

Научная статья
УДК 631.811.944
<https://doi.org/10.24412/1992-2582-2026-2-68-76>

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЖЕЛЕЗА (III) НА СВОЙСТВА ЖИДКОФАЗНОГО БИОПРЕПАРАТА ПРИ ПРОРАЩИВАНИИ СЕМЯН ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ

Надежда Андреевна Любимова^{1✉}, Галина Юрьевна Рабинович²

¹⁻²Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», Москва, Россия

¹n.nemygina@gmail.com

²2016vniimz-noo@list.ru

Аннотация. В рамках данной работы методом «зеленого» синтеза были получены наночастицы Fe_3O_4 сферической формы со средним диаметром 17 ± 2 нм, которые были добавлены в готовый ростостимулирующий биопрепарат ЖФБ в различных концентрациях с целью улучшить его свойства. Добавление наночастиц в ЖФБ обеспечивало незначимое снижение численности микроорганизмов, использующих органические формы азота, значимое увеличение микрофлоры, способной использовать его минеральные формы и усиление активности ферментов окислительно-восстановительного цикла (каталазы и дегидрогеназы). Лабораторный эксперимент на семенах яровой пшеницы сорта Иргина показал, что модернизированные биопрепараты положительно повлияли на всхожесть семян, которая оказалась больше всхожести в контроле на 2-8,5%. Наблюдалась сильная обратная корреляционная связь между всхожестью семян и концентрацией наночастиц в ЖФБ: чем выше концентрация, тем ниже всхожесть семян ($r = -0,71$), а также между всхожестью и количеством микроорганизмов, утилизирующих минеральные формы азота ($r = -0,77$), и суммарным количеством бактерий, усваивающих органические и минеральные источники азота ($r = -0,78$). Наличие наночастиц в ЖФБ также положительно повлияло на длину корня, которая увеличилась в среднем на 2-4 см по сравнению с контролем. В данном случае наблюдалась сильная корреляционная связь между средней длиной корня и количеством микроорганизмов, использующих органический азот ($r = 0,84$).

Ключевые слова: биосинтез наночастиц, применение наночастиц, всхожесть семян, биометрия проростков, каталаза, микробный препарат

Для цитирования: Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю. Влияние наночастиц оксида железа (III) на свойства жидкофазного биопрепарата при проращивании семян яровой пшеницы // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2026. № 2(85). С. 68-76. <https://doi.org/10.24412/1992-2582-2026-2-68-76>.

Original article

EFFECT OF IRON (III) OXIDE NANOPARTICLES ON THE PROPERTIES OF A LIQUID-PHASE BIOPRODUCT DURING GERMINATION OF SPRING WHEAT SEEDS

Nadezhda A. Lyubimova^{1✉}, Galina Yu. Rabinovich²

¹⁻²Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

¹n.nemygina@gmail.com

²2016vniimz-noo@list.ru

Abstract. In this study, spherical Fe_3O_4 nanoparticles with an average diameter of 17 ± 2 nm were produced using a green synthesis method. These nanoparticles were added to the ready-made growth-promoting biopreparation LPB at various concentrations to improve its properties. The addition of nanoparticles to LPB resulted in a slight decrease in the number of microorganisms utilizing organic forms of nitrogen, a significant increase in microflora capable of utilizing its mineral forms, and an increase in the activity of redox cycle enzymes (catalase and dehydrogenase). A laboratory experiment on the seeds of the Irgina spring wheat variety showed that the modernized biopreparations had a positive effect on seed germination, which was 2-8,5% higher than the control. A strong inverse correlation was observed between seed germination and the concentration of nanoparticles in the LPB: the higher the concentration, the lower the seed germination ($r = -0,71$). A strong inverse correlation was also observed between germination and the number of microorganisms utilizing mineral forms of nitrogen ($r = -0,77$) and the total number of bacteria assimilating organic and mineral nitrogen sources ($r = -0,78$). The presence of nanoparticles in the LPB also positively affected root length, which increased by an average of 2-4 cm compared to the control. In this case, a strong correlation was observed between average root length and the number of microorganisms utilizing organic nitrogen ($r = 0,84$).

Keywords: nanoparticle biosynthesis, nanoparticle application, seed germination, seedling biometry, catalase, microbial preparation

For citation: Lyubimova N.A., Rabinovich G.Yu. Effect of iron (III) oxide nanoparticles on the properties of a liquid-phase bioproduct during germination of spring wheat seeds. Bulletin of Michurinsk State Agrarian University, 2026, no. 2(85), pp. 68-76. <https://doi.org/10.24412/1992-2582-2026-2-68-76>.

Введение. Быстрорастущее население Земли может стать причиной продуктового дефицита, которое связано с нехваткой земель, пригодных для сельскохозяйственного применения. Растущий спрос на сельскохозяйственную

продукцию привел к интенсивному использованию химических удобрений с целью повышения урожайности. Однако длительное использование таких удобрений зачастую становится причиной ряда экологических проблем, таких

как загрязнение грунтовых вод, эвтрофикация водоемов, деградация почвы и загрязнение воздуха [1]. Органические удобрения, получаемые из навоза сельскохозяйственных животных и помета птиц, считаются перспективной альтернативой минеральным добавкам. Получаемые на основе навоза биоудобрения содержат в своем составе различные микроорганизмы, такие как бактерии, водоросли и грибы, которые при взаимодействии с растениями в ризосфере влияют на их рост, стимулируя выработку фитогормонов и косвенно через фиксацию азота и контроль фитопатогенов, находящихся в почве [2]. При этом другими авторами было показано, что в зависимости от вида растений органические удобрения могут быть эффективными как при их сочетании с минеральными [3], так и без них [4].

Различные биопрепараты также применяются в растениеводстве. Как правило, они состоят из бактерий и грибов, растительных экстрактов, а также соединений животного происхождения. Биопрепараты используются для стимуляции роста растений, улучшения усвоения питательных веществ и ингибирования роста патогенной почвенной микрофлоры [5]. Широкий спектр действия биопрепаратов позволяет использовать их на различных растениях и типах почв, позволяя сократить применение химических средств защиты растений и минеральных удобрений. При этом очень часто разрабатываются новые препараты с использованием локальных штаммов микроорганизмов, которые будут более эффективными против местных фитопатогенов [6]. Тем не менее биологические препараты также имеют и ряд недостатков, главный из которых – это более низкая, чем у химических препаратов, эффективность. Кроме того, эффект от применения биопрепаратов очень часто бывает непредсказуемым из-за того, что на поведение вносимых на растения микроорганизмов влияют различные биотические и абиотические факторы (температура, влажность, состояние аборигенной микрофлоры, фаза развития растения и др.). Также биопрепараты могут быть ограничены по действию, например, они могут быть направлены только на улучшение фотосинтеза или только на повышение всхожести семян. В дополнение к этому срок хранения биопрепаратов, как правило, короткий, а требования к хранению и процедурам применения повышены [7].

