

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.107-113>



УДК 631.416.8

Влияние хелатной формы железа на его подвижность и фитодоступность при внесении в почву

© 2023. Е. В. Товстик✉, А. В. Захаров

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», г. Киров, Российская Федерация

Несмотря на известные механизмы поглощения железа растениями из почвы, а также модели поведения ионов металла в почвах, борьба с дефицитом данного микроэлемента у растений не теряет своей актуальности. В статье представлены результаты оценки влияния хелатных комплексов трехвалентного железа с диэтилен-триаминпентауксусной (ДТПА Fe) и этилендиаминтетрауксусной (ЭДТА Fe) кислотами на подвижность и доступность железа для растений в почве с реакцией среды, близкой к нейтральной. В модельном опыте с использованием дренажных колонок установлены закономерности распределения железа в толще почвы и его вынос с поливными водами из прикорневой зоны растений (10 см). На фоне однотипного распределения железа в почве отмечали более высокое содержание его подвижных форм в нижних слоях при использовании ЭДТА Fe. Выщелачивание железа из почвы отмечалось как при использовании ДТПА Fe, так и ЭДТА Fe. В условиях вегетационного опыта изучено влияние хелатных форм на накопление железа в растениях ячменя (*Hordeum vulgare* L.) в период их начального роста (11 суток). Содержание железа в побегах варьировало от 120 до 140 мкг/г, в корнях – от 233 до 244 мкг/г, при содержании в контрольном образце 200 мкг/г. Наибольшее накопление железа в проростках отмечали на уровне корневой системы в варианте опыта с ЭДТА Fe. Данные по накоплению железа в корнях ячменя коррелировали ($r = 0,99$) с данными по их зольности.

Ключевые слова: железо, хелатный комплекс, диэтилен-триаминпентауксусная кислота, этилендиаминтетрауксусная кислота, мобильность, дренажная колонка, выщелачивание

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Товстик Е. В., Захаров А. В. Влияние хелатной формы железа на его подвижность и фитодоступность при внесении в почву. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2023;24(1):107-113.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.107-113>

Поступила: 31.10.2022

Принята к публикации: 01.02.2023

Опубликована онлайн: 27.02.2023

The effect of the chelated form of iron on its mobility and phytoavailability when applied to the soil

© 2023. Evgeniya V. Tovstik✉, Andrey V. Zakharov

Vyatka State University, Kirov, Russian Federation

In spite of well-known mechanisms of iron consumption by plants from the soil and action patterns of iron ions in the soils, the work to eliminate the deficiency of this trace element in plants is still relevant. The article presents an assessment of the effect of iron (III) chelate complexes with diethylenetriaminepentaacetic acid (DTPA Fe) and ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA Fe) on the mobility and availability of iron for plants in soil with a pH close to neutral. In a model experiment with using of drainage columns, there were established the patterns of iron distribution in the soil and its removal with irrigation water from the root zone of plants (10 cm). Against the background of similar distribution of iron in the soil, a higher content of its mobile forms in the lower layers was noted when using EDTA Fe. The leaching of iron from the soil was confirmed using both DTPA Fe and EDTA Fe. The vegetation experiment revealed the effect of chelate forms on the accumulation of iron in barley plants (*Hordeum vulgare* L.) during their early growth period (11 days). The iron content in the shoots varied from 120 to 140 µg/g, in the roots – from 233 to 244 µg/g, with a content of 200 µg/g in the control sample. A significant contribution to the accumulation of iron in barley seedlings was observed at the level of the root system in the experiment with EDTA Fe. Data on the accumulation of iron in barley roots were correlated ($r = 0.99$) with data on their ash content.

Keywords: iron, chelate complex, diethylenetriaminepentaacetic acid, ethylenediaminetetraacetic acid, mobility, drainage column, leaching

Acknowledgements: the research was carried out without financial support within initiative theme.

