



Апробация биопрепарата с наночастицами оксида железа на семенах льна различной скороспелости

✉ Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю.

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

✉ e-mail: n.nemygina@gmail.com

В рамках проведенного исследования наночастицы оксида железа Fe_3O_4 , синтезированные с использованием экстракта зеленого чая и раствора железного купороса ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) в концентрации 0,1 моль/л, вводили в различных дозах в готовый жидкофазный биопрепарат (ЖФБ) на стадии его дозревания. Эффективность линейки биопрепаратов ЖФБ-Fe изучена в ходе лабораторного эксперимента на семенах льна-долгунца сортов Надежда и Дипломат различной скороспелости. Полученные результаты показали, что использование наночастиц Fe_3O_4 является эффективным приемом модернизации исходного биопрепарата. Во всех вариантах опыта при апробации биопрепаратов ЖФБ-Fe отмечено повышение энергии прорастания и всхожести семян на 10–20%, а также увеличение средней длины проростков на 4–5 см, их средней массы – на 5–26 мг. Для более полного понимания влияния биопрепаратов на растительный организм произведен расчет коэффициента корреляции (r) между микробиологическими и биохимическими параметрами полученных биопрепаратов и средними по варианту показателями энергии прорастания, всхожести и биометрических данных проростков. Выявлена умеренная обратная взаимосвязь между всхожестью семян льна сорта Надежда и численностью микроорганизмов, использующих органические формы азота ($r = -0,64$). Также выявлена умеренная прямая зависимость между активностью ферментов каталазы и дегидрогеназы и средней длиной проростка ($r = 0,56$ и $0,66$ соответственно). Тогда как при исследовании семян сорта Дипломат средняя масса сырого проростка сильно коррелировала с численностью микроорганизмов, использующих минеральные формы азота ($r = 0,85$), и суммарным количеством микроорганизмов, использующих минеральные и органические формы азота ($r = 0,91$).

Ключевые слова: биопрепарат ЖФБ-Fe, лен, сорт Надежда, сорт Дипломат, энергия прорастания, всхожесть, средняя длина проростка, средняя масса проростка

Testing of a biopreparation with iron oxide nanoparticles on flax seeds of varying prematurity

✉ Lyubimova N.A., Rabinovich G.Yu.

Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute"
Moscow, Russia

✉ e-mail: n.nemygina@gmail.com

In the study, iron oxide Fe_3O_4 nanoparticles synthesized using green tea extract and a solution of ferrous sulfate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) at a concentration of 0.1 mol/l were introduced in various doses into a finished liquid-phase biopreparation (LPB) at the maturation stage. The efficiency of the LPB-Fe line of biopreparations was studied in a laboratory experiment on flax seeds of the Nadezhda and Diplomat varieties of varying prematurity. The obtained results showed that the use of Fe_3O_4 nanoparticles is an effective method for upgrading the original biopreparation. In all experimental variants, when testing the LPB-Fe biopreparations, an increase in germination energy and seed viability by 10–20% was

noted, as well as an increase in the average length of seedlings by 4–5 cm and their average weight by 5–26 mg. For a more complete understanding of the effect of biopreparations on the plant organism, the correlation coefficients (r) between the microbiological and biochemical parameters of the obtained biopreparations and the average values for the variant of germination energy, viability and biometric data of flax seedlings were calculated. A moderate inverse relationship was found between the germination of flax seeds of the Nadezhda variety and the number of microorganisms using organic forms of nitrogen ($r = -0.64$). A moderate direct relationship was also found between the activity of catalase and dehydrogenase enzymes and the average length of one seedling ($r = 0.56$ and 0.66 , respectively). Whereas when studying the seeds of the Diplomat variety, the average weight of one raw sprout strongly correlated with the number of microorganisms using mineral forms of nitrogen ($r = 0.85$) and the total number of microorganisms using mineral and organic forms of nitrogen ($r = 0.91$).