Помимо азота, фосфора и калия, для питания растений в малых количествах необходимы микроэлементы, такие как железо, бор, хлор, марганец, цинк и медь, дефицит которых может негативно сказаться на росте и развитии растений [1]. Так, железо очень важно для построения растительных клеток и метаболических процессов, таких как синтез ДНК, дыхание и фотосинтез [8]. Несмотря на то, что железо весьма распространено в геосфере, усвоение его растениями может быть ограничено реакцией почвы, концентрацией в ней ионов кальция и карбонат-ионов, содержанием углекислого газа и прочих ионов металлов, а также их соединений, низкой температурой почвы, наличием в ней органического вещества и микробного пула [9]. Ввиду этих факторов дефицит железа является глобальной проблемой по всему миру. Например, по некоторым данным около 30% почв, подвергающихся известкованию, характеризуются низкой доступностью железа, связанной с наличием его окисленных форм [10]. Дефицит железа можно устранить, используя различные виды удобрений, такие как неорганические, хелатные и органические. Однако у существующих железосодержащих удобрений имеются некоторые недостатки. Например, высокая стоимость, а также небольшой срок хранения хелатных удобрений ограничивают их использование. Неорганические удобрения высокотоксичны и действуют очень медленно, а из органических удобрений можно получить небольшое

количество железа, точный состав которого будет неизвестен. Ввиду недостатков традиционных удобрений ученые все чаще обращают внимание на наночастицы железа, особенно его оксиды, физические и химические свойства которых делают их перспективными для использования в растениеводстве [9]. Так, ранее было показано, что наночастицы железа и его оксиды могут быть успешно использованы при выращивании риса [11], кукурузы [12], огурцов [13]. Во всех этих случаях применение наночастиц положительно повлияло на рост и развитие растений, что отразилось в увеличении средней длины и средней массы побегов и корней, а также в повышении устойчивости растений к различным стрессовым факторам [11 - 13].

Помимо того, что наночастицы можно использовать как самостоятельные удобрения, также возможно их применение для усиления активности других удобрений [1]. Однако в литературе данные об эффективности при совместном использовании биопрепаратов и наночастиц железа или его оксида в растениеводстве ограничены. Имеются сведения о том, что инокуляция семян фасоли обыкновенной в растворе, содержащем наночастицы Fe_3O_4 и бактерии *Rhizobium leguminosarum* (штамм CF1), максимально увеличила рост вегетирующей массы растений, а также усилила симбиотическую фиксацию азота и повысила общее содержание азота в побегах и корнях по сравнению с контролем [14]. Кроме того, ранее нами было показано, что жидкофазный биопрепарат (ЖФБ), содержащий в своем составе наночастицы Fe_3O_4 , был успешно использован при возделывании картофеля сорта Скарб и оказал положительное влияние на его урожайность, а также на численность почвенных микроорганизмов [15, 16].

Цель работы – исследовать влияние различных концентраций наночастиц Fe_3O_4 на микробиологические и биохимические свойства ЖФБ и изучить влияние модернизированного биопрепарата на развитие яровой пшеницы в лабораторных условиях на раннем этапе онтогенеза.

ЖФБ является разработкой коллектива Всероссийского НИИ мелиорированных земель. ЖФБ получен путем ферментации торфонавозной смеси (низинный торф и навоз КРС) с последующей экстракцией солевым раствором. ЖФБ содержит большое количество (до 10^{12} КОЕ/мл) азоттрансформирующих микроорганизмов, а также комплекс макро- и микроэлементов [17].

Материалы и методы исследований. Объекты исследований – семена и проростки яровой пшеницы сорта Иргина, обработанные ЖФБ, содержащим различные дозы наночастиц Fe_3O_4 , состав которых был подтвержден методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) и описан в работе [16].

Согласно данным Госреестра семян, пшеница Иргина относится к мягким раннеспелым сортам пшеницы. Допущена к выращиванию в Северном, Северо-Западном, Волго-Вятском и Западно-Сибирском регионах.

Наночастицы Fe_3O_4 были синтезированы методом «зеленого» синтеза с использованием водного экстракта зеленого чая (торговая марка «Принцесса Ява. Традиционный») 0,1 М раствора сульфата железа (II). Подробная методика синтеза описана в работах [15, 16]. Полученные наночастицы были исследованы методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) с целью определения их размера (фотографии были получены в лаборатории компании «Системы для Микроскопии и Анализа» (г. Москва)). Подсчет наночастиц осуществлялся вручную с помощью графического редактора GIMP и программы Scion Image.

Наночастицы были введены в готовый ЖФБ в дозах 25, 50, 100, 250 и 500 мг/л (варианты ЖФБ-Fe-1, ЖФБ-Fe-2, ЖФБ-Fe-3, ЖФБ-Fe-4 и ЖФБ-Fe-5 соответственно).

В исходном и модернизированном наночастицами оксида железа ЖФБ общепринятым микробиологическим методом последовательных разведений на твердых питательных средах было определено количество мезофильных микроорганизмов: использующих минеральные формы азота – на крахмало-аммиачном агаре, а использующих органические формы азота – на мясепептонном агаре. Кроме того, во всех вариантах ЖФБ-Fe была определена активность оксидоредуктаз, а именно каталазы и дегидрогеназы газометрическим и фотоколориметрическим методами соответственно. Также проводилось измерение pH всех полученных биопрепаратов с использованием pH-метра (Ohaus AQUASEARCHER TM AB33PH). Все определения были выполнены в трехкратной аналитической повторности.

Проращивание семян осуществляли согласно ГОСТ 12038-84 в течение семи суток в стеклянных чашках Петри между слоями фильтровальной бумаги, предварительно смоченными дистиллированной водой, при температуре 22 ± 1 °C в темноте. Предварительно семена замачивали в растворе исследуемых биопрепаратов на 2 часа. Концентрация растворов биопрепаратов ЖФБ и ЖФБ-Fe-(1-5) составила 0,1; 0,4; 0,8 и 1,4%. В каждом варианте было предусмотрено 4 повторности (по 25 семян в каждой).