The authors thank the reviewers for their comments to improve the manuscript for the publication.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citations: Tovstik E. V., Zakharov A. V. The effect of the chelated form of iron on its mobility and phytoavailability when applied to the soil. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2023;24(1):107-113. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2023.24.1.107-113>

Received: 31.10.2022

Accepted for publication: 01.02.2023

Published online: 27.02.2023

Широкий спектр клеточных процессов, в которых принимают участие микроэлементы, определяет значимую роль этой группы химических веществ в жизни растений [1, 2]. Как избыток, так и недостаток микроэлементов опасен для растений, поскольку угнетает их рост, и может приводить к гибели [3, 4].

Дефицит железа в растениях, возникающий чаще всего в почвах с щелочной реакцией среды, является распространенной проблемой сельскохозяйственного производства [5]. Известно, что с каждым увеличением на единицу значения рН почвы растворимость соединений железа уменьшается ориентировочно в 1000 раз [6]. Для компенсации дефицита железа в почве используют его водорастворимые неорганические соли и хелаты. Последние позволяют не только восполнить запас железа в почве, но и обогатить растениеводческую продукцию микроэлементами, улучшить фитосанитарное состояние посевов [7, 8, 9, 10].

Наряду с доказанной эффективностью, имеются сведения о том, что внесение хелатов в почву может сопровождаться переводом недоступных для растений форм микроэлементов, содержащихся в почве, в более доступные, подвижные формы [11]. В связи с этим возникают опасения, связанные с повышением ионной токсичности металлов в почве [12]. В пользу данного заключения говорит факт использования хелаторов в качестве экстрагентов потенциально токсичных металлов из почвы [13].

Диэтиленetriаминпентауксусная и этилендиаминтетрауксусная кислоты представляют собой синтетические комплексообразователи, которые широко используются в качестве секвестрантов металлов [14]. Имея сходную

структуру, они образуют с ионами железа (III) хелатные комплексы, имеющие относительно низкую стабильность в щелочных условиях [15]. При этом отмечается, что ДТПА Fe, по сравнению с ЭДТА Fe, при высоких значениях рН (до 7) более стабилен.

Цель исследований – сравнительная оценка подвижности и фитодоступности железа при корневой подкормке ДТПА Fe и ЭДТА Fe в почвах с реакцией среды, близкой к нейтральной.

Научная новизна работы – изучена подвижность железа в почве, показаны различия в выщелачивании железа из прикорневой зоны растений при использовании хелатных комплексов трехвалентного железа с диэтиленetriаминпентауксусной и этилендиаминтетрауксусной кислотами.

Материал и методы. Эксперимент проводили в лабораторных условиях. Объектами исследований являлись хелатные комплексы железа (III) с диэтиленetriаминпентауксусной (ДТПА Fe) и этилендиаминтетрауксусной (ЭДТА Fe) кислотами в препаративной форме микроудобрений (Россия). Содержание железа в ДТПА Fe и ЭДТА Fe составляло соответственно 11 и 13 %. Норма внесения – 6,04 г/м² в пересчете на железо.

Всего в ходе эксперимента было проведено две серии опытов с использованием растений и дренажных колонок. Варианты опыта включали: контроль (без удобрений) и два варианта с внесением удобрений в виде ДТПА Fe и ЭДТА Fe. Для опыта использовали агропочву, пробы которой были отобраны на территории Кировской области (табл.).

Таблица – Основные физико-химические характеристики почвы /
Table – The main physical and chemical indicators of the soil

Показатель / Indicator	Значение / Value	Описание / Description
pH _{KCl}	5,6±0,1	Реакция, близкая к нейтральной / Reaction is close to neutral
pH _{H₂O}	6,5±0,1	Нейтральная реакция / Neutral reaction
C _{орг.} , %	1,20±0,20	Низкая обеспеченность для растений, малогумусная почва / Low supply for plants, low humus soil
NO ₃ ⁻ , мг/кг	2,6±0,3	Низкая обеспеченность для растений / Low supply for plants
P ₂ O ₅ , мг/кг	72,6±3,5	Средняя обеспеченность для растений / Average supply for plants
K ₂ O, мг/кг	81±12	

В опытах с растениями использовали семена ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) сорта Белгородский 100 (ОАО Научно-произ-

водственная фирма «Белселект»). Выбор данного сорта в качестве тест-объекта был связан с его включением в Госреестр по Волго-

Вятскому региону и рекомендацией для возделывания в Кировской области. В рамках эксперимента с растениями проводили сравнительную оценку накопления железа в проростках ячменя, а также устанавливали их зольность. Для этого в пластиковые контейнеры, наполненные почвой, засевали семена (100 шт.), увлажняли дистиллированной водой. После появления первых всходов осуществляли однократный пролив почвы растворами хелатов железа. В контрольном варианте увлажнение почвы проводили дистиллированной водой. Выращивание растений осуществляли в лабораторных условиях (20 ± 2 °C; естественная освещенность) в течение 11 суток.

