

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29>

ФОЛИАРНОЕ БИОБОГАЩЕНИЕ ЖЕЛЕЗОМ РЕДИСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРГАНИЧЕСКОЙ И НЕОРГАНИЧЕСКОЙ ФОРМ В УСЛОВИЯХ СВЕТОКУЛЬТУРЫ

Научная статья

Волкова Е.Н.^{1,*}, Спиридонова М.В.², Шилова О.А.³, Хамова Т.В.⁴, Синявина Н.Г.⁵, Панова Г.Г.⁶

¹ ORCID : 0000-0001-7429-4046;

³ ORCID : 0000-0002-3856-9054;

⁶ ORCID : 0000-0002-1132-9915;

^{1,2,5,6} Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Российская Федерация

^{3,4} Институт химии силикатов им И.В. Гребенщикова РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ele-ven[at]yandex.ru)

Аннотация

В статье обсуждаются экспериментальные данные, показывающие возможность эффективного некорневого биобогащения железом продукции редиса двух сортов при выращивании в условиях светокультуры с использованием наночастиц элемента магнетита и маггемита и хелатной формы Fe-ДТПА. Максимальное содержание железа в листьях редиса достигало 322,7 мг/кг, в корнеплодах – 164,0 мг/кг. Наибольший эффект по биобогащению корнеплодов редиса сорта Петербургский фиолетовый был получен в вариантах с магнетитом 0,05%, маггемитом 0,05% и хелатом железа 0,01% – на 79%, 95% и 138% к контролю (вода) соответственно. У сорта Октава максимальное бионакопление железа корнеплодами отмечали при обработке маггемитом в концентрациях 0,01% и 0,05%. Хелат железа 0,1% на обоих сортах увеличивал биомассу корнеплодов на 21,7-40,3% к контролю. Установлена зависимость между биомассой корнеплодов и содержанием в них железа, которая аппроксимировалась сигмоидной функцией с $R^2=0,74$. Увеличение содержания железа в продукции редиса в определенном диапазоне нетоксичных концентраций может способствовать решению проблемы дефицита железа в пищевом рационе.

Ключевые слова: биофортификация, редис, светокультура, наножелезо, магнетит, маггемит.

FOLIAR IRON BIOFERTILIZATION OF RADISH USING ORGANIC AND INORGANIC FORMS UNDER LIGHT CULTURE CONDITIONS

Research article

Volkova E.N.^{1,*}, Spiridonova M.V.², Shilova O.A.³, Khamova T.V.⁴, Sinyavina N.G.⁵, Panova G.G.⁶

¹ ORCID : 0000-0001-7429-4046;

³ ORCID : 0000-0002-3856-9054;

⁶ ORCID : 0000-0002-1132-9915;

^{1,2,5,6} Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

^{3,4} Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Grebenshchikova RAS, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (ele-ven[at]yandex.ru)

Abstract

The article discusses experimental data showing the possibility of effective foliar iron bio-enrichment of radish production of two varieties when grown under light culture conditions using nanoparticles of the element magnetite and maghemite and chelate form Fe-DTPA. The maximum iron content in radish leaves reached 322.7 mg/kg, in root crops – 164.0 mg/kg. The greatest effect on bio-enrichment of radish root crops of the variety Peterburgsky purple was obtained in variants with magnetite 0.05%, maghemite 0.05% and iron chelate 0.01% – by 79%, 95% and 138% to the control (water), respectively. The maximum bioavailability of iron by root crops was observed in the variety Octava when treated with maghemite in concentrations of 0.01% and 0.05%. Iron chelate 0.1% on both varieties increased root biomass by 21.7-40.3% to the control. The relationship between root biomass and iron content in root crops was established, which was approximated by a sigmoid function with $R^2=0.74$. Increase of iron content in radish production in a certain range of non-toxic concentrations can contribute to solving the problem of iron deficiency in the diet.

Keywords: biofortification, radish, light culture, nano-iron, magnetite, maghemite.