Эффективность модернизированных препаратов оценивали по энергии прорастания на 3-е сутки и по всхожести семян, а также по средней длине корня и роста на 7-е сутки. В качестве контроля использовалась дистиллированная вода. Кроме того, было исследовано влияние биопрепаратов линейки ЖФБ-Fe на количество каталазы в проростках (по методу А.Н. Баха и А.И. Опарина).

Метод определения количества каталазы основан том, что она разлагает перексид водорода. Избыток перексида водорода титруют перманганатом калия в кислой среде. В опыте определяют количество оставшегося неразрушенного перексида водорода, в контроле – общее количество взятого перексида водорода (каталаза в контрольной пробе инактивирована кипячением). Вычитая результаты опыта из результатов контроля, рассчитывают количество разрушенного в определенный промежуток времени перексида водорода, что позволяет судить о количестве каталазы.

Кроме того, для более полного понимания влияния биопрепаратов на растительный организм были рассчитаны коэффициенты корреляции (r) между микробиологическими и биохимическими параметрами полученных биопрепаратов и средними значениями энергии прорастания, всхожести, биометрических и биохимических показателей проростков.

Статистическую обработку результатов осуществляли с использованием программы Microsoft Office Excel 2007. Статистическую достоверность различий в значениях показателей оценивали по значениям критерия Стьюдента при 5% уровне значимости. Данные в таблицах представлены в виде среднего значения $\pm$ доверительный интервал.

Результаты исследований и их обсуждение. На рисунке 1 представлены ПЭМ микрофотографии полученных наночастиц (рисунок 1 а и б), а также гистограмма распределения наночастиц по размерам (рисунок 1 в). Как видно из изображений, в процессе синтеза сформировались наночастицы сферической формы.

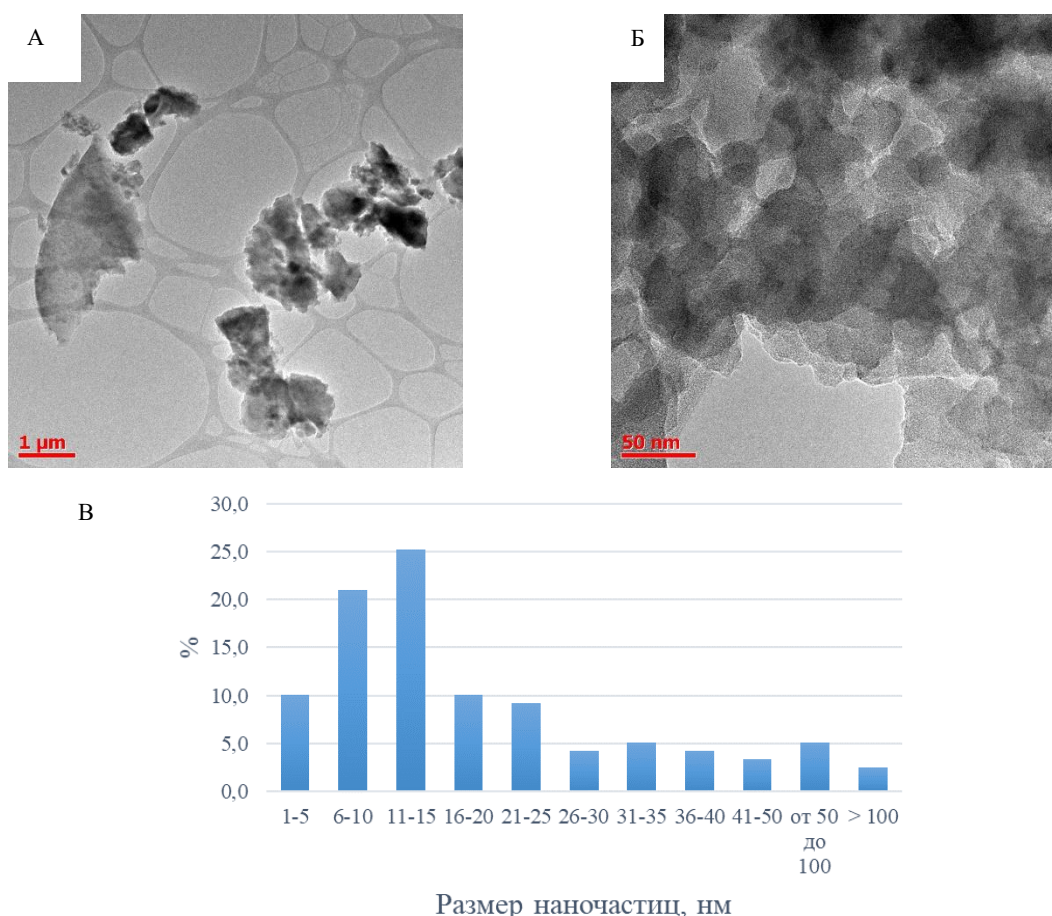


Рисунок 1. ПЭМ микрофотографии (А, Б) и гистограмма распределения наночастиц по размеру (В)
Figure 1. TEM micrographs (A, B) and histogram of nanoparticle size distribution (C)

Размер наночастиц (рисунок 1В) в основном варьировался от 3 до 25 нм, со средним диаметром 17 ± 2 нм. Однако также встречаются как более крупные частицы размером 30-100 нм и крупные агрегаты (более 100 нм). Вероятно, что последние – это скопления более мелких частиц, которые образовались в процессе синтеза.

В целом результаты, полученные в этом исследовании, согласуются с опубликованными ранее данными других авторов. Так, в работе [18] с использованием экстракта зеленого чая и раствора $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в объемном соотношении 1:2, были получены наночастицы со структурой ядро-оболочка, в которых ядро состоит из нуль-валентного железа, а оболочка – из его оксида. При этом средний размер частиц составлял 50 - 80 нм, а также встречались агрегаты более 100 нм [18]. С. Xiao et al. [19] при смешивании 0,1 М раствора $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и экстракта зеленого чая в объемном соотношении 2:1 при комнатной температуре получили наночастицы Fe (0) сферической и эллипсоидной формы размером 75-100 нм со средним диаметром $87,0 \pm 0,2$ нм [19].

Результаты микробиологического и биохимических анализов (таблица 1) показали, что добавление порошка, содержащего наночастицы оксида железа, в различных дозах влияет на pH полученных биопрепаратов, которое смещается в щелочную сторону. Вероятно, это связано с тем, что щелочь используется в процессе синтеза наночастиц и частично остается в порошке после сушки. Однако, при увеличении дозы порошка до 500 мг/л pH модернизированного биопрепарата выравнивается с исходным за счет окислительных свойств наночастиц Fe_3O_4 .