Опыт с дренажными колонками проводили с целью исследования влияния хелатных форм удобрений на подвижность железа в почве. Для этого в каждую колонку, наполненную почвой (1 кг, слой почвы толщиной 10 см), на основе расчетных значений величины полной влагоемкости (70,4 %) и оптимальной влажности (50,0 %) вносили дистиллированную воду и растворы хелатов железа путем разбрызгивания. Контролем служила почва без внесения удобрений.

В течение 10 суток с интервалом 1 сутки осуществляли пролив почвы в колонках путем разбрызгивания дистиллированной водой (200 мл) с одновременным сбором фильтрационной воды и учетом ее объема. Результаты опыта представляли в виде накопительных кривых на графиках, отражающих массу вымытого железа (III) из колонки.

По окончании эксперимента разделяли почвенный столб в колонках на 3 сектора послойно (верхний 0-3 см, средний 3-7 см, нижний 7-10 см) для исследования содержания в них подвижных соединений железа.

Содержание железа в проростках, пробах почвы и фильтрационной воды определяли на атомно-абсорбционном спектрометре («Спектр-5-4», Россия). Экстрагирование железа из почвы осуществляли ацетатно-аммонийным буферным раствором ($\text{pH} = 4,8$). Растения перед проведением исследования подвергали сухой минерализации с последующим переводом золы в раствор минерализата азотной кислотой¹. По данным сухой минерализации

проростков дополнительно определяли их зольность.

Статистическую обработку результатов измерений проводили с использованием программы Microsoft Excel. Для оценки числовых характеристик исследуемых показателей рассчитывали средние арифметические значения и стандартные ошибки. Существенность различий между вариантами определяли при уровне значимости $P \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение. Согласно нормативным документам, железо не относится к категории опасных веществ, для него не регламентированы величины ПДК и ОДК в почве². Однако, по данным литературы, известно, что в дерново-подзолистых почвах, характерных для территории Кировской области, содержание подвижных соединений железа может достигать 280 мг/кг. Оптимальный уровень легкоподвижных соединений железа в почвах для разных культур отмечается на уровне 1,3-7,0 мг/кг [16].

По результатам проведенных исследований, содержание подвижных соединений железа в почве контрольной колонки составляло $8,7 \pm 1,0$ мг/кг, что соответствовало оптимальному уровню его содержания в почве. В условиях применения хелатных форм удобрений содержание подвижных соединений железа в почве, по сравнению с контролем, возрастало до 32,9-43,0 мг/кг. При этом характер распределения железа в толще почвы был однотипен для исследованных хелатов (рис. 1).

Наибольшее содержание подвижных соединений железа фиксировали в верхнем слое почвы. Степень перемещения ионов железа в толще почвы отражало способность хелатов удерживать их в подвижных формах. Так, по сравнению с ЭДТА Fe, в условиях применения ДТПА Fe фиксировали более низкое содержание подвижных соединений железа в нижних слоях почвы, что могло свидетельствовать об их закреплении в почве.

Исследование концентрации ионов железа (III) в фильтрационных водах указывало на более высокую степень выщелачивания железа из почвы, в случае применения ЭДТА Fe (рис. 2).

¹Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.

²СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. 2021. URL: <https://fsvps.gov.ru/sites/default/files/npa-files/2021/01/28/sanpin1.2.3685-21.pdf>

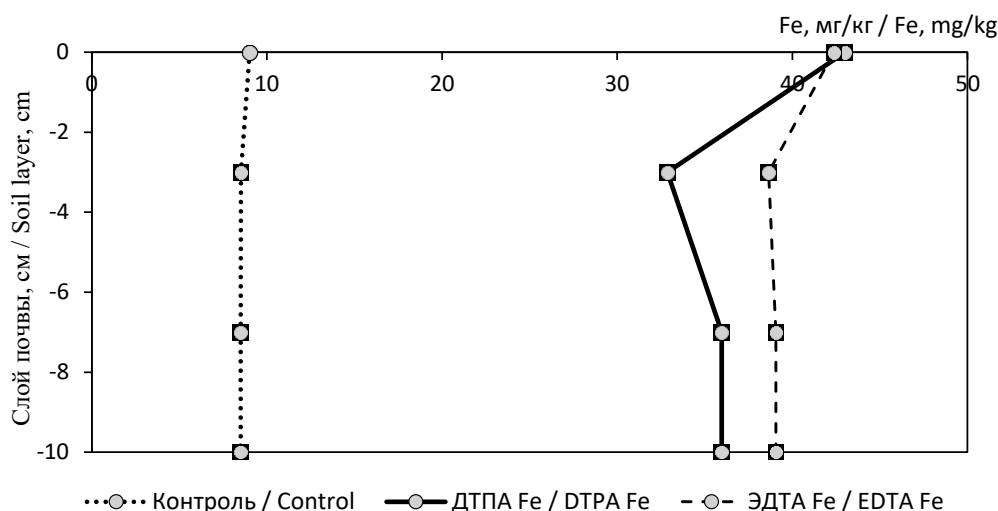


Рис. 1. Содержание и распределение подвижных соединений железа в толще почвы при внесении хелатных форм удобрений (на момент окончания опыта) /

Fig. 1. Content and distribution of mobile iron compounds in the soil layer when applying chelated forms of fertilizers (at the end of the experiment)

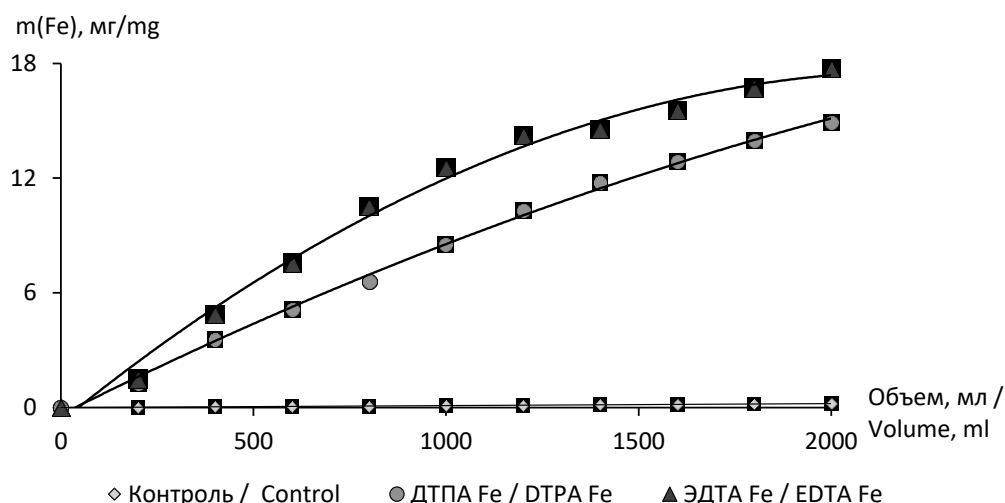


Рис. 2. Динамика вымывания ионов железа (III) из почвы при внесении хелатных форм удобрений /
Fig. 2. Dynamics of leaching of iron (III) ions from the soil when applying chelated forms of fertilizers

При этом следует отметить, что на первоначальных этапах наблюдений (объем промывных вод до 600 мл) разница в массе вымытого железа из почвы между ЭДТА Fe и ДТПА Fe была меньше (2,4 мг). С увеличением объема воды (800-1200 мл), прошедшей через колонки, разница в значениях увеличивалась до 4,0 мг.