Введение

Растительные продукты содержат широкий спектр веществ, необходимых для здоровья человека и животных. Среди этих питательных веществ железо выделяется как один из важнейших микроэлементов. Увеличение содержания железа в продуктах растительного происхождения по-прежнему является целью многих ученых по всему миру. Однако результаты не всегда достигают ожидаемых показателей [1]. В настоящее время от железодефицитной анемии в мире страдают около 2 млрд. человек, преимущественно в развивающихся странах. Особенно уязвимы дети и женщины [2]. Потребление железа для детей, подростков и взрослых составляет 7-11, 13 и 18 мг/сут соответственно [3]. По другим данным, согласно МР 2.3.1.2432-08, среднее потребление железа в разных странах 10—22 мг/сут, в Российской Федерации – 17 мг/сут. Установленные уровни потребностей для мужчин 8-10 мг/сут и для женщин 15—20 мг/сут. Верхний допустимый уровень потребления железа не установлен.

Пути решения проблемы дефицита являются: расширение ассортимента применяемых продуктов питания, обогащение готовых пищевых продуктов микроэлементами, использование биологически активных добавок и биофортификация сельскохозяйственных растений. Последний путь представляется наиболее перспективным и экономически выгодным, способным охватить большую часть населения независимо от места проживания и социального статуса [4], [5], [7].

Использование наночастиц металлов для улучшения роста и развития растений в искусственных условиях представляет научный и практический интерес [8]. По сравнению с ионами, входящими в состав солей, наночастицы микроэлементов быстрее проникают через мембрану клетки, эффективны в более низких концентрациях и значительно менее токсичны благодаря электронейтральности, наноразмерам (1–100 нм) и более высокой реакционной способности. Биологическую активность препаратов из наночастиц также объясняют особенностями их физико-химических свойств [9]. Получены положительные результаты влияния наночастиц железа на рост, развитие, урожайность и химический состав огурцов, томатов, салата, бобовых культур [10], [11]. Однако диапазон концентраций, в которых они положительно действуют на растения и безопасны для человека, является довольно узким, зависит от условий выращивания, вида и сорта культуры. Исследователи отмечают множественность механизмов влияния наночастиц на растения и сложность регуляции их поведения в окружающей среде, что свидетельствует о необходимости изучения взаимодействия тестируемых наночастиц с конкретными культурами [12]. Хелаты элементов являются сложными органическими комплексами, близкими по структуре к природным веществам (хлорофилл, витамин B₁₂), поэтому они безвредны и эффективны для растения, хорошо усваиваются при некорневых обработках (до 90%).

Агрономическая биофортификация позволяет за счет обработки тем или иным элементом семян, внесения в почву или фолиарно растений увеличивать содержание этого элемента и его биодоступность в продовольственных культурах. Использование некорневых обработок соединениями железа позволяет уменьшить дефицит элемента, необходимого для сбалансированного пищевого рациона всех групп населения. Интерес к биообогащенной продукции, как компоненту функционального питания у потребителей постоянно возрастает.

Цель работы: Определить возможности биофортификации редиса различных сортов соединениями железа при выращивании в интенсивной светокультуре

Методы и принципы исследования

Схема опыта включала трехкратную обработку (опрыскивание) надземной части растений: водой (контроль), водными суспензиями соединений железа: магнетитом (Fe₃O₄), маггемитом (γ-Fe₂O₃), и хелатом железа (11% Fe ДТПА-диэтилентриаминпентауксусная кислота) в концентрациях 0,01%, 0,05% и 0,1% каждое вещество. Порошки магнетита Fe₃O₄ и маггемита γ-Fe₂O₃ были синтезированы в Институте химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН методом химического осаждения солей в водном растворе, определен их фазовый состав и микроструктура [8]. Объектами исследования послужили растения двух сортов редиса, рекомендованных для условий светокультуры: Петербургский фиолетовый (фиолетовая окраска корнеплода), выведенный в ФБГНУ АФИ [14] и Октава (белая окраска корнеплода). Сорт Петербургский фиолетовый характеризуется скороспелостью, устойчивостью к стеблеванию в светокультуре, высокой урожайностью, салатным типом листа и компактной листовой розеткой. Сорт Октава предназначен для открытого грунта, но считается перспективным для светокультуры, он урожайный, среднего срока созревания, характеризуется высокой устойчивостью к стеблеванию, салатным типом листа [15].