При добавлении в исходный ЖФБ нанопорошка в дозе от 25 до 250 мг/л количество микроорганизмов, использующих органические формы азота, снизилось в 1,2-2,0 раза по сравнению с исходным ЖФБ. Однако данное снижение несущественно, так как в микробиологических процессах существенным изменением можно считать изменение порядка, а этого не произошло ни в одном из вариантов. Тогда как при добавлении порошка в дозе 500 мг/л, наоборот, количество микроорганизмов, трансформирующих органические формы азота, увеличилось в 1,3 раза. При этом порошок, содержащий наночастицы Fe_3O_4 , положительно повлиял на микроорганизмы ЖФБ, использующие минеральные формы азота, количество которых увеличилось в 2,3-5,7 раз по сравнению с исходным биопрепаратом (прирост микроорганизмов этой группы оказался значимым – на степень). Вероятно, изменение количества микроорганизмов, использующих органические формы азота, также связано с изменением pH биопрепаратов, которое стабилизируется до исходного состояния при высоких дозах наночастиц.

Кроме действия на микрофлору, наночастицы Fe_3O_4 также повлияли на активность ферментов окислительно-восстановительного цикла как каталазы, так и дегидрогеназы, величины которых в среднем относительно контролей увеличились в 2,9-3,4 раза и в 3,7-6,2 раза соответственно. Полагаем, что дополнительное поступление в биопрепарат наночастиц Fe_3O_4 ускоряет обменные процессы – катаболизм и анаболизм, что, безусловно, обеспечивается деятельностью микрофлоры и ее ферментативной активностью в благоприятных для них условиях среды.

Таблица 1
Table 1Микробиологические и биохимические свойства исследуемых биопрепаратов
Microbiological and biochemical properties of the studied biopreparations

Вариант	Доза порошка, мг/л	pH	Численность микроорганизмов, использующих $n \times 10^{11}$ КОЕ/мл /		Активность каталазы, $\text{см}^3 \text{O}_2/\text{г}/\text{мин}/$	Активность дегидрогеназы, мг ТФФ/г/24 ч/
			органические формы азота	минеральные формы азота		
ЖФБ	0	7,9	4,3	9,3	$0,7 \pm 0,05$	$1,7 \pm 0,1$
ЖФБ-Fe-1	25	8,4	3,2	35,4	$2,4 \pm 0,1$	$8,3 \pm 1,0$
ЖФБ-Fe-2	50	8,3	2,6	53,5	$2,4 \pm 0,1$	$7,1 \pm 0,9$
ЖФБ-Fe-3	100	8,3	3,5	21,1	$2,5 \pm 0,1$	$6,6 \pm 0,2$
ЖФБ-Fe-4	250	8,2	2,1	47,9	$2,7 \pm 0,2$	$10,7 \pm 0,5$
ЖФБ-Fe-5	500	7,9	5,4	51,7	$2,3 \pm 0,2$	$6,4 \pm 0,3$

При инокуляции семян пшеницы раствором биопрепарата ЖФБ-Fe различной концентрации энергия прорастания семян варьировалась от 86 до 98% и была больше, чем в контрольном варианте ($85,1 \pm 1,6$) на 1-13% и в среднем практически такой же, как в варианте с применением исходного ЖФБ (рисунок 2). Расчет коэффициентов корреляции показал, что наблюдается обратная средняя корреляционная связь между энергией прорастания и концентрацией наночастиц в ЖФБ ($r = -0,59$).

Всхожесть семян пшеницы при обработке биопрепаратом ЖФБ-Fe с различной дозой наночастиц Fe_3O_4 вари-

ровалась от 93 до 99,5%, что было на 2-8,5% больше всхожести семян в контрольном варианте и на 1-3% больше всхожести при использовании исходного ЖФБ (рисунок 2). При этом наблюдалась сильная обратная корреляционная связь между всхожестью семян и концентрацией наночастиц в ЖФБ: чем выше концентрация, тем ниже всхожесть семян ($r = -0,71$), а также между всхожестью и количеством микроорганизмов, трансформирующих минеральные формы азота ($r = -0,77$), и суммарным количеством азототрансформирующих бактерий ($r = -0,78$). Кроме того, наблюдали среднюю обратную корреляцию между всхожестью и активностью дегидрогеназы ЖФБ ($r = -0,51$).

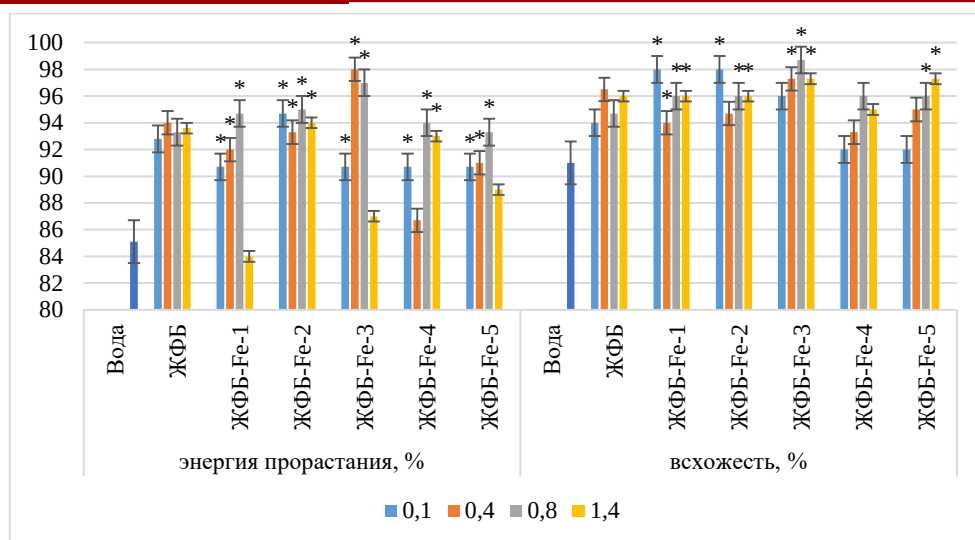


Рисунок 2. Энергия прорастания и всхожесть семян пшеницы после инокуляции в различных биопрепаратах
Figure 2. Germination energy and germination capacity of wheat seeds after inoculation in various biopreparations

*Статистически достоверные результаты ($p < 0.05$) / *Statistically significant results ($p < 0.05$).