Несмотря на то, что содержание подвижных форм железа в почве контрольного варианта было в 4-5 раз меньше, чем в варианте с хелатами ($8,7 \pm 1,0$ мг/кг – контрольный вариант; 32,9-43,0 мг/кг – опыт), отличную от контрольного варианта фитоэкстракцию железа

удалось установить только в случае ЭДТА Fe (рис. 3).

Известно, что доступность железа в почве для растений определяется многими факторами. Один из них pH почвенного раствора. При высоком содержании железа в почве его фитоэкстракция может быть низкой в связи со связыванием железа в труднорастворимые соединения при нейтральной реакции почвенной среды [17]. Согласно физико-химическим характеристикам, уровень pH солевой вытяжки из почв составил 5,6 ед., что соответствовало реакции среды, близкой к нейтральной (табл.).

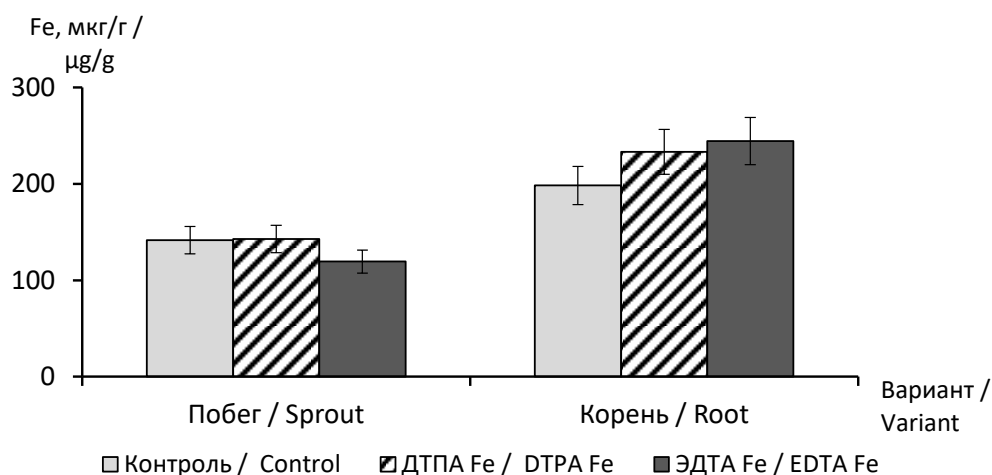


Рис. 3. Влияние хелатных форм удобрений на содержание железа в 11-суточных проростках ячменя /
Fig. 3. The effect of chelated forms of fertilizers on the iron content in 11-day-old barley seedlings

Неоднозначен также характер поведения комплексона и иона металла при контакте с растением. Установлено, что в этих условиях микроэлемент попадает внутрь растительной клетки без хелатора. Таким образом, главная роль комплексона заключается в транспортной функции и поддержании устойчивости комплекса в почве [18].

Известно, что железо в большей степени накапливается в корнях, в меньшей степени – в стеблях и листьях. В некоторых случаях достоверных различий в содержании железа в надземных и подземных органах растений не обнаруживается [19, 20]. Согласно полученным данным, независимо от варианта опыта более высокое накопление железа фиксировали в корнях. Содержание железа в побегах варьировало от 120 до 140 мкг/г, достоверных различий между контролем и опытными вариантами установлено не было. Более высокое накопление железа в корнях, по сравнению с контролем (200 мкг/г), отмечали в варианте опыта с хелатными формами удобрений (233-244 мкг/г).

Данные по накоплению железа в корнях ячменя коррелировали ($r = 0,99$) с данными

по их зольности (контроль – 7,2; ЭДТА Fe – 7,4; ДТПА Fe – 8,8 %).

Заключение. Дефицит железа у растений является распространенной проблемой на территориях, для которых характерны почвы с щелочной реакцией среды. Для ее решения применяют синтетические хелаты трехвалентного железа. Испытание микроудобрений железа в хелатной форме в почвах с pH среды, близкой к нейтральной, позволило установить, что ЭДТА Fe является более мобильным источником железа, чем ДТПА Fe.