Семена высевали в емкости с торфосмесью на основе верхового торфа фирмы «Агробалт» с добавлением глины и минеральных удобрений и далее выращивали в интенсивной светокультуре при облучении лампами ДНаЗ-400 (газоразрядные зеркализированные натриевые лампы). Облученность растений в опытах составляла 50±10 Вт/м², продолжительность светового периода – 12 часов в сутки. В течение вегетационного периода температуру поддерживали на уровне 23±3°C днем и 20±3°C ночью. Редис поливали 3 раза в неделю 1,0 н раствором Кнопа без добавления микроэлементов. Первое опрыскивание проводили в фазу двух настоящих листьев и последующие два — с интервалом 5 дней. В каждом варианте выращивали по 24 растения, в трехкратной повторности. Биометрические измерения (высота растений, число листьев, размеры корнеплодов, сырая и сухая масса надземной части растений и корнеплодов) проводили при уборке по 5 растениям в каждой повторности. Химический состав ботвы и корнеплодов определяли после уборки атомно-спектрометрическим методом. Статистическая обработка данных осуществлялась с использованием программ Excel 2010 и Origin Lab 7.5. Достоверность различий между вариантами оценивалась при помощи методов параметрической статистики (t-критерий Стьюдента). Различия между вариантами считались достоверными при p≤0,05.

Результаты и обсуждение

Железо играет важную роль в жизни растения, влияет на фотосинтез, дыхание, входит в состав многих ферментов, регулирующих различные процессы, связанные с ростом и развитием: нитратредуктаза, пероксидаза, ферредоксин, нитрогеназа, дегидрогеназа, липоксигеназа, фитоферридин и др. В тканях растения железо находится в виде соединений Fe (II) и Fe (III), преимущественно в составе комплексов с различными органическими соединениями. В составе ферментов железо может быть как в гемовой, так и в негемовой форме [16].

Из табл.1 следует, что оба сорта редиса образовывали почти одинаковую биомассу корнеплодов и надземной массы, но отличались по накоплению железа. В растениях содержание железа в листьях было выше, чем в корнеплодах, что является также ценным, так как у этих сортов листья можно использовать в салатах. У сорта Петербургский фиолетовый железа в листьях было существенно больше, чем у сорта Октава, а в корнеплодах — несколько ниже. Максимальное содержание железа в листьях редиса достигало 322,7 мг/кг, в корнеплодах — 164,0 мг/кг.

Таблица 1 - Описательная статистика биомассы и содержания железа в растениях

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29.1>

Показатель	min-max	среднее
<i>Биомасса 1 растения, г</i>		
Сорт Петербургский фиолетовый		
- корнеплоды	24,3-43,0	31,4 ± 2,0
- листья	10,9-20,8	15,4 ± 0,9
Сорт Октава		
- корнеплоды	23,8-36,2	30,6 ± 1,4
- листья	15,5-25,7	19,3 ± 1,1
<i>Содержание железа, мг/кг</i>		
Сорт Петербургский фиолетовый		
- корнеплоды	68,8-147,0	110,9 ± 26,1
- листья	121,9-322,7	205,5 ± 55,1
Сорт Октава		
- корнеплоды	88,9-160,9	120,9 ± 22,5
- листья	98,9-180,8	147,3 ± 24,1

Отдельные концентрации как органической, так и неорганической формы соединений железа повлияли на достоверное увеличение урожайности корнеплодов редиса. По сравнению с контролем в варианте с маггемитом 0,01% биомасса корнеплодов у сорта Петербургский фиолетовый была выше 11,3% и составила 5,9кг/м², а в вариантах с хелатом железа 0,1%-6,5 кг/м², что выше на 21,7%. У сорта Октава достоверное увеличение биомассы корнеплодов отмечали при обработке магнетитом в концентрациях 0,05% и 0,1% – на 32% и 34% соответственно в вариантах с маггемитом 0,05% – на 2% и хелатом железа – на 40,3%. В остальных вариантах прибавка урожайности корнеплодов была несущественной или ниже контроля.