Средняя длина корня (таблица 2) во всех вариантах использования биопрепаратов ЖФБ-Fe варьировалась в диапазоне 14-16 см, что на 2-4 см больше, чем в контроле ($12,3 \pm 0,2$) и на 1-3 см больше, чем при использовании ЖФБ. В данном случае наблюдалась сильная корреляционная связь между средней длиной корня и количеством микроорганизмов, использующих органический азот ($r = 0,84$), а также сильная обратная корреляционная связь между длиной корня и активностью каталазы в ЖФБ-Fe ($r = -0,81$).

В отличие от длины корня, биопрепараты ЖФБ-Fe негативно повлияли на среднюю длину ростка (таблица 2),

которая варьировалась в диапазоне от 8 до 11 см во всех вариантах и была ниже значений средней длины ростка в контроле на 1 - 3 см ($11,9 \pm 0,2$ см) и при использовании исходного ЖФБ на 1 - 2 см. При этом была получена средняя корреляционная связь между средней длиной ростка и дозой порошка, содержащего наночастицы Fe_3O_4 , в ЖФБ ($r = 0,67$), а также сильная корреляция между средней длиной побега и количеством микроорганизмов, использующих органические формы азота ($r = 0,75$).

Таблица 2
Table 2

Биометрические данные проростков пшеницы
Biometric data of wheat seedlings

Вариант	Концентрация препарата, %			
	0,1	0,4	0,8	1,4
Средняя длина корня, см				
Вода	$12,3 \pm 0,2$			
ЖФБ	$14,3 \pm 0,6$	$14,9 \pm 0,4$	$14,1 \pm 0,7$	$14,7 \pm 0,5$
ЖФБ-Fe-1	$16,4 \pm 0,5^*$	$14,6 \pm 0,7^*$	$16,0 \pm 0,7^*$	$15,6 \pm 0,8^*$
ЖФБ-Fe-2	$15,2 \pm 0,7^*$	$14,2 \pm 0,5^*$	$13,9 \pm 0,4^*$	$14,5 \pm 0,5^*$
ЖФБ-Fe-3	$16,4 \pm 1,0^*$	$15,5 \pm 0,5^*$	$13,8 \pm 0,5^*$	$13,5 \pm 0,8^*$
ЖФБ-Fe-4	$15,1 \pm 0,9^*$	$15,7 \pm 0,7^*$	$13,1 \pm 0,7^*$	$12,9 \pm 0,8$
ЖФБ-Fe-5	$16,0 \pm 0,6^*$	$16,0 \pm 0,6^*$	$16,6 \pm 0,6^*$	$16,2 \pm 0,6^*$
Средняя длина ростка, см				
Вода	$11,9 \pm 0,2$			
ЖФБ	$12,5 \pm 1,0$	$10,4 \pm 0,4$	$10,9 \pm 0,5$	$10,6 \pm 0,4$
ЖФБ-Fe-1	$10,6 \pm 0,6$	$10,1 \pm 0,6$	$10,0 \pm 0,5$	$9,7 \pm 0,6$
ЖФБ-Fe-2	$9,2 \pm 0,6$	$7,9 \pm 0,3$	$8,1 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,3$
ЖФБ-Fe-3	$9,9 \pm 0,6$	$10,1 \pm 0,5$	$8,1 \pm 0,4$	$8,5 \pm 0,6$
ЖФБ-Fe-4	$10,0 \pm 0,7$	$10,3 \pm 0,5$	$8,2 \pm 0,4$	$9,7 \pm 0,6$
ЖФБ-Fe-5	$10,9 \pm 0,5$	$11,0 \pm 0,4$	$11,1 \pm 0,5$	$10,6 \pm 0,5$
Средняя длина проростка (корень + росток) пшеницы, см				
Вода	$24,2 \pm 0,2$			
ЖФБ	$26,8 \pm 0,7$	$25,3 \pm 0,5$	$25,0 \pm 0,7$	$25,3 \pm 0,6$
ЖФБ-Fe-1	$27,0 \pm 0,7^*$	$24,7 \pm 0,4$	$26,0 \pm 0,7^*$	$25,3 \pm 0,5$
ЖФБ-Fe-2	$24,4 \pm 0,3$	$22,1 \pm 0,6$	$22,0 \pm 0,8$	$22,5 \pm 0,5$
ЖФБ-Fe-3	$26,3 \pm 1,5^*$	$25,6 \pm 0,6^*$	$21,9 \pm 1,5$	$22,0 \pm 0,8$
ЖФБ-Fe-4	$25,1 \pm 0,7^*$	$26,0 \pm 0,7^*$	$21,3 \pm 0,3$	$22,6 \pm 1,2$
ЖФБ-Fe-5	$26,9 \pm 0,2^*$	$27,0 \pm 0,7^*$	$27,7 \pm 0,3^*$	$26,8 \pm 0,5^*$

*Статистически достоверные результаты ($p < 0,05$).

Важно отметить, что, несмотря на тот факт, что наночастицы Fe_3O_4 отрицательно повлияли на длину ростков пшеницы, общая средняя длина одного проростка (корень + росток) была практически одинаковой во всех вариантах серии ЖФБ-Fe (22 - 26 см) и равна значениям длины одного проростка в контроле и в варианте ЖФБ без наночастиц. При этом значения суммы длины корня и ростка сильно зависели от содержания в ЖФБ-Fe микроорганизмов, трансформирующих органический азот ($r = 0,81$), что вполне

очевидно, так как их деятельность по образованию аммиачного азота напрямую связана с его включением в систему питания растений. Отметим, что соотношение корня и ростка (рисунок 3), напротив, сильно зависело от концентрации наночастиц в ЖФБ: чем выше оказывалась их концентрация, тем меньше было соотношение корень/росток (коэффициент корреляции $r = -0,72$).

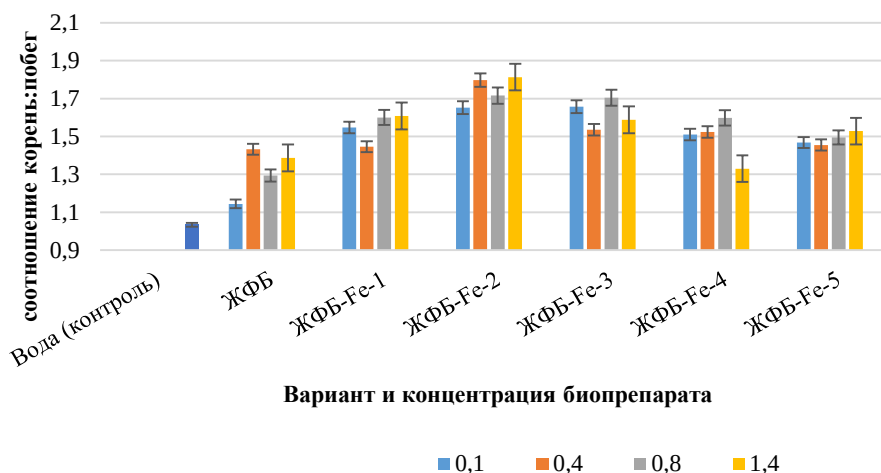


Рисунок 3. Соотношение средней длины корня и ростка (корень/росток)
 Figure 3. Ratio of average root and shoot length (root/sprout)

