

УДК 57.2788

## НАНОУДОБРЕНИЯ - ИСТОЧНИК ЖЕЛЕЗА

**Шумейко Сергей Александрович,**

Младший научный сотрудник

Институт общей физики им. А.М.Прохорова

Москва, Россия

Shumik92@gmail.com

### Аннотация

Необходимость в разработке эффективных и передовых методов интенсификации сельского хозяйства в условиях глобального роста численности населения очевидна. Одним из основных способов увеличения производства сельскохозяйственной продукции растительного происхождения остаётся использование удобрений. В свете стремительного развития нанотехнологий за последние десятилетия всё больше внимания уделяется применению наноудобрений как альтернативы традиционным минеральным удобрениям. Благодаря своим уникальным свойствам, обусловленным небольшим размером, наноудобрения обладают множеством преимуществ, таких как высокая активность, точное дозирование, целевая доставка к растениям, снижение накопления в почве и грунтовых водах, низкая токсичность для почвенной микрофлоры и длительный эффект. Настоящий обзор обобщает информацию, накопленную за последние 10 лет, о применении наноудобрений как источников ключевых микроэлементов таких как железо, для сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** наноудобрения, наночастицы, микроэлементы, питательные вещества, удобрения, сельское хозяйство.

## NANOFERTILIZERS AS A SOURCE OF IRON

**Sergey A. Shumeyko,**

Shumik92@gmail.com

Junior Researcher

Prokhorov General Physics Institute

Moscow, Russia

### ABSTRACT

The need to develop effective and advanced methods of agricultural intensification in the context of global population growth is obvious. One of the main ways to increase the production of plant-based agricultural products remains the use of fertilizers. In light of the rapid development of nanotechnology in recent decades, more and more attention is being paid to the use of nano-fertilizers as an alternative to traditional mineral fertilizers. Due to their unique

properties resulting from their small size, nanofertilizers offer many advantages such as high activity, precise dosage, targeted delivery to plants, reduced accumulation in soil and groundwater, low toxicity to soil microflora and long-lasting effect. This review summarizes the information accumulated over the last 10 years on the use of nanofertilizers as sources of key micronutrients such as iron for agricultural crops.

**Keywords:** nanofertilizers, nanoparticles, micronutrients, nutrients, fertilizers, agriculture.

### Введение

Микроэлементы играют важную роль во многих физиологических процессах растений. Они требуются в небольшом количестве ( $\leq 100$  частей на миллион или  $\leq 100$  мг/л) и выступают в роли катализаторов различных метаболических процессов [1]. Известно около 20 микроэлементов, но основными для растений являются железо (Fe), цинк (Zn), марганец (Mn), бор (B), медь (Cu), молибден (Mo), которые входят в состав раствора Хогланда [2]. Микроэлементы могут входить в состав комплексных удобрений, а также применяться отдельно, чаще в виде внекорневой подкормки или внесения в почву. На их доступность серьезно влияют pH почвенного раствора, гранулометрический состав и содержание органического вещества почвы [3]. Таким образом, учитывая возможные обстоятельства, оптимальная доступность микроэлементов может быть достигнута за счет применения их в виде наноудобрений.

Наноудобрения представляют собой наноматериалы, содержащие важные для растений макро- и микроэлементы, либо выступающие в роли наноносителей для традиционных химических удобрений. Это помогает более эффективно доставлять питательные вещества растениям. Исследования показывают, что наноудобрения обладают большей эффективностью по сравнению с обычными химическими удобрениями благодаря уникальным механизмам действия, которые улучшают их усвоение, уменьшают потери питательных веществ и снижают негативное воздействие на окружающую среду.

Описанию наноудобрений, содержащих микроэлементы железа, их характеристики и влияние на растения посвящена данная обзорная статья.