Keywords: biological product LPB-Fe, flax, variety Nadezhda, variety Diplomat, germination energy, viability, sprout average length, sprout average weight

Для цитирования: Любимова Н.А., Рабинович Г.Ю. Апробация биопрепарата с наночастицами оксида железа на семенах льна различной скороспелости // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2025. Т. 55. № 12. С. 36–46. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-12-4>

For citation: Lyubimova N.A., Rabinovich G.Yu. Testing of a biopreparation with iron oxide nanoparticles on flax seeds of varying prematurity. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2025, vol. 55, no. 12, pp. 36–46. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2025-12-4>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (тема FGUR-2025-0009).

Acknowledgements

The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment of the FSBSI FRC "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute" (topic FGUR-2025-0009).

ВВЕДЕНИЕ

Лен (*Linum usitatissimum* L.) – одна из традиционных культур, издавна возделываемых на территории России. Данная культура нашла свое применение в пищевой, текстильной и химической промышленности, а также в медицине и производстве современных композитных материалов [1]. В 2022 г. лен-долгунец выращивался в 22 регионах Российской Федерации, при этом в Тверской области площадь под посевы льна-долгунца составила 2000 га [2].

Одним из способов повышения урожайности льна-долгунца, а также качества получаемого из него волокна является применение современных удобрений, таких как биопрепараты и микроэлементы в наноформе [3, 4]. Микроэлементы – это вещества, которые необходимы растениям в небольших количествах, но при их дефиците нарушается

физиологическая структура растений [5]. Например, образование хлорофилла в растениях зависит от получаемого ими железа. Дефицит этого элемента снижает интенсивность фотосинтеза, а следовательно, роста и развития растений, что в итоге приводит к снижению урожайности. Проявляется дефицит железа в виде хлороза (пожелтения между жилками листьев). Железо участвует и в других важных биохимических процессах, таких как дыхание, симбиотическая фиксация азота, транспорт электронов, биосинтез цитохрома, поглощение питательных веществ, синтез ДНК и белка [6]. В связи с этим железо можно отнести к элементам, определяющим уровень продуктивности и качество сельскохозяйственных культур.

Среди всех наноматериалов на основе железа наиболее перспективными в растениеводстве в качестве удобрений считаются на-

но-нуль-валентное железо Fe (0), а также наночастицы оксидов железа Fe₂O₃ и Fe₃O₄ [7]. Так, некорневая подкормка огурца (*Cucumis sativus* L.) наночастицами Fe₃O₄ (200 мг/л) способствовала увеличению длины лозы, количества, размера и массы плодов как в открытом, так и в защищенном грунте. Кроме того, увеличилась масса 1000 семян, их энергия прорастания и всхожесть по сравнению с контролем [8]. М. Li et al. [9] в своей работе отмечали, что благодаря применению наночастиц Fe (0) и Fe₃O₄ в концентрации 50–500 мг/л при выращивании риса в гидропонном растворе с дефицитом железа длина и объем корня увеличились на 16–41 и 13–32% соответственно. Применение наночастиц Fe₂O₃ в этой же концентрации, напротив, ингибировало рост корней на 25%.

Использование различных биопрепаратов способствует повышению численности полезных микроорганизмов в ризосфере. При их взаимодействии с растениями увеличивается усвоение азота и фосфора, повышаются коэффициенты использования макро- и микроэлементов из удобрений и почвы, стимулируются рост и развитие растений. Кроме того, микробные препараты способствуют подавлению роста фитопатогенных организмов и повышению стрессоустойчивости растений [10]. Несмотря на то, что использование и наночастиц железа, и биопрепаратов в растениеводстве является перспективным направлением, в литературе нет данных о результатах их совместного применения. Например, известно, что ризобактерии способствуют усвоению железа резуховидкой Талы (*Arabidopsis thaliana*) в условиях его дефицита [11]. Кроме того, совместное применение ризобактерий (штамм *leguminosarum* CF1) и наночастиц Fe₃O₄ для обработки семян фасоли способствовало увеличению длины корней и побегов, а также площади листьев по сравнению не только с контролем, но и с вариантами применения наночастиц и бактерий по отдельности [12].