При использовании ЖФБ-Fe с различной концентрацией наночастиц Fe_3O_4 в проростках значительно увеличилось количество каталазы по сравнению с контролем (рисунок 4). При этом максимальное количество каталазы (среднее значение $124,69 \pm 14,13$ катал) наблюдали в варианте ЖФБ-Fe-5 (рисунок 4). Такое увеличение количества каталазы в проростках, вероятно, связано с возникнове-

нием в растениях окислительного стресса, вызванного наночастицами, что объясняет снижение длины побегов и массы сырых проростков. Расчет коэффициентов корреляции показал, что наблюдается сильная корреляционная взаимосвязь между количеством каталазы и концентрацией наночастиц Fe_3O_4 в ЖФБ ($r = 0,71$), а также между количеством каталазы и количеством микроорганизмов, использующих органический азот ($r = 0,80$).

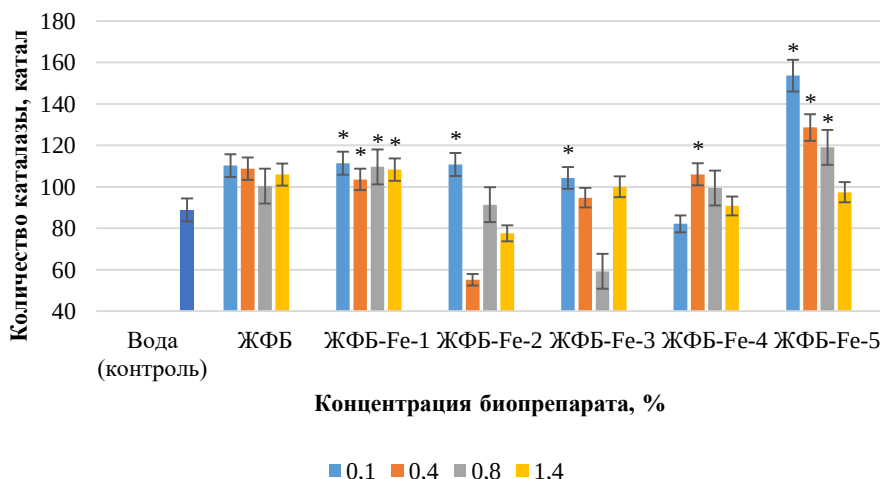


Рисунок 4. Количество каталазы в 1 г проростков, катал
 Figure 4. The amount of catalase in 1 g of sprouts, katal

*Статистически достоверные результаты ($p < 0,05$).

Влияние наночастиц Fe_3O_4 на растения было отмечено в других работах. Например, Y. Feng et al. [20] в своей работе показали, что инокуляция семян пшеницы в растворе наночастиц Fe_3O_4 концентрацией 200 и 500 мг/л уси-

лила рост растений, фотосинтез и дыхание, а также увеличила количество фотосинтетических пигментов в листьях. Кроме того, в данном эксперименте было отмечено повышение активности аскорбатпероксидазы и снижение количества малонового диальдегида [20]. В работе [21]

также было отмечено положительное влияние наночастиц Fe_3O_4 на сухую биомассу второго листа и скорость фотосинтеза в растениях пшеницы, семена которых были предварительно обработаны раствором наночастиц концентрацией 200 мг/л [21]. Кроме того, было показано, что обработка семян пшеницы раствором наночастиц Fe_3O_4 концентрацией 200 и 500 мг/л позволяет минимизировать негативное влияние стрессовых факторов, таких как засоление почвы [22]. F. Yasmeen et al. [23] в своей работе показали, что под воздействием наночастиц железа концентрацией 25 ppm в пшенице увеличилось количество зерен в колосе и масса 1000 зерен. Кроме того, было отмечено увеличение количества белков, которые связаны с деградацией крахмала, гликолизом и циклом трикарбоновых кислот во всех исследуемых сортах пшеницы. Также наблюдалось увеличение активности супероксиддисмутазы и содержание сахара в семенах пшеницы, обработанных наночастицами [23].

В целом можно сказать, что результаты, полученные в данном исследовании, согласуются с результатами других работ в этой области. Добавление наночастиц Fe_3O_4 в готовый биопрепарат ЖФБ способствовало увеличению всхожести семян не только по сравнению с контролем, но и по сравнению с вариантом ЖФБ без наночастиц. Также было отмечено увеличение средней длины главного корня. Однако большие дозы наночастиц, по-видимому, вызвали в проростках окислительный стресс, который выразился в увеличении количества каталазы в проростках, что требует дальнейших более полных исследований.

Закключение. Создание линейки модернизированных биопрепаратов ЖФБ с помощью разных концентраций наночастиц Fe_3O_4 способствует изменению их pH, смещаемому в щелочную сторону. При этом наблюдается незначительное снижение численности микроорганизмов, использующих органические формы азота и значимое увеличение численности микрофлоры, способной использовать его минеральные формы. Наночастицы Fe_3O_4 усиливают активность ферментов окислительно-восстановительного цикла (каталазы и дегидрогеназы) в исходном ЖФБ, способствующих ускорению обменных процессов, обеспечиваемых микрофлорой в благоприятных для них условиях среды.

Результаты лабораторного эксперимента на семенах пшеницы показали, что в растениеводстве возможно совместное использование биопрепарата и наночастиц Fe_3O_4 . Так, при использовании модернизированного ЖФБ-Fe с различной концентрацией наночастиц энергия прорастания и всхожесть семян увеличились на 1 - 13 и 2 - 8,5% соответственно по сравнению с контролем. При этом наблюдалась сильная обратная корреляционная связь между всхожестью семян и концентрацией наночастиц в ЖФБ: чем выше концентрация, тем ниже всхожесть семян ($r = -0,71$), а также между всхожестью и количеством микроорганизмов, трансформирующих минеральные формы азота ($r = -0,77$), и суммарным количеством бактерий, использующих минеральные и органические формы азота ($r = -0,78$).