### Наноудобрения – источник железа

Железо – неотъемлемый компонент многих растительных белков, участвует в синтезе хлорофилла и клеточном дыхании [4]. Дефицит железа – серьезное нарушение питания растений, основным симптомом которого является межжилковый хлороз, появляющийся в первую очередь на молодых листьях, так как железо не является реутилизируемым элементом [5].

Хогланд и Арнон [2] обнаружили, что большинству растений обычно требуется 1-5 мг л<sup>-1</sup> Fe в почвенном растворе. Ранние исследования применения наночастиц магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> при культивировании многолетнего райграса (*Lolium perenne* L.) и тыквы (*Cucurbita mixta* cv. white cushaw) в гидропонике продемонстрировали их непригодность в качестве Fe-содержащего наноудобрения, так как обработки повышали окислительный стресс, и концентрация [Fe] в обеих культурах не увеличилась, что говорило о неспособности наночастиц к перемещению в растениях [6]. Дальнейшие исследования показали, что применение супермагнитных наночастиц железа (SPION) (30, 45 и 60 мг л<sup>-1</sup>) в тепличном гидропонном производстве значительно улучшило содержание хлорофилла в субапикальных листьях сои (*Glycine max* (L.) Merr.) по сравнению с применением комплекса железа с этилендиаминтетрауксусной кислотой (Fe-EDTA) [7]. Результаты показали, что Fe-NPs в концентрации 45 мг л<sup>-1</sup> могут служить лучшим источником микроэлемента по

сравнению с Fe-EDTA и более эффективны в борьбе с хлорозом, вызванным дефицитом железа. Более того, была повышена эффективность поглощения железа в растениях, что в конечном итоге повысило содержание хлорофилла.

В другом эксперименте показатели роста и урожайности черноглазого горошка были значительно улучшены при внесении наночастиц железа в качестве внекорневой подкормки в дозе 500 мг·л<sup>-1</sup> [8]. Более того, внесение Fe-NPs улучшило действие совместно применяемых Mg-NPs. Применение ультрамалых SPION на бобовых растениях (*Vicia faba* L. var. *major* Harz) в виде трехкратного опрыскивания через 60, 90 и 120 дней после посева показало существенное преимущество по показателям роста, урожайности, качества семян, накопления фотосинтетических пигментов, по сравнению с использованием сульфатом железа и хелатированного железа [9]. Наблюдалось также увеличение размера и толщины листьев, общее содержание углеводов, сырого протеина, и накопление основных макро- и микроэлементов. Таким образом, применение SPION может стать эффективной стратегией удобрения в засушливых районах. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-NPs также оказались эффективными при грунтовании семян пшеницы [10]. Обработка в концентрации 500 мг/л оказалась наиболее эффективной из диапазона концентраций от 0,8 до 1000 мг/л, не вызвала токсических эффектов (пониженное содержание MDA и активность PSII соответствовала активности контрольных растений, обработанных Fe-EDTA). Усиление фотосинтеза и повышенное содержание P, K и Fe привели к общему ускорению роста листьев.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs ряде исследований также показали свою эффективность в качестве нанодобрения. Так, Al-Amri et al. [11] исследовали активность Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs с различными размерами (8-10, 20-40 и 30-50 нм) при выращивании в гидропонной системе пшеницы. Результаты показали большую эффективность Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs размером 20-40 нм, что выражалось в более значимом увеличении длины корней, высоты растений, биомассы и содержания фотосинтетических пигментов (на 40-50%). Наночастицы хорошо поглощались растениями и перемещались из корней в листья, увеличивая содержание железа в тканях растений [11].

Liu et al., [12] также доказана эффективность применения  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs в качестве источника микроэлемента. В данной работе также исследовался важный аспект с точки зрения практического применения нанодобрений – фитотоксичность. Также сообщалось о высокой эффективности применения  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs и  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs, покрытых цитратом, при выращивании сои (*Glycine max* (L.) Merr.) в виде внекорневого удобрения и внесения в почву при прорастании сои [13]. Примечательно, что фитотоксических свойств от применения используемых нанодобрений не наблюдалось ни на одной из стадий роста растений.  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> способствовали увеличению длины корней по сравнению с объемными аналогами удобрений с концентрацией более 500 мг л<sup>-1</sup>.  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs, покрытые цитратом, при молярном соотношении наночастиц к цитрату 1:3 повышали эффективность нерастворимого Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для внекорневого внесения, значительно улучшая параметры фотосинтеза при опрыскивании [13].