Все изучаемые концентрации, кроме магнетита 0,01% и хелата Fe 0,1% на сорте Петербургский фиолетовый приводили к повышению содержания железа в листьях: магнетит 0,05-0,1% - на 35-16%, маггемит 0,01%-0,1% – на 9,0-29,9%, хелат железа 0,01%-0,1% – на 49,2-89,4% соответственно (рис. 1). В корнеплодах сорта Петербургский фиолетовый все применяемые препараты и все концентрации приводили к достоверному увеличению содержания железа по сравнению с контролем (обработка водой): магнетит – на 9,9-79,4%, маггемит — на 21,9-95,0%, хелат железа – на 44,2-138,0% (рис. 2). Максимальный эффект по биообогащению корнеплодов редиса сорта Петербургский фиолетовый был получен в варианте с хелатом железа 0,01% –147 мг/кг, а у сорта Октава - маггемитом 0,01% –160,9 мг/кг.

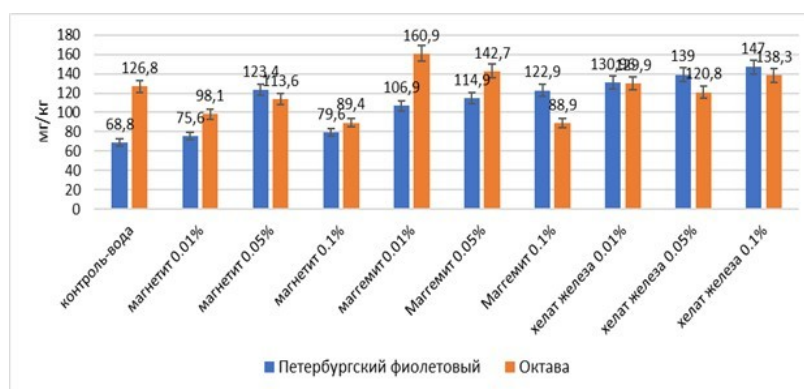


Рисунок 1 - Содержание железа в корнеплодах редиса различных сортов

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29.2>

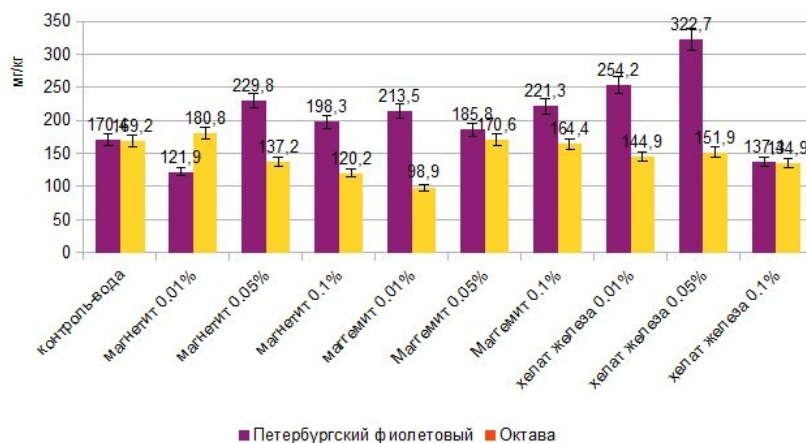


Рисунок 2 - Содержание железа в листьях редиса различных сортов
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29.3>

Обработка надземной части редиса сорта Октава привела к достоверному увеличению содержания железа только в листьях вариантов с магнетитом 0,01% – на 11,6% к контролю и корнеплодах – в вариантах с маггемитом 0,01% и 0,05% – на 26,9% и 12,5% соответственно и хелатом железа 0,1% – на 9,0%.