Цель исследования – в лабораторных условиях изучить влияние жидкофазного био-

препарата (ЖФБ), обогащенного наночастицами оксида железа (Fe₃O₄), на всхожесть и биометрические параметры проростков льна-долгунца различной скороспелости с изначально низкой всхожестью.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В работе использованы два сорта льна – Надежда (среднеспелый) и Дипломат (позднеспелый). Оба сорта включены в Госреестр по Северо-Западному региону¹. Семена получены в ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур» (Тверь).

Наночастицы Fe₃O₄ синтезированы с использованием экстракта зеленого чая и раствора FeSO₄ · 7H₂O в концентрации 0,1 моль/л. Подробная методика синтеза описана в [13].

Использованный жидкофазный биопрепарат является разработкой научного коллектива отдела биотехнологий Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель и представляет собой жидкость темно-коричневого цвета, полученную из смеси торфа и побочного продукта животноводства (навоз крупного рогатого скота) ферментационно-экстракционным методом [14]. Порошок, содержащий наночастицы, введен в готовый ЖФБ для усиления его полифункциональных свойств в дозе 25–500 мг/л. В исходном и модернизированном наночастицами оксида железа ЖФБ общепринятым микробиологическим методом предельных разведений на твердых питательных средах определена численность мезофильных микроорганизмов: использующих минеральные формы азота – на крахмало-аммиачном агаре (КАА), использующих органические формы азота – на мясопептонном агаре (МПА). Кроме того, во всех вариантах ЖФБ была определена активность каталазы и дегидрогеназы газометрическим и фотоколориметрическими методами соответственно. Все определения выполнены в трехкратной аналитической повторности.

¹ФГБУ «Госсорткомиссия»: офиц. сайт. URL: <https://gossortrf.ru>.

Проращивание семян осуществляли согласно ГОСТ 12038–84² в течение 7 сут в стеклянных чашках Петри при температуре 22 ± 1 °С в темноте. Семена выкладывали в чашки Петри на фильтровальную бумагу, смоченную водой (контроль) или раствором исследуемых биопрепаратов объемом 5 мл. Концентрация препаратов составляла 0,1–1,4%. В каждом варианте было предусмотрено четыре повторности (по 35 семян в каждой). Оценку эффективности проводили путем определения энергии прорастания на 3-и сутки и всхожести семян, а также измерения длины и массы проростка на 7-е сутки. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Необходимо отметить, что в ходе эксперимента использованы семена с низкой всхожестью, чтобы наиболее полно оценить эффективность биопрепаратов.

Для более полного понимания влияния биопрепаратов на растительный организм рассчитаны коэффициенты корреляции (r) между микробиологическими и биохимическими параметрами биопрепаратов и средними значениями энергии прорастания, всхожести и биометрических данных проростков.

Статистическую обработку результатов осуществляли в программе Microsoft Office Excel 2007. Данные в таблицах представлены в виде среднего значения $\pm$ доверительный интервал.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Линейку биопрепаратов, полученных путем добавления в ЖФБ порошка наночастиц Fe_3O_4 , исследовали на содержание микрофлоры, использующей преимущественно органические (аммонификаторы на МПА) и минеральные формы азота (на КАА), а также по степени активности оксидоредуктаз (см. табл. 1).

Анализ показал, что добавление в ЖФБ Fe_3O_4 в виде порошка наночастиц способствовало подкислению базового биопрепарата только при введении в него повышенных доз оксида железа (250 и 500 мг/л), что связано с его сильными окисляющими свойствами. Отметим, что данный уровень подкисления вполне безопасный, так как остается в диапазоне рН, близком к нейтральному значению.