В проведенных опытах по выращиванию растений помело (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) в гидропонной установке, 50 мг/л  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs, добавленные в питательный раствор, значительно повышали уровни экспрессии гена FRO2 и, обладали более высокой активностью железоредуктазы по сравнению как с контролем (без Fe), так и с воздействием Fe(II)-EDTA, таким образом способствуя трансформации железа и повышая толерантность растений к дефициту железа [14]. При этом наблюдалось увеличение концентрации хлорофилла и растворимых белков, повышалась активность корневой системы. Транспорт наночастиц из корней в листья не осуществлялся. При фоллиарной обработке растений помело было также установлено, что  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs могут проникать в листья растений, в то время как транспорт NPs к корням не осуществляется. В целом, опрыскивание не оказало

существенного влияния на параметры роста растений [15]. В другой работе авторы подтвердили эффективность вносимых  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs в почву в концентрации 50 мг/л в отношении культуры арбуза (*Citrullus lanatus* L.) [16]. Было обнаружено, что обработка  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs способствовала увеличению содержания растворимых сахаров, белка и хлорофилла в растениях, но увеличивала окислительный стресс через неделю после обработки, который устранялся по мере роста арбуза. Примечательно, что авторы данной работы также обнаружили, что  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs могут обладать пероксидазоподобной активностью [16]. В другой работе также сообщалось, что  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs, стабилизированные легированием иттрием, внесенные в почву с орошением после засухи, позволили снизить уровень MDA, перекиси водорода, увеличили скорость роста листьев, сырой массы, содержания хлорофилла рапса (*Brassica napus* L.), по сравнению с внесением хелатированного железа [17].

В другом исследовании, проведенном Li et al. [18] при воздействии магнитных Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs размером 9 и 18 нм в концентрациях 2 mg/L, 20 mg/L, и 50 mg/L на растения арбуза (*Citrullus lanatus* (Thunb.) Matsum. & Nakai) положительный эффект наблюдалось преимущественно при использовании концентрации 20 мг/л. Наблюдалось увеличение таких физиологических показателей, таких как активность корней, активность ферментов CAT, POD и SOD, содержание MDA, для обоих размеров частиц [18]. Для более крупных наночастиц, размером 18 нм, существенно повышалась активность редуктазы железа по сравнению с внесением Fe<sup>2+</sup>, понижалась концентрация хлорофилла, а при использовании 9 нм Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs, наблюдалось повышение содержания апопластного железа в корнях.

Также были проведены сравнительные исследования по изучению действия  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-NPs на физиологию и качество плодов мускусной дыни, выращенной в горшках в контролируемых условиях [19]. Вносимые NPs оксида железа обоих видов не повлияли на содержание железа в стебле, листьях и плодах, однако стимулировали рост растений, способствовали увеличению концентрации хлорофилла на 3 неделе роста, оказали положительное влияние на массу плодов и содержание в них витамина С [19].

Yoon et al. [20] в экспериментах с использованием растений *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. также была доказана эффективность применения наноразмерного нулевого валентного железа ZVI-NPs в концентрации 0.5 г/кг почвы в качестве источника железа [20]. Полученные результаты доказывают, что ZVI-NPs обладает дополнительными преимуществами в качестве наноудобрения, улучшая раскрытие устьиц и индуцируя активацию H<sup>+</sup>-АТФазы плазматической мембраны, ускоряя поглощение CO<sub>2</sub> растениями [20]. Однако при культивировании огурца (*Cucumis sativus* L.) в почве и в беспочвенных системах выращивания, применение ZVI-NPs в концентрациях 0, 250, 1000 mg L<sup>-1</sup> не оказывало влияния на параметры роста растений, при этом электронная микроскопия выявила, что трансформированные наночастицы железа локализуются в мембране клеток корня и вакуолях клеток паренхимы листа, при этом свидетельств первичной транслокации ZVI-NPs из корней в побеги обнаружено не было [21].