Между биомассой растений редиса обоих сортов и содержанием в них железа установлена нелинейная зависимость, для описания которой использовали функции: полинома второй степени, экспоненциальной зависимости первого порядка и сигмоидную (Больцмана). Судя по коэффициенту детерминации ($R^2=0,74$, $P<0,0001$), наилучшую аппроксимацию обеспечивала сигмоидная функция (рис.3). График функции показывает, что, биообогащение редиса соединениями железа не приводило к пропорциональному увеличению биомассы (ботва и корнеплод) и максимальное значение содержания железа соответствовало минимальному значению биомассы. С увеличением биомассы до 45-48 г происходило резкое снижение содержания железа в растениях, а затем кривая зависимости выходила на «плато».

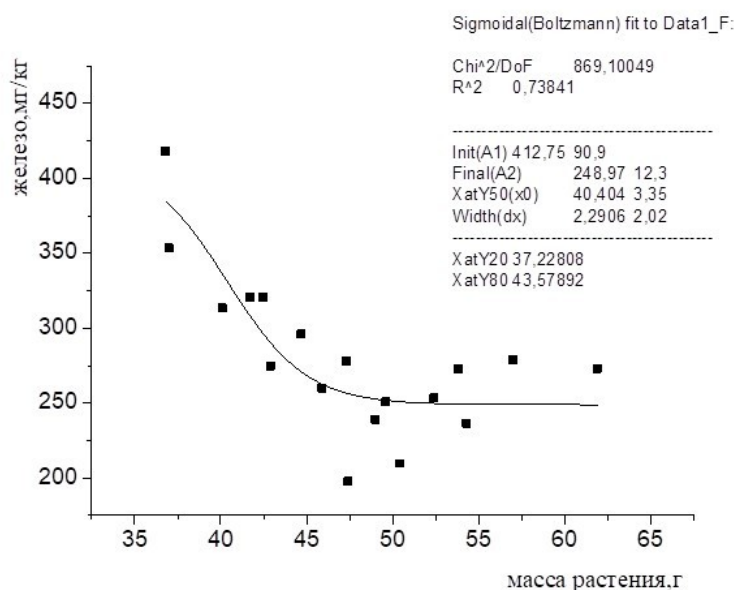


Рисунок 3 - Зависимость между содержанием железа в растениях и биомассой (ботва и корнеплод) редиса
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29.4>

Некорневые обработки неорганическими и органическими соединениями железа повлияли на биометрические показатели растений: высоту надземной части и количество листьев (рис.4).

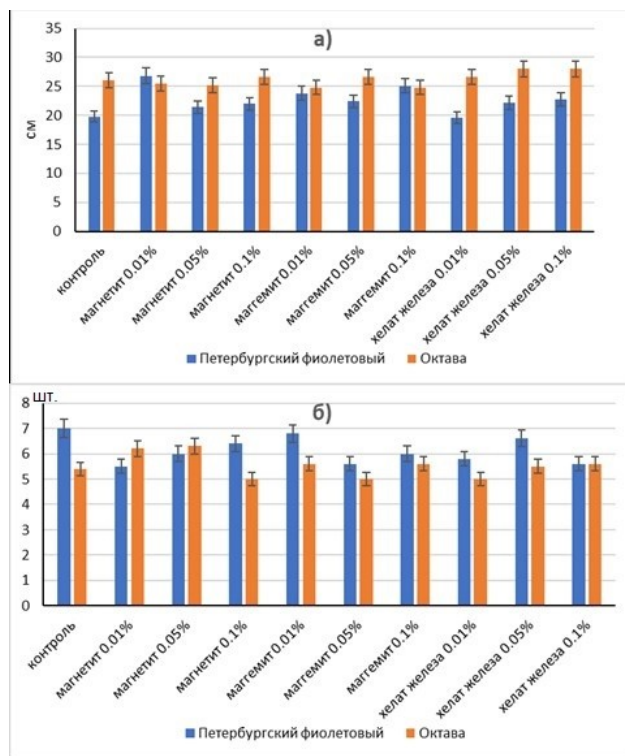


Рисунок 4 - Влияние некорневых обработок соединениями железа биометрические показатели надземной части растений:

а) на высоту растений; б) количество листьев

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.40.29.5>

У сорта Петербургский фиолетовый все концентрации хелата железа, а также магнетит 0,1% и маггемит 0,05% достоверно увеличивали высоту растений, а у сорта Октава – все соединения и концентрации, кроме хелата железа, 0,01% (рис.4.). Количество листьев у Петербургского фиолетового в изучаемых вариантах не отличалось от контрольного, а у Октавы было выше при обработках магнетитом 0,01-0,05%.

Заключение

Биофортификация растений редиса методом фолитарного опрыскивания растворами наночастиц магнетита и маггемита, хелата железа была в разной степени эффективной на сортах Петербургский фиолетовый и Октава. Наибольший эффект по биообогащению корнеплодов редиса сорта Петербургский фиолетовый был получен в вариантах с магнетитом 0,05%, маггемитом 0,05% и хелатом железа 0,01% - на 79%, 95% и 138% к контролю (вода) соответственно. То есть все соединения оказали достоверное положительное влияние, но органическая форма железа усваивалась несколько лучше неорганической. У сорта Октава наибольшее накопление железа корнеплодами отмечали при обработке маггемитом 0,01% и 0,05%. Также самая высокая из изучаемых в опыте концентраций хелата железа 0,1% на обоих сортах увеличивала биомассу корнеплодов на 21,7-40,3% к контролю. Максимальное содержание железа в листьях редиса достигало 322,7 мг/кг, в корнеплодах — 164,0 мг/кг и поскольку листья изучаемых сортов не имели опушения и пригодны в пищу, получен двойной эффект от биообогащения. Содержание железа в листьях было выше, чем в корнеплодах у обоих сортов. Зависимость между содержанием железа в растениях и биомассой (ботва и корнеплод) описывается сигмоидной функцией, $R^2=0,74$.

Полученная в опыте биофортифицированная продукция редиса может служить дополнительным источником железа в пищевом рационе. Примерно 100 г таких корнеплодов в сутки достаточно для удовлетворения потребности в железе. Для обоснования практических рекомендаций по биообогащению редиса необходимы дальнейшие исследования с рекомендуемыми для условий светокультуры сортами.