Повышение дозы порошка до 250 и 500 мг привело к резкому снижению численности микроорганизмов, использующих минеральные формы азота: в 2,2 и 48,0 раза соответственно по сравнению с исходным ЖФБ, в котором количество микроорганизмов, использующих органические и минеральные формы азота, составило $20,2 \cdot 10^{11}$ и $14,4 \cdot 10^{11}$ КОЕ/мл соответственно. Что касается микроорганизмов, использующих органический азот, то при добавлении наноча-

Табл. 1. Результаты микробиологического и биохимического анализов ЖФБ с наночастицами оксида железа

Table 1. Results of microbiological and biochemical analyses of LPB with iron oxide nanoparticles

Биопрепарат	Доза порошка, мг/л	рН	Численность микроорганизмов, $\times 10^{11}$ КОЕ/мл		Активность	
			использующих органические формы азота	использующих минеральные формы азота	каталазы, $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г}/\text{мин}$	дегидрогеназы, мг ТФФ/г/24 ч
ЖФБ	—	6,3	20,2	14,4	$2,6 \pm 0,03$	$1,7 \pm 0,2$
ЖФБ-Fe-1	25	6,4	15,6	49,8	$2,6 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,2$
ЖФБ-Fe-2	50	6,3	14,0	49,8	$2,4 \pm 0,3$	$2,0 \pm 0,2$
ЖФБ-Fe-3	100	6,4	8,0	39,5	$2,7 \pm 0,3$	$2,5 \pm 0,3$
ЖФБ-Fe-4	250	6,2	10,1	6,5	$2,7 \pm 0,3$	$1,7 \pm 0,2$
ЖФБ-Fe-5	500	6,1	9,9	0,3	$1,6 \pm 0,5$	$1,3 \pm 0,2$

²ГОСТ 12038–84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ, 2011.

стиц Fe_3O_4 их численность снизилась в 1,3–2,6 раза по сравнению с ЖФБ без добавок и варьировало от $8,0 \cdot 10^{11}$ до $15,6 \cdot 10^{11}$ КОЕ/мл в зависимости от дозы порошка. В то же время при добавлении порошка в дозах от 25 до 100 мг/л количество микроорганизмов, использующих минеральный азот, увеличилось в 2,7–3,5 раза по сравнению с ЖФБ.

Что касается активности каталазы, то добавление в ЖФБ наночастиц Fe_3O_4 на нее практически не повлияло, за исключением максимальной концентрации порошка: в данном случае активность каталазы существенно снизилась по сравнению с ЖФБ без добавок. Аналогичная тенденция наблюдалась и для дегидрогеназы: при введении порошка с наночастицами в дозе 500 мг/л ее активность снизилась в 1,3 раза по сравнению с ЖФБ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что наночастицы Fe_3O_4 в больших количествах обладают окислительной и антимикробной активностью, о чем ранее упоминали и другие авторы. Например, в [15] показано, что наночастицы Fe_3O_4 , синтезированные с использованием экстракта листьев *Melia azedarach* и раствора $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, продемонстрировали явную антимикробную активность против патогенных бактерий

Escherichia coli, *Vibrio cholerae* и *Salmonella enterica*.

Результаты лабораторного опыта на семенах льна сорта Надежда показали, что при поливе базовым препаратом ЖФБ энергия прорастания увеличилась на 10–16%, всхожесть – на 2–10% по сравнению с контрольным вариантом (см. рис. 1).

При использовании для полива линейки биопрепаратов ЖФБ-Fe энергия прорастания и всхожесть семян оказались выше, чем в контроле, практически во всех вариантах. Применение ЖФБ-Fe-1 с минимальной дозой порошка, содержащего наночастицы, и в концентрации 0,1–0,8% повысило энергию прорастания на 5–8% относительно контроля. Тогда как при увеличении концентрации до 1,4% данный параметр снизился до значений, равных контролю. Всхожесть семян в вариантах ЖФБ-Fe-1 и ЖФБ-Fe-2 увеличилась на 1–7 и 6–10% соответственно. Максимальные значения энергии прорастания и всхожести отмечены в варианте ЖФБ-Fe-3: они превышали контрольные показатели на 15–20 и 13–16% соответственно. При этом в вариантах с высокими дозами наночастиц (250 и 500 мг/л) энергия прорастания снова снизилась по сравнению с вариантом