Применение хелатных комплексов трехвалентного железа с диэтилентриаминпентауксусной и этилендиаминтетрауксусной кислотами при корневой подкормке в дозе 6,04 г/м² (в пересчете на железо) позволило увеличить содержание подвижных соединений железа в почве с 8,7 мг/кг до 32-43 и 38-43 мг/кг соответственно. Независимо от хелатной формы, на первоначальных этапах развития растений железо в большей степени накапливается в корнях, чем в побегах. Более высокое (на 44 мкг/г), относительно контроля, накопление железа в корнях ячменя зафиксировано в варианте опыта с ЭДТА Fe.

Список литературы

1. Assunção A. G. L., Cakmak I., Clemens S., González-Guerrero M., Nawrocki A., Thomine S. Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *Journal of Experimental Botany*. 2022;73(6):1789-1799. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erac014>
2. Собиров С. К. У., Турсунов Ж. И., Жалолов И. Ж., Камчиева Х. А. Определение и анализ микро-и макро-элементов растения *Glaucium elegans*, произрастающего в Узбекистане, методом нейтронной активации. *Universum: химия и биология*. 2021;5(83):76-79. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45765948> EDN: DUSQWG
3. Singh R., Mahajan J., Arora S., Bhardwaj R., Kaur T. Physiological role of mineral nutrition and their uptake during abiotic stress. *Environmental Stress Physiology of Plants and Crop Productivity*. 2021. pp. 75-88. DOI: <https://doi.org/10.2174/9781681087900121010009>
4. Zewide I., Sherefu A. Review Paper on Effect of Micronutrients for Crop Production. *Journal of Nutrition and Food Processing*. 2021;4(7):1-8. DOI: <https://doi.org/10.31579/2637-8914/063>

5. Gautam C. K., Tsai H. H., Schmidt W. Ironman tunes responses to iron deficiency in concert with environmental pH. *Plant Physiology*. 2021;187(3):1728-1745. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab329>
6. Gondal A. H., Hussain I., Ijaz A. B., Zafar A., Ch B. I., Zafar H., Sohail M. D., Niazi H., Touseef M., Khan A. A., Tariq M., Yousuf H., Usama M. Influence of Soil Ph and Microbes on Mineral Solubility and Plant Nutrition: A Review. *International Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 2021;5(1):71-81. URL: <https://zenodo.org/record/4625364>
7. Chaudhari D., Mehta P., Chaudhary N., Yadav M. Iron Ferti-fortification in grain Amaranthus (*Amaranthus hypochondriacus* L.). *The Pharma Innovation Journal*. 2021;10(3):635-638. URL: <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2021&vol=10&issue=3&ArticleId=5843>
8. Красильников В. В., Ложкин М. А., Коробейникова О. В. Влияние хелатных микроудобрений на фитосанитарное состояние, урожайность и качество зерна яровой пшеницы Йолдыз. Научные инновации в развитии отраслей АПК: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ижевск: ФГБОУ ВО Ижевская ГСХА, 2020. Т. 1. С. 45-49.
9. Сазанов А. В., Товстик Е. В., Козвонин В. А., Казакова А. А. Оценка биодоступности хелатного цинка в различных типах почвы. *Теоретическая и прикладная экология*. 2021;(1):181-187. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-181-187> EDN: TIJFHN
10. Pakhomova V. M., Daminova A. I. Chelated micronutrient fertilizers as effective antioxidants applied for foliar plant treatment. BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources». 2020;17:00057. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700057>
11. Макаренко Д. А., Глушко А. Н., Убаськина Ю. А., Поплевин Д. С. Основы создания средств комплексного управления развитием растений, обеспечивающих повышение производительности сельскохозяйственных культур. Спецвыпуск «Фотон-экспресс наука 2019». 2019;(6):68-69. DOI: <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16030>
12. Иванищев В. В. Роль железа в биохимии растений. Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019;(3):149-159. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41175096> EDN: YHJHZC
13. Hasegawa H., Al Mamun M. A., Tsukagoshi Y., Ishii K., Sawai H., Begume Z. A., Asami M. S., Maki T., Rahman I. M. M. Chelator-assisted washing for the extraction of lead, copper, and zinc from contaminated soils: A remediation approach. *Applied Geochemistry*. 2019;109:104397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104397>
14. Sillanpää M. Environmental Fate of EDTA and DTPA. Part of the Reviews of Environmental Contamination and Toxicology book series. 1997;152:85-111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1964-4_3
15. Abbaszadeh-Dahaji P., Masalehi F., Akhgar A. Improved Growth and Nutrition of Sorghum (*Sorghum bicolor*) Plants in a Low-Fertility Calcareous Soil Treated with Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Fe-EDTA. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020;20:31-42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00098-9>
16. Симонова О. А., Симонов М. В., Товстик Е. В. Содержание тяжелых металлов (Zn, Cu, Mn, Fe) в агропочвах нечерноземной зоны России в условиях применения минеральных удобрений (на примере г. Кирова). *Экобиотех*. 2019;2(3):302-306. DOI: <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-3-302-306> EDN: IIIJMR
17. Иванищев В. В. Доступность железа в почве и его влияние на рост и развитие растений. Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2019;(3):127-136. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41175094> EDN: ABRVWT
18. Петухов Д. В., Измestьев Е. С., Сазанов А. В., Зайцев М. А., Товстик Е. В. Применение аминокислот и их хелатных комплексов с микроэлементами в питании растений (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2022;(1):167-174. DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-167-174> EDN: TGQXRF
19. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 2006;88(11):1707-1719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
20. Симонова О. А., Симонов М. В., Товстик Е. В. Сортные особенности биоаккумуляции железа в растениях ячменя. *Таврический вестник аграрной науки*. 2020;3(23):142-151. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43992269> EDN: DREVPS