Наночастицы Fe_3O_4 в составе ЖФБ положительно влияли на среднюю длину корня, которая увеличилась на 16 - 33% по сравнению с контролем и зависела от количества микроорганизмов, использующих органический азот ($r = 0,84$). Однако при использовании биопрепаратов линейки ЖФБ-Fe средняя длина одного ростка уменьшилась на 9 - 27% по сравнению с контролем. Вероятно, это связано с окислительным стрессом, вызванным наличием в биопрепарате наночастиц Fe_3O_4 . Об этом также свидетельствует повышение количества каталазы в проростках, особенно в варианте ЖФБ-Fe-5, концентрация наночастиц в котором была максимальной. При этом наблюдалась сильная корреляционная взаимосвязь между количеством каталазы и концентрацией наночастиц Fe_3O_4 в ЖФБ ($r = 0,71$), а также между количеством каталазы и количеством микроорганизмов, использующих органический азот ($r = 0,80$).

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что наночастицы Fe_3O_4 в количествах, не вызывающих окислительный стресс у растений, могут быть использованы в качестве биогенной микроэлементной добавки к основному биопрепарату без снижения его качества и агрономических свойств. Однако при выборе дозы наночастиц следует учитывать их антимикробную активность, а также видовые и сортовые особенности растений, на которых будет применяться модернизированный биопрепарат.

Список источников

1. Khatri A., Bhateria R. Efficacy of nanofertilizers over chemical fertilizers in boosting agronomic production. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2023, no. 22(2), pp. 767-776.
2. Sharafzadeh S., Ordoorkhani K. Organic and Bio fertilizers as a good substitute for inorganic fertilizers in medicinal plants farming. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, no. 5(12), pp. 1330-1333.
3. Yu Z., Guo B., Sun T., Li R., Zhao Z., Yao L. Effects of organic fertilizer substitution for mineral fertilizer on soil fertility, yield, and quality of muskmelons. *Agronomy*, 2025, no. 15, pp. 639-650.
4. Tariyal Y.S., Ansari S., Prasad P. Organic manure as an alternative to the conventional mineral fertilizers in cultivation of *Digitalis Purpurea* L. *Journal of Mountain Research*, 2022, no. 17(1), pp. 1-7.
5. Pylak M., Oszust K., Frac M. Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, no. 18, pp. 597-616.
6. Pylak M., Oszust K., Panek J., Siegieda D., Cybulska J., Zdunek A., Orzeł A., Frac M. Impact of microbial-based biopreparations on soil quality, plant health, and fruit chemistry in raspberry cultivation. *Food Chemistry*, 2025, no. 462, pp. 140943-140958.
7. Сундет Т.Р. Влияние биопрепаратов на здоровье почвы и сельскохозяйственную продукцию // *Почвоведение и агрохимия*. 2023. № 1. С. 86-104.
8. Gracheva M., Klencsár Z., Kovács Kis V., Béres K.A. [et al.]. Iron nanoparticles for plant nutrition: Synthesis, transformation, and utilization by the roots of *Cucumis sativus*. *Journal of Materials Research*, 2023, no. 38(4), pp. 1035-1047.
9. Shirsat S., Suthindhiran K. Iron oxide nanoparticles as iron micronutrient fertilizer - Opportunities and limitations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2024, no. 187, pp. 565-588.
10. Иванищев В.В. Доступность железа в почве и его влияние на рост и развитие растений // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2019. № 3. С. 127-138.
11. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Z. [et al.]. Physiological impacts of zero valent iron, Fe_3O_4 and Fe_2O_3 nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environmental Pollution*, 2021, no. 269, pp. 116134-116144.

12. Alsamadany H., Anayatullah S., Zia-ur-Rehman M., Usman M. [et al.]. Residual efficiency of iron-nanoparticles and different iron sources on growth, and antioxidants in maize plants under salts stress: life cycle study. *Heliyon*, 2024, no. 10, pp. e28973.
13. Gupta N., Jain S.K., Tomar B.S., Anand A. [et al.]. Impact of foliar application of ZnO and Fe₃O₄ nanoparticles on seed yield and physio-biochemical parameters of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seed under open field and protected environment vis a vis during seed germination. *Plants*, 2022, no. 11, pp. 3211-3230.
14. De Souza-Torres A., Govea-Alcaide E., Gómez-Padilla E., Masunaga S.H. Fe₃O₄ nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean plants grown in soil. *Rhizosphere*, 2021, no. 17, pp. 100275-100290.
15. Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю. Влияние биопрепарата с наночастицами железа на активность почвенных ферментов и урожайность картофеля // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. № 24(3). С. 417-429.
16. Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю. Влияние наночастиц Fe₃O₄ на урожайность картофеля и развитие почвенной микрофлоры // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2024. № S1. С. 164-192.
17. Fomicheva N.V., Rabinovich G.Yu., Kashkova A.A. The effect of the biopreparation of LPB on the yield of vegetable crops. *E3s web of conferences*, 2023, no. 390, pp. 01016.
18. Hao R., Li D., Zhang J., Jiao T. Green synthesis of iron nanoparticles using green tea and its removal of hexavalent chromium. *Nanomaterials*, 2021, no. 11, pp. 650-663.
19. Xiao C., Li H., Zhao Y., Zhang X., Wang X. Green synthesis of iron nanoparticle by tea extract (polyphenols) and its selective removal of cationic dyes. *Journal of Environmental Management*, 2020, no. 275, pp. 111262-111273.
20. Feng Y., Kreslavski V.D., Shmarev A.N., Ivanov A.A. [et al.]. Effects of Iron Oxide Nanoparticles (Fe₃O₄) on Growth, Photosynthesis, Antioxidant Activity and Distribution of Mineral Elements in Wheat (*Triticum aestivum*) Plants. *Plants*, 2022, no. 11, pp. 1894-1909.
21. Kreslavski V., Ivanov A., Shmarev A., Khudyakova A., Kosobryukhov A. Influence of iron nanoparticles (Fe₃O₄ and Fe₂O₃) on the growth, photosynthesis and antioxidant balance of wheat plants (*Triticum aestivum*). *BIO Web of Conferences*, 2022, no. 42, pp. 01023-01030.
22. Kreslavski V.D., Shmarev A.N., Ivanov A.A., Zharmukhamedov S.K. [et al.]. Effects of iron oxide nanoparticles (Fe₃O₄) and salinity on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*). *Functional Plant Biology*, 2023, no. 50 (11), pp. 932-940.
23. Yasmeen F., Raja N.I., Razzaq A., Komatsu S. Proteomic and physiological analyses of wheat seeds exposed to copper and iron nanoparticles. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2017, no. 1865, pp. 28-42.

