils and parent rocks: a tutorial. Perm: Publishing house of the Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Perm State Agricultural Academy", 2009. 132 p.

Sobornikova I.G., Kizil'shtein L.Ya. Copper, zinc, lead in soils and wormwood plants of Rostov-on-Don and its environs // News of the North-Caucasian Higher School Center. Natural Sciences. 1990. № 4. P. 3-8.

V. G. Sychev, A. N. Aristarkhov, I. V. Voldarskaya [et al.]. Methodological guidelines for conducting comprehensive monitoring of soil fertility of agricultural lands. Moscow: Federal State Scientific Institution "Rosinformagrotech", 2003. 240 p. Mineev V. G., Sychev V. G., Amelyanchik 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. Workshop on agrochemistry. M.: Publishing house Mosk. Univ., 2001. 689 p.

Valkov V. F., Kazeev K. Sh., Kolesnikov S. I. Soils of the Rostov region: genesis, geography and ecology. Rostov n / D: Publishing house of the Southern Federal University, 2012. 316 p.

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

Mousavi S. M., Motesharezadeh B., Hosseini H. M. et al. Geochemical fractions and phytoavailability of Zinc in a contaminated calcareous soil affected by biotic and abiotic amendments // Environ Geochem Health, 2018. P.1221–1235.

<https://doi.org/10.1007/s10653-017-0038-z>

Rahman A., Sofi Ahmad J., Javeed I., Malik Hussain. T, Nisar S. Role of Micronutrients in Crop Production //International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2020. 11. P. 2265-2287.

Sagwal A., Wadhwa P., Shubham and Kaushal, S. Essentiality of Micronutrients in Soil: A Review // International Journal of Plant & Soil Science. 2023. P. 56–65. DOI:<https://doi.org/10.9734/ijpss/2023/v35i244297>.

Статья поступила в редакцию 3 марта 2025 г.

Поступила после доработки 4 марта 2025 г.

Принята к печати 22 марта 2025 г.

Received 3, March, 2025

Revised 4, March, 2025

Accepted 22, March, 2025