References

1. Assunção A. G. L., Cakmak I., Clemens S., González-Guerrero M., Nawrocki A., Thomine S. Micronutrient homeostasis in plants for more sustainable agriculture and healthier human nutrition. *Journal of Experimental Botany*. 2022;73(6):1789-1799. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erac014>
2. Sobirov S. K. U., Tursunov Zh. I., Zhalolov I. Zh., Kamchieva Kh. A. Determination and analysis of micro - and macroelements of the plant glaucium elegans growing in Uzbekistan by the method of neutron activation. *Universum: khimiya i biologiya*. 2021;5(83):76-79. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45765948>
3. Singh R., Mahajan J., Arora S., Bhardwaj R., Kaur T. Physiological role of mineral nutrition and their uptake during abiotic stress. *Environmental Stress Physiology of Plants and Crop Productivity*. 2021. pp. 75-88. DOI: <https://doi.org/10.2174/9781681087900121010009>
4. Zewide I., Sherefu A. Review Paper on Effect of Micronutrients for Crop Production. *Journal of Nutrition and Food Processing*. 2021;4(7):1-8. DOI: <https://doi.org/10.31579/2637-8914/063>
5. Gautam C. K., Tsai H. H., Schmidt W. Ironman tunes responses to iron deficiency in concert with environmental pH. *Plant Physiology*. 2021;187(3):1728-1745. DOI: <https://doi.org/10.1093/plphys/kiab329>
6. Gondal A. H., Hussain I., Ijaz A. B., Zafar A., Ch B. I., Zafar H., Sohail M. D., Niazi H., Touseef M., Khan A. A., Tariq M., Yousuf H., Usama M. Influence of Soil Ph and Microbes on Mineral Solubility and Plant Nutrition: A Review. *International Journal of Agriculture and Biological Sciences*. 2021;5(1):71-81. URL: <https://zenodo.org/record/4625364>