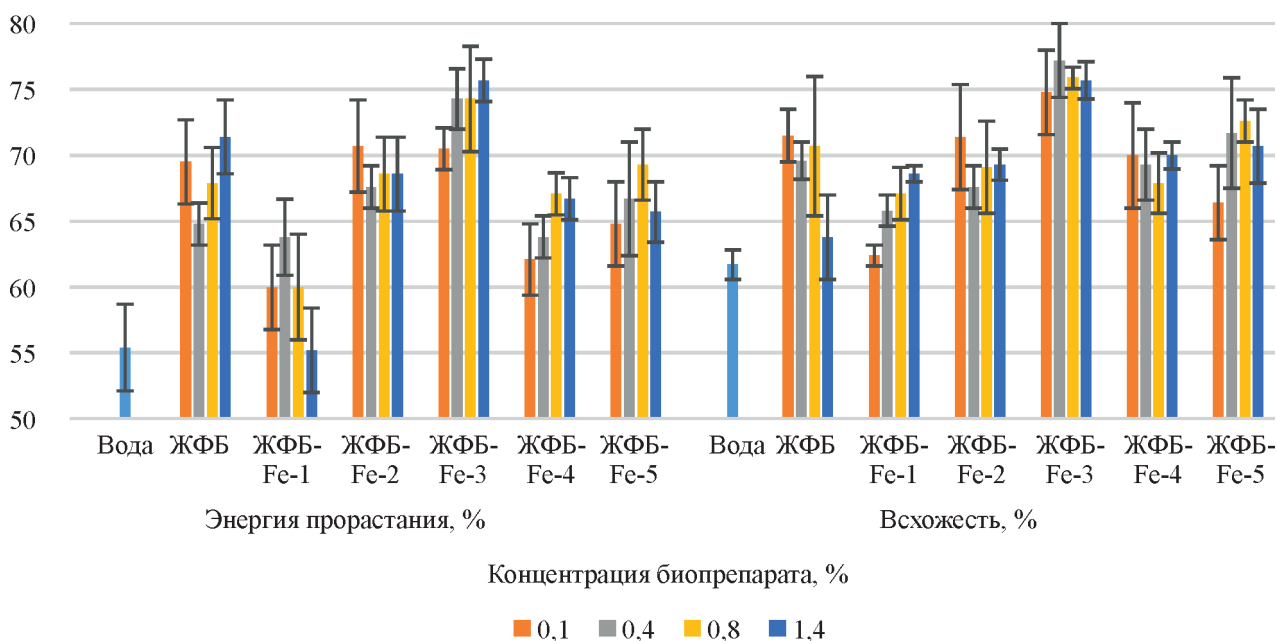


Рис. 1. Энергия прорастания и всхожесть семян льна сорта Надежда

Fig. 1. Germination energy and viability of flax seeds of the Nadezhda variety

ЖФБ-Fe-3. Однако она была больше, чем в контроле, на 7–12 и 11–14% в вариантах ЖФБ-Fe-4 и ЖФБ-Fe-5 соответственно. Всхожесть семян в этих вариантах была больше, чем в контроле, на 6–9 и 5–11%. Выявлена умеренная обратная взаимосвязь между всхожестью семян и численностью микроорганизмов, использующих органические формы азота ($r = -0,64$).

Добавление наночастиц Fe_3O_4 в готовый ЖФБ практически не повлияло на среднюю длину и среднюю массу проростка в отличие от энергии прорастания и всхожести (см. табл. 2). Так, при поливе исходным ЖФБ средняя длина проростка варьировала от 13 до 16 см, что на 1–3 см больше, чем в контроле. Тогда как при использовании ЖФБ-Fe с дозами порошка от 25 до 250 мг/л средняя длина проростка во всех вариантах составила 15–17 см, т.е. была на 3–5 см больше относительно контроля и всего лишь на 1–2 см больше по сравнению с вариантом без наночастиц. Кроме того, в варианте с максимальной концентрацией наночастиц (доза порошка 500 мг/л) средняя длина проростка уменьшилась, составив 14–15 см. Вероятно, что дальнейшее увеличение дозы наночастиц привело бы к еще большему ингибированию

роста растений из-за токсических эффектов, вызванных большими концентрациями. При этом наблюдается умеренная прямая зависимость между активностью каталазы и дегидрогеназы (см. табл. 1) и средней длиной одного проростка ($r = 0,56$ и $0,66$ соответственно).