Сравнение ранее рассмотренных наночастиц: ZVI-NPs (20 нм), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-NPs (20 нм) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs (20-30 нм) в 3-х концентрациях (50, 250, 500 мг/л) при корневом внесении в гидропонную культуру показало, что низкие дозы (50 мг/л-1) ZVI-NPs и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-NPs улучшали рост культуры в условиях дефицита железа, но в присутствии в растворе Fe(II)-EDTA ни один из видов рассматриваемых NPs не оказывал положительного воздействия на рост растений риса, а при концентрациях 500 мг/л-1 наблюдалось угнетение роста растений (уменьшение объема корней, уменьшение биомассы) и усиление окислительного стресса [22]. Таким образом, подтверждена возможность использования ZVI-NPs и Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> в качестве альтернативы Fe-удобрений на культуре риса при условии железодефицита.

Интересно отметить, что наночастицы оксида железа также обладают противогрибковой активностью, что подтверждено рядом исследований коллоидных наночастиц оксида железа (20 мкг/мл), наночастиц Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NPs синтезированных с помощью *Bacillus subtilis* (1 мг/мл), а также humic acid-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-NPs [23], что может быть использовано для одновременной подкормки и профилактики грибных заболеваний.

#### Заключение

Таким образом, использование наноудобрений в сельском хозяйстве может оказаться весьма перспективным по сравнению с традиционными минеральными удобрениями. Основные преимущества наноудобрений заключаются в их более выраженном влиянии на рост и урожайность сельскохозяйственных культур, а также в высокой эффективности при использовании меньших концентраций по сравнению с обычными удобрениями. Следует отметить, что традиционные минеральные удобрения могут оказывать негативное воздействие на окружающую среду, вызывая эвтрофикацию и накопление избыточных веществ в почве и грунтовых водах. Эффективность применения наночастиц и наноматериалов варьируется в зависимости от вида растения, способа внесения, размера, формы, метода производства и концентрации наночастиц. Несмотря на множество данных, подтверждающих высокую эффективность наноудобрений, количество исследований по этой теме остаётся ограниченным. Особо стоит подчеркнуть нехватку научной информации о биобезопасности наноматериалов в сельском хозяйстве. Важно продолжать детальные токсикологические исследования наноудобрений, чтобы оценить их возможное влияние на здоровье человека и животных, учитывая риск их попадания в пищевые продукты.

#### Список литературы:

1. Sidhu M. K., Raturi H. C., Kachwaya D. S., Sharma A. Роль микроэлементов в производстве овощей: обзор // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. – 2019. – Т. 8, № 15. – С. 332-340.
2. Hoagland D. R., Arnon D. I. Метод выращивания растений без почвы на водной культуре // *Circular. California Agricultural Experiment Station*. – 1950. – Т. 347, № 2-е издание.
3. Использование питательных веществ в сельскохозяйственных культурах. / Fageria N. К.: CRC Press, 2016.
4. Kasozi N., Tandlich R., Fick M., Kaiser H., Wilhelmi B. Добавки железа и их управление в аквапонных системах: обзор // *Aquaculture Reports*. – 2019. – Т. 15.
5. Korcak R. F. Хлороз, вызванный дефицитом железа // *Horticultural Reviews*. – 1987. – Т. 9. – С. 133-186.
6. Wang P., Li C., Gong H., Jiang X., Wang H., Li K. Влияние условий синтеза на морфологию наночастиц гидроксиапатита, полученных методом мокрой химии // *Powder Technology*. – 2010. – Т. 203, № 2. – С. 315-321.
7. Ghafariyan M. H., Malakouti M. J., Dadpour M. R., Stroeve P., Mahmoudi M. Влияние магнитных наночастиц на содержание хлорофилла у сои // *Environmental Science & Technology*. – 2013. 10.1021/es402249b.
8. Delfani M., Baradarn Firouzabadi M., Farrokhi N., Makarian H. Некоторые физиологические реакции черноглазого гороха на железные и магниевые наноудобрения // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2014. – Т. 45, № 4. – С. 530-540.