References

1. Khatri A., Bhateria R. Efficacy of nanofertilizers over chemical fertilizers in boosting agronomic production. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2023, no. 22 (2), pp. 767-776.
2. Sharafzadeh S., Ordoorkhani K. Organic and Bio fertilizers as a good substitute for inorganic fertilizers in medicinal plants farming. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 2011, no. 5(12), pp. 1330-1333.
3. Yu Z., Guo B., Sun T., Li R., Zhao Z., Yao L. Effects of organic fertilizer substitution for mineral fertilizer on soil fertility, yield, and quality of muskmelons. *Agronomy*, 2025, no. 15, pp. 639-650.
4. Tariyal Y.S., Ansari S., Prasad P. Organic manure as an alternative to the conventional mineral fertilizers in cultivation of *Digitalis Purpurea* L. *Journal of Mountain Research*, 2022, no. 17 (1), pp. 1-7.
5. Pylak M., Oszust K., Frac M. Review report on the role of bioproducts, biopreparations, biostimulants and microbial inoculants in organic production of fruit. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2019, no. 18, pp. 597-616.
6. Pylak M., Oszust K., Panek J., Siegieda D., Cybulska J., Zdunek A., Orzeł A., Frac M. Impact of microbial-based biopreparations on soil quality, plant health, and fruit chemistry in raspberry cultivation. *Food Chemistry*, 2025, no. 462, pp. 140943-140958.
7. Sundet T. R. The impact of biopreparations on soil health and agricultural products. *Soil Science and Agrochemistry*, 2023, no. 1, pp. 86-104.
8. Gracheva M., Klencsár Z., Kovács Kis V., Béres K.A. [et al.]. Iron nanoparticles for plant nutrition: Synthesis, transformation, and utilization by the roots of *Cucumis sativus*. *Journal of Materials Research*, 2023, no. 38(4), pp. 1035-1047.
9. Shirsat S., Suthindhiran K. Iron oxide nanoparticles as iron micronutrient fertilizer - Opportunities and limitations. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2024, no. 187, pp. 565-588.
10. Ivanishchev V.V. Availability of iron in the soil and its influence on plant growth and development. *Bulletin of Tula State University. Natural sciences*, 2019, no. 3, pp. 127-138.
11. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Z. [et al.]. Physiological impacts of zero valent iron, Fe₃O₄ and Fe₂O₃ nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environmental Pollution*, 2021, no. 269, pp. 116134-116144.
12. Alsamadany H., Anayatullah S., Zia-ur-Rehman M., Usman M. [et al.]. Residual efficiency of iron-nanoparticles and different iron sources on growth, and antioxidants in maize plants under salts stress: life cycle study. *Heliyon*, 2024, no. 10, pp. e28973.
13. Gupta N., Jain S.K., Tomar B.S., Anand A. [et al.]. Impact of foliar application of ZnO and Fe₃O₄ nanoparticles on seed yield and physio-biochemical parameters of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seed under open field and protected environment vis a vis during seed germination. *Plants*, 2022, no. 11, pp. 3211-3230.
14. De Souza-Torres A., Govea-Alcaide E., Gómez-Padilla E., Masunaga S.H. Fe₃O₄ nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean plants grown in soil. *Rhizosphere*, 2021, no. 17, pp. 100275-100290.
15. Lyubimova N. A., Rabinovich G. Yu. Effect of a biopreparation with iron nanoparticles on the activity of soil enzymes and potato yield. *Agrarian Science of the Euro-North-East*, 2023, no. 24(3), pp. 417-429.
16. Lyubimova N. A., Rabinovich G. Yu. The influence of Fe₃O₄ nanoparticles on potato yield and development of soil microflora. *Bulletin of the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute*, 2024, no. S1, pp. 164-192.

17. Fomicheva N.V., Rabinovich G.Yu., Kashkova A.A. The effect of the biopreparation of LPB on the yield of vegetable crops. E3s web of conferences, 2023, no. 390, pp. 01016.
18. Hao R., Li D., Zhang J., Jiao T. Green synthesis of iron nanoparticles using green tea and its removal of hexavalent chromium. Nanomaterials, 2021, no. 11, pp. 650-663.
19. Xiao C., Li H., Zhao Y., Zhang X., Wang X. Green synthesis of iron nanoparticle by tea extract (polyphenols) and its selective removal of cationic dyes. Journal of Environmental Management, 2020, no. 275, pp. 111262-111273.
20. Feng Y., Kreslavski V.D., Shmarev A.N., Ivanov A.A. [et al.]. Effects of Iron Oxide Nanoparticles (Fe_3O_4) on Growth, Photosynthesis, Antioxidant Activity and Distribution of Mineral Elements in Wheat (*Triticum aestivum*) Plants. Plants, 2022, no. 11, pp. 1894-1909.
21. Kreslavski V., Ivanov A., Shmarev A., Khudyakova A., Kosobryukhov A. Influence of iron nanoparticles (Fe_3O_4 and Fe_2O_3) on the growth, photosynthesis and antioxidant balance of wheat plants (*Triticum aestivum*). BIO Web of Conferences, 2022, no. 42, pp. 01023-01030.
22. Kreslavski V.D., Shmarev A.N., Ivanov A.A., Zharmukhamedov S.K. [et al.]. Effects of iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) and salinity on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*). Functional Plant Biology, 2023, no. 50(11), pp. 932-940.
23. Yasmeeen F., Raja N.I., Razzaq A., Komatsu S. Proteomic and physiological analyses of wheat seeds exposed to copper and iron nanoparticles. Biochimica et Biophysica Acta, 2017, no. 1865, pp. 28-42.

Информация об авторах

Н.А. Любимова – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории биохимических исследований отдела биотехнологий, СПИН-код 7515-3119; <http://orcid.org/0000-0002-5831-5000>;

Г.Ю. Рабинович – доктор биологических наук, заведующий отделом биотехнологий, СПИН-код 1437-3617; <http://orcid.org/0000-0002-5060-6241>.

Information about the authors

N.A. Lyubimova – Candidate of Chemical Sciences, Researcher at the Laboratory of Biochemical Research, Department of Biotechnology, SPIN code 7515-3119; <http://orcid.org/0000-0002-5831-5000>;

G.Yu. Rabinovich – Doctor of Biological Sciences, Head of the Department of Biotechnology, SPIN code 1437-3617; <http://orcid.org/0000-0002-5060-6241>.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the Authors: all the authors have made an equivalent contribution to the preparation of the publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2026; одобрена после рецензирования 31.03.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 26.03.2026; approved after reviewing 31.03.2026; accepted for publication 15.06.2026.