Таким образом, увеличение содержания железа в овощных культурах в определенном диапазоне нетоксичных концентраций может способствовать решению проблемы дефицита железа. Кроме того, получение данного микроэлемента через продукты питания может увеличить его биодоступность, а использование условий светокультуры — круглогодично получать биообогащенную свежую продукцию.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Vasconcelos M.W. Iron Biofortification in the 21st Century: Setting Realistic Targets, Overcoming Obstacles and New Strategies for Healthy Nutrition / M.W. Vasconcelos, W. Gruissem, K. Navreet // *Curr Opin Biotechnol.* — 2017. — Vol.44 — P. 8-15.
2. National institutes of health: iron: dietary supplement fast sheet. — 2016. — URL: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iron-HealthProfessional/> (accessed: 10.11.2023)
3. Savarino Y. Macronutrient Balance and Micronutrient Amounts through Growth and Development / Y. Savarino, A. Corsello, Y. Corsello // *Ital. J. Pediatr.* — 2021. — №47. — P. 109.
4. Nantel G. Forging Effective Strategies to Combat Iron Deficiency Prevention and Control of Iron Deficiency: Policy and Strategy / G. Nantel, K. Tontisirin // *J. Nutr.* — 2002. — Vol. 132. — P. 839-844.
5. Hurrell R. Fortified Food Products Often Have Low Public Acceptance Because of Color and Flavor Changes Resulting from Added Micronutrients / R. Hurrell // *Nutr. Rev.* — 2002. — Vol. 60. — P. 7-15.
6. Lowe N.M. The Global Challenge of Hidden Hunger: Perspectives from the Field / N.M. Lowe // *Proc. Nutr. Soc.* — 2021. — Vol.80 (3). — P. 283-289.
7. Ma G. Iron and Zinc Deficiencies in China: What Is a Feasible and Cost-effective Strategy? / G. Ma, F. Zhai, F. Kok [et al.] // *Public Health Nutrition.* — 2008. — Vol.11 (6). — P. 632-638.
8. Панова Г.Г. О влиянии наночастиц оксида железа на растения в вегетативный период развития / Г.Г. Панова, О.А. Шилова, А.М. Николаев [и др.] // *Агрофизика.* — 2019. — № 3. — С. 40-50.
9. Арсентьева И.П. Ультрадисперсные порошки металлов / И.П. Арсентьева, Б.К. Ушаков, А.А. Арсеньев [и др.] // *Национальная металлургия.* — 2002. — №4. — с.66-71.
10. Shilova O.A. Influence of Iron Oxide Nanoparticles on Vegetable Crops / O.A. Shilova, A.S. Nikolaev, A.S. Kovalenko [et al.] // *Biogenic – abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems: VII International Symposium, Saint Petersburg, 26-29 September 2022.* — Saint Petersburg: "Skifia-Print" LLC, 2022. — P. 20-21.
11. Boutchuen A. Increased Plant Growth with Hematite Nanoparticle Fertilizer Drop and Determining Nanoparticle Uptake in Plants Using Multimodal Approach / A. Boutchuen, D. Zimmeermon, N. Aich [et al.] // *J. of nanomaterials.* — 2019. — №6890572. — DOI: 10.1155/2019/6890572.
12. Kovalenko A.S. Synthesis of Iron Oxide Magnetic Nanoparticles and Their Effect on Growth, Productivity, and Quality of Tomato / A.S. Kovalenko, A.M. Nikolaev, T.V. Khamova [et al.] // *Glass Physics and Chemistry.* — 2021. — Vol.47. — No.Suppl.1. — P.67-74.
13. Tripathi D.K. An Overview on Manufactured Nanoparticles in Plants: Uptake, Translocation, Accumulation and Phytotoxicity / D.K. Tripathi, S.S. Gaur, S. Singh [et al.] // *Plant Physiology. Biocchem.* — 2017. — Vol. 110. — N. 2. — P.1-12. — DOI: 10.1007/s00709-018-1281-6.
14. Патент на селекционное достижение 11518 РФ, редис *Raphanus sativus* var. *sativus* Перербургский фиолетовый / А.А. Кочетов, Н.Г. Синявина; заявитель и патентообладатель: ФБГНУ Агрофизический НИИ. N 8058521; заявл. 28.11.2019; выдан 25.03.2021.
15. Sinyavina N.G. Breeding Approaches for Controlled Conditions of Artificial Light Culture for Small Radish and Radish (*Raphanus sativus* L.) / N.G. Sinyavina, A.A. Kochetov, N.V. Kocherina [et al.] // *Horticulturae.* — 2023. — Vol. 9. — № 6. — P. 678.
16. Битюцкий Н.П. Минеральное питание растений / Н.П. Битюцкий. — Спб.:Изд-во СПбГУ, 2020. — 540 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vasconcelos M.W. Iron Biofortification in the 21st Century: Setting Realistic Targets, Overcoming Obstacles and New Strategies for Healthy Nutrition / M.W. Vasconcelos, W. Gruissem, K. Navreet // *Curr Opin Biotechnol.* — 2017. — Vol.44 — P. 8-15.
2. National institutes of health: iron: dietary supplement fast sheet. — 2016. — URL: <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Iron-HealthProfessional/> (accessed: 10.11.2023)
3. Savarino Y. Macronutrient Balance and Micronutrient Amounts through Growth and Development / Y. Savarino, A. Corsello, Y. Corsello // *Ital. J. Pediatr.* — 2021. — №47. — P. 109.
4. Nantel G. Forging Effective Strategies to Combat Iron Deficiency Prevention and Control of Iron Deficiency: Policy and Strategy / G. Nantel, K. Tontisirin // *J. Nutr.* — 2002. — Vol. 132. — P. 839-844.
5. Hurrell R. Fortified Food Products Often Have Low Public Acceptance Because of Color and Flavor Changes Resulting from Added Micronutrients / R. Hurrell // *Nutr. Rev.* — 2002. — Vol. 60. — P. 7-15.
6. Lowe N.M. The Global Challenge of Hidden Hunger: Perspectives from the Field / N.M. Lowe // *Proc. Nutr. Soc.* — 2021. — Vol.80 (3). — P. 283-289.
7. Ma G. Iron and Zinc Deficiencies in China: What Is a Feasible and Cost-effective Strategy? / G. Ma, F. Zhai, F. Kok [et al.] // *Public Health Nutrition.* — 2008. — Vol.11 (6). — P. 632-638.
8. Panova G.G. O vlijanii nanochastich oksida zheleza na rastenija v vegetativnyj period razvitiya [On the Effects of Iron Oxide Nanoparticles on Plants in the Vegetative Period of Development] / G.G. Panova, O.A. Shilova, A.M. Nikolaev [et al.] // *Agrofizika [Agrophysics].* — 2019. — № 3. — P. 40-50. [in Russian]
9. Arsent'eva I.P. Ul'tradispersnye poroshki metallov [Ultra-dispersed Metal Powders] / I.P. Arsentieva, B.K. Ushakov, A.A. Arseniev [et al.] // *Nacional'naja metallurgija [National Metallurgy].* — 2002. — №4. — P.66-71. [in Russian]