9. Mahmoud A. W. M., Ayad A. A., Abdel-Aziz H. S., Williams L. L., El-Shazoly R. M., Abdel-Wahab A., Abdeldaym E. A. Внекорневая обработка различными источниками железа улучшает морфо-физиологические характеристики и питательное качество бобов, выращиваемых на песчаной почве // *Plants*. – 2022. – Т. 11, № 19. – С. 2599.
10. Feng Y., Kreslavski V. D., Shmarev A. N., Ivanov A. A., Zharmukhamedov S. K., Kosobryukhov A., Yu M., Allakhverdiev S. I., Shabala S. Влияние наночастиц оксида железа ( $Fe_3O_4$ ) на рост, фотосинтез, антиоксидантную активность и распределение минеральных элементов у пшеницы (*Triticum aestivum*) // *Plants*. – 2022. – Т. 11, № 14.
11. Al-Amri N., Tombuloglu H., Slimani Y., Akhtar S., Barghouthi M., Almessiere M., Alshammari T., Baykal A., Sabit H., Ercan I., Ozcelik S. Влияние размера наноматериалов оксида железа (III) на рост, поглощение и транспортировку в обычной пшенице (*Triticum aestivum* L.) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2020. – Т. 194.
12. Liu R., Zhang H., Lal R. Влияние стабилизированных наночастиц оксидов меди, цинка, марганца и железа в низких концентрациях на прорастание семян салата (*Lactuca sativa*): нанотоксиканты или наноудобрения? // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2016. – Т. 227, № 1.
13. Alidoust D., Isoda A. Влияние наночастиц  $\gamma Fe_2O_3$  на фотосинтетическую активность сои (*Glycine max* (L.) Merr.): внекорневое опрыскивание против добавки в почву // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2013. – Т. 35, № 12. – С. 3365-3375.
14. Hu J., Guo H., Li J., Gan Q., Wang Y., Xing B. Сравнительное воздействие наночастиц оксида железа и ионов железа на рост *Citrus maxima* // *Environmental Pollution*. – 2017. – Т. 221. – С. 199-208.
15. Hu J., Guo H., Li J., Wang Y., Xiao L., Xing B. Взаимодействие наночастиц  $\gamma-Fe_2O_3$  с листьями *Citrus maxima* и соответствующие физиологические эффекты при внекорневом применении // *Journal of Nanobiotechnology*. – 2017. – Т. 15, № 1.
16. Wang Y., Hu J., Dai Z., Li J., Huang J. Оценка физиологических изменений у арбуза (*Citrullus lanatus*) при воздействии наночастиц оксида железа *in vitro* // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2016. – Т. 108. – С. 353-360.
17. Palmqvist N. G. M., Seisenbaeva G. A., Svedlindh P., Kessler V. G. Наночастицы маггемита действуют как наноэнзимы, улучшая рост и устойчивость к абиотическим стрессам у *Brassica napus* // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – Т. 12, № 1.
18. Li J., Chang P. R., Huang J., Wang Y., Yuan H., Ren H. Физиологические эффекты магнитных наночастиц оксида железа на арбуз // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2013. – Т. 13, № 8. – С. 5561-5567.
19. Wang Y., Wang S., Xu M., Xiao L., Dai Z., Li J. Воздействие наночастиц  $\gamma-Fe_2O_3$  и  $Fe_3O_4$  на физиологию и качество плодов мускусной дыни (*Cucumis melo*) // *Environmental Pollution*. – 2019. – Т. 249. – С. 1011-1018.
20. Yoon H., Kang Y.-G., Chang Y.-S., Kim J.-H. Влияние наночастиц элементарного железа на фотосинтез и биохимическую адаптацию у почвенно-выращиваемого *Arabidopsis thaliana* // *Nanomaterials*. – 2019. – Т. 9, № 11.
21. Dwivedi A. D., Yoon H., Singh J. P., Chae K. H., Rho S.-c., Hwang D. S., Chang Y.-S. Поглощение, распределение и трансформация наночастиц элементарного железа в