7. Chaudhari D., Mehta P., Chaudhary N., Yadav M. Iron Ferti-fortification in grain Amaranthus (*Amaranthus hypochondriacus* L.). The Pharma Innovation Journal. 2021;10(3):635-638.
URL: <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2021&vol=10&issue=3&ArticleId=5843>
8. Krasilnikov V. V., Lozhkin M. A., Korobeynikova O. V. Influence of chelate micronutrient fertilizers on the phytosanitary state, yield and grain quality of Yoldyz spring wheat. Scientific innovations in the development of agro-industrial complex: Proceedings of the Intern. scientific-practical conf. Izhevsk: FGBOU VO Izhevskaya GSKhA, 2020. Vol. 1. pp. 45-49.
9. Sazanov A. V., Tovstik E. V., Kozvonin V. A., Kazakova A. A. Assessment of the bioavailability of chelated zinc in various soil types. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2021;(1):181-187. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2021-1-181-187>
10. Pakhomova V. M., Daminova A. I. Chelated micronutrient fertilizers as effective antioxidants applied for foliar plant treatment. BIO Web Conf. International Scientific-Practical Conference «Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources». 2020;17:00057. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20201700057>
11. Makarenkov D. A., Glushko A. N., Ubaskina Yu. A., Poplevin D. S. Fundamentals of creating means of integrated management of plant development, providing an increase in the productivity of crops. *Spetsvyпуск «Foton-ekspress nauka 2019»*. 2019;(6):68-69. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2308-6920-2019-16030>
12. Ivanishchev V. V. Role of iron in plant biochemistry. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*. 2019;(3):149-159. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41175096>
13. Hasegawa H., Al Mamun M. A., Tsukagoshi Y., Ishii K., Sawai H., Begume Z. A., Asami M. S., Maki T., Rahman I. M. M. Chelator-assisted washing for the extraction of lead, copper, and zinc from contaminated soils: A remediation approach. *Applied Geochemistry*. 2019;109:104397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104397>
14. Sillanpää M. Environmental Fate of EDTA and DTPA. Part of the Reviews of Environmental Contamination and Toxicology book series. 1997;152:85-111. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1964-4_3
15. Abbaszadeh-Dahaji P., Masalehi F., Akhgar A. Improved Growth and Nutrition of Sorghum (*Sorghum bicolor*) Plants in a Low-Fertility Calcareous Soil Treated with Plant Growth-Promoting Rhizobacteria and Fe-EDTA. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2020;20:31-42. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00098-9>
16. Simonova O. A., Simonov M. V., Tovstik E. V. Content of heavy metals (zn, cu, mn, fe) in agrosols of a nonchernozem zone of Russia in the conditions of application of mineral fertilizers (on the example of Kirov). *Ekobiotech* = Ecobiotech. 2019;2(3):302-306. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31163/2618-964X-2019-2-3-302-306>
17. Ivanishchev V. V. A availability of iron in the soil and its influence the plant growth and development. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki*. 2019;(3):127-136. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41175094>
18. Petukhov D. V., Izmetev E. S., Sazanov A. V., Zaytsev M. A., Tovstik E. V. The use of amino acids and their chelate complexes with trace elements in plant nutrition (review). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya* = Theoretical and Applied Ecology. 2022;(1):167-174. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-1-167-174>
19. Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants. *Biochimie*. 2006;88(11):1707-1719. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biochi.2006.07.003>
20. Simonova O. A., Simonov M. V., Tovstik E. V. Varietal features of iron bioaccumulation in barley plants. *Tavrcheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Taurida herald of the agrarian sciences. 2020;3(23):142-151. (In Russ.).
URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43992269>

Сведения об авторах

☒ **Товстик Евгения Владимировна**, кандидат биол. наук, доцент, старший научный сотрудник ЦК «Экологические технологии и системы», доцент кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ул. Московская, д. 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: info@vyatsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>, e-mail: ev_tovstik@vyatsu.ru

Захаров Андрей Витальевич, преподаватель кафедры фундаментальной химии и методики обучения химии, ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», ул. Московская, д. 36, г. Киров, Российская Федерация, 610000, e-mail: info@vyatsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6182-8800>

Information about the authors

☒ **Evgeniya V. Tovstik**, PhD in Biology, senior researcher, the Center of Competence «Environmental Technologies and Systems», associate professor at the Department of Basic Chemistry and Chemistry Training Methodology, Vyatka State University, Moskovskaya St., 36, Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: info@vyatsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1861-6076>, e-mail: ev_tovstik@vyatsu.ru

Andrey V. Zakharov, teacher, the Department of Basic Chemistry and Chemistry Training Methodology, Vyatka State University, Moskovskaya St., 36, Kirov, Russian Federation, 610000, e-mail: info@vyatsu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6182-8800>

☒ – Для контактов / Corresponding author