10. Shilova O.A. Influence of Iron Oxide Nanoparticles on Vegetable Crops / O.A. Shilova, A.S. Nikolaev, A.S. Kovalenko [et al.] // *Biogenic – abiogenic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems: VII International Symposium, Saint Petersburg, 26-29 September 2022.* — Saint Petersburg: "Skifia-Print" LLC, 2022. — P. 20-21.
11. Boutchuen A. Increased Plant Growth with Hematite Nanoparticle Fertilizer Drop and Determining Naniparticle Uptake in Plants Using Multimodal Approach / A. Boutchuen, D. Zimmeermon, N. Aich [et al.] // *J. of nanomaterials.* — 2019. — №6890572. — DOI: 10.1155/2019/6890572.
12. Kovalenko A.S. Synthesis of Iron Oxide Magnetic Nanoparticles and Their Effect on Growth, Productivity, and Quality of Tomato / A.S. Kovalenko, A.M. Nikolaev, T.V. Khamova [et al.] // *Glass Physics and Chemistry.* — 2021. — Vol.47. — No.Suppl.1. — P.67-74.
13. Tripathi D.K. An Overview on Manufactured Nanoparticles in Plants: Uptake, Translocation, Accumulation and Phytotoxicity / D.K. Tripathi, S.S. Gaur, S. Singh [et al.] // *Plant Physiology. Biocchem.* — 2017. — Vol. 110. — N. 2. — P.1-12. — DOI: 10.1007/s00709-018-1281-6.
14. Patent na selekcionnoe dostizhenie 11518 RF, redis *Raphanus sativus* var. *sativus* Peterburgskij fioletovyj [Patent for breeding achievement 11518 RF, radish *Raphanus sativus* var. *sativus* Petersburg purple] / A.A. Kochetov, N.G. Sinyavina; applicant and patentee: FBSSI Agrophysical Research Institute. N 8058521; applied for. 28.11.2019; issued 25.03.2021. [in Russian]
15. Sinyavina N.G. Breeding Approaches for Controlled Conditions of Artificial Light Culture for Small Radish and Radish (*Raphanus sativus* L.) / N.G. Sinyavina, A.A. Kochetov, N.V. Kocherina [et al.] // *Horticulturae.* — 2023. — Vol. 9. — № 6. — P. 678.
16. Bitjuckij N.P. Mineral'noe pitanie rastenij [Mineral Nutrition of Plants] / N.P. Bityutsky. — SPb.:SPbSU Publishing House, 2020. — 540 p. [in Russian]