съемном растении *Cucumis sativus* // *Environmental Science & Technology*. – 2018. – Т. 52, № 17. – С. 10057-10066.

22. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Z., Chetwynd A. J., Ma C., Bai T., Hao Y., Rui Y. Физиологическое воздействие нулевых наночастиц железа, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на рис и их потенциальное использование в качестве удобрений с железом // *Environmental Pollution*. – 2021. – Т. 269.
23. Bibi H., Haroon U., Farhana, Kamal A., Akbar M., Anar M., Batool S. S., Bilal A., Jabeen H., Ahmed J., Chaudhary H. J., Munis M. F. H. Влияние бактериально синтезированных наночастиц на качество и эффективность борьбы с болезнями после сбора урожая у абрикосов и мушмулы // *Journal of Food Science*. – 2023. – Т. 88, № 9. – С. 3920-3934.

### References:

1. Sidhu M. K., Raturi H. C., Kachwaya D. S., Sharma A. Role of micronutrients in vegetable production: A review // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. – 2019. – Т. 8, № 1S. – С. 332-340.
2. Hoagland D. R., Arnon D. I. The water-culture method for growing plants without soil // *Circular. California agricultural experiment station*. – 1950. – Т. 347, № 2nd edit.
3. The use of nutrients in crop plants. / Fageria N. K.: CRC press, 2016.
4. Kasozi N., Tandlich R., Fick M., Kaiser H., Wilhelmi B. Iron supplementation and management in aquaponic systems: A review // *Aquaculture Reports*. – 2019. – Т. 15.
5. Korcak R. F. Iron deficiency chlorosis // *Horticultural Reviews*. – 1987. – Т. 9. – С. 133-186.
6. Wang P., Li C., Gong H., Jiang X., Wang H., Li K. Effects of synthesis conditions on the morphology of hydroxyapatite nanoparticles produced by wet chemical process // *Powder Technology*. – 2010. – Т. 203, № 2. – С. 315-321.
7. Ghafariyan M. H., Malakouti M. J., Dadpour M. R., Stroeve P., Mahmoudi M. Effects of Magnetite Nanoparticles on Soybean Chlorophyll // *Environmental Science & Technology*. – 2013.10.1021/es402249b.
8. Delfani M., Baradarn Firouzabadi M., Farrokhi N., Makarian H. Some Physiological Responses of Black-Eyed Pea to Iron and Magnesium Nanofertilizers // *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. – 2014. – Т. 45, № 4. – С. 530-540.
9. Mahmoud A. W. M., Ayad A. A., Abdel-Aziz H. S., Williams L. L., El-Shazoly R. M., Abdel-Wahab A., Abdeldaym E. A. Foliar application of different iron sources improves morpho-physiological traits and nutritional quality of broad bean grown in sandy soil // *Plants*. – 2022. – Т. 11, № 19. – С. 2599.
10. Feng Y., Kreslavski V. D., Shmarev A. N., Ivanov A. A., Zharmukhamedov S. K., Kosobryukhov A., Yu M., Allakhverdiev S. I., Shabala S. Effects of Iron Oxide Nanoparticles (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) on Growth, Photosynthesis, Antioxidant Activity and Distribution of Mineral Elements in Wheat (*Triticum aestivum*) Plants // *Plants*. – 2022. – Т. 11, № 14.
11. Al-Amri N., Tombuloglu H., Slimani Y., Akhtar S., Barghouthi M., Almessiere M., Alshammari T., Baykal A., Sabit H., Ercan I., Ozcelik S. Size effect of iron (III) oxide nanomaterials on the growth, and their uptake and translocation in common wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2020. – Т. 194.

12. Liu R., Zhang H., Lal R. Effects of Stabilized Nanoparticles of Copper, Zinc, Manganese, and Iron Oxides in Low Concentrations on Lettuce (*Lactuca sativa*) Seed Germination: Nanotoxicants or Nanonutrients? // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2016. – Т. 227, № 1.
13. Alidoust D., Isoda A. Effect of  $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles on photosynthetic characteristic of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.): foliar spray versus soil amendment // *Acta Physiologiae Plantarum*. – 2013. – Т. 35, № 12. – С. 3365-3375.
14. Hu J., Guo H., Li J., Gan Q., Wang Y., Xing B. Comparative impacts of iron oxide nanoparticles and ferric ions on the growth of *Citrus maxima* // *Environmental Pollution*. – 2017. – Т. 221. – С. 199-208.
15. Hu J., Guo H., Li J., Wang Y., Xiao L., Xing B. Interaction of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles with *Citrus maxima* leaves and the corresponding physiological effects via foliar application // *Journal of Nanobiotechnology*. – 2017. – Т. 15, № 1.
16. Wang Y., Hu J., Dai Z., Li J., Huang J. In vitro assessment of physiological changes of watermelon (*Citrullus lanatus*) upon iron oxide nanoparticles exposure // *Plant Physiology and Biochemistry*. – 2016. – Т. 108. – С. 353-360.
17. Palmqvist N. G. M., Seisenbaeva G. A., Svedlindh P., Kessler V. G. Maghemite Nanoparticles Acts as Nanozymes, Improving Growth and Abiotic Stress Tolerance in *Brassica napus* // *Nanoscale Research Letters*. – 2017. – Т. 12, № 1.
18. Li J., Chang P. R., Huang J., Wang Y., Yuan H., Ren H. Physiological Effects of Magnetic Iron Oxide Nanoparticles Towards Watermelon // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2013. – Т. 13, № 8. – С. 5561-5567.
19. Wang Y., Wang S., Xu M., Xiao L., Dai Z., Li J. The impacts of  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nanoparticles on the physiology and fruit quality of muskmelon (*Cucumis melo*) plants // *Environmental Pollution*. – 2019. – Т. 249. – С. 1011-1018.
20. Yoon H., Kang Y.-G., Chang Y.-S., Kim J.-H. Effects of Zerovalent Iron Nanoparticles on Photosynthesis and Biochemical Adaptation of Soil-Grown *Arabidopsis thaliana* // *Nanomaterials*. – 2019. – Т. 9, № 11.
21. Dwivedi A. D., Yoon H., Singh J. P., Chae K. H., Rho S.-c., Hwang D. S., Chang Y.-S. Uptake, Distribution, and Transformation of Zerovalent Iron Nanoparticles in the Edible Plant *Cucumis sativus* // *Environmental Science & Technology*. – 2018. – Т. 52, № 17. – С. 10057-10066.
22. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Z., Chetwynd A. J., Ma C., Bai T., Hao Y., Rui Y. Physiological impacts of zero valent iron,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers // *Environmental Pollution*. – 2021. – Т. 269.
23. Bibi H., Haroon U., Farhana, Kamal A., Akbar M., Anar M., Batool S. S., Bilal A., Jabeen H., Ahmed J., Chaudhary H. J., Munis M. F. H. Impact of bacterial synthesized nanoparticles on quality attributes and postharvest disease control efficacy of apricot and loquat // *Journal of Food Science*. – 2023. – Т. 88, № 9. – С. 3920-3934.