Средняя масса проростка практически не зависела от количества наночастиц и концентрации исследуемых препаратов (см. табл. 2). Так, при использовании для полива исходного ЖФБ средняя масса проростка превышала показатели контроля на 2–7 мг, и этот результат не является статистически значимым. Тогда как наиболее значимые отличия в средней массе проростков отмечены в вариантах ЖФБ-Fe-3 и ЖФБ-Fe-4, в которых средняя масса проростка была больше, чем в контроле, на 10–15 и 14–18 мг соответственно.

Полив биопрепаратами ЖФБ и ЖФБ-Fe с различной концентрацией наночастиц Fe_3O_4 в основном положительно повлиял на энергию прорастания и всхожесть семян позднего сорта Дипломат (см. рис. 2). Так, при применении оригинального ЖФБ энергия прорастания увеличилась на 6–13% по сравнению с контролем, как и в случае с ЖФБ-Fe с дозой порошка более 50 мг/л. Что касается

Табл. 2. Результаты опыта по проращиванию семян льна сорта Надежда

Table 2. Results of the experiment on germination of flax seeds of the Nadezhda variety

Биопрепарат	Концентрация, %			
	0,1	0,4	0,8	1,4
<i>Средняя длина проростка, см</i>				
Контроль (вода)	$12,3 \pm 1,2$			
ЖФБ	$14,2 \pm 2,1$	$15,9 \pm 1,5$	$15,3 \pm 2,2$	$13,2 \pm 1,1$
ЖФБ-Fe-1	$15,0 \pm 0,8$	$16,1 \pm 0,8$	$15,3 \pm 0,8$	$15,4 \pm 0,8$
ЖФБ-Fe-2	$16,6 \pm 0,6$	$17,0 \pm 0,6$	$17,0 \pm 0,7$	$15,7 \pm 0,9$
ЖФБ-Fe-3	$16,4 \pm 0,8$	$17,1 \pm 1,1$	$16,8 \pm 1,4$	$16,0 \pm 0,7$
ЖФБ-Fe-4	$16,2 \pm 0,8$	$17,4 \pm 0,8$	$16,3 \pm 0,9$	$15,3 \pm 0,9$
ЖФБ-Fe-5	$14,4 \pm 0,7$	$14,3 \pm 0,7$	$14,5 \pm 0,8$	$15,2 \pm 0,7$
<i>Средняя масса сырого проростка, мг</i>				
Контроль (вода)	$43,6 \pm 3,8$			
ЖФБ	$45,2 \pm 3,2$	$49,8 \pm 0,9$	$47,4 \pm 2,3$	$50,6 \pm 0,1$
ЖФБ-Fe-1	$54,6 \pm 3,8$	$51,9 \pm 2,8$	$51,6 \pm 3,8$	$54,2 \pm 2,9$
ЖФБ-Fe-2	$46,6 \pm 2,5$	$51,0 \pm 3,5$	$51,5 \pm 1,2$	$45,8 \pm 2,6$
ЖФБ-Fe-3	$52,9 \pm 0,9$	$58,3 \pm 4,1$	$55,1 \pm 4,3$	$52,1 \pm 0,9$
ЖФБ-Fe-4	$57,1 \pm 2,4$	$57,7 \pm 1,5$	$61,6 \pm 1,7$	$60,6 \pm 0,5$
ЖФБ-Fe-5	$49,6 \pm 3,3$	$46,3 \pm 2,1$	$53,9 \pm 1,7$	$49,4 \pm 2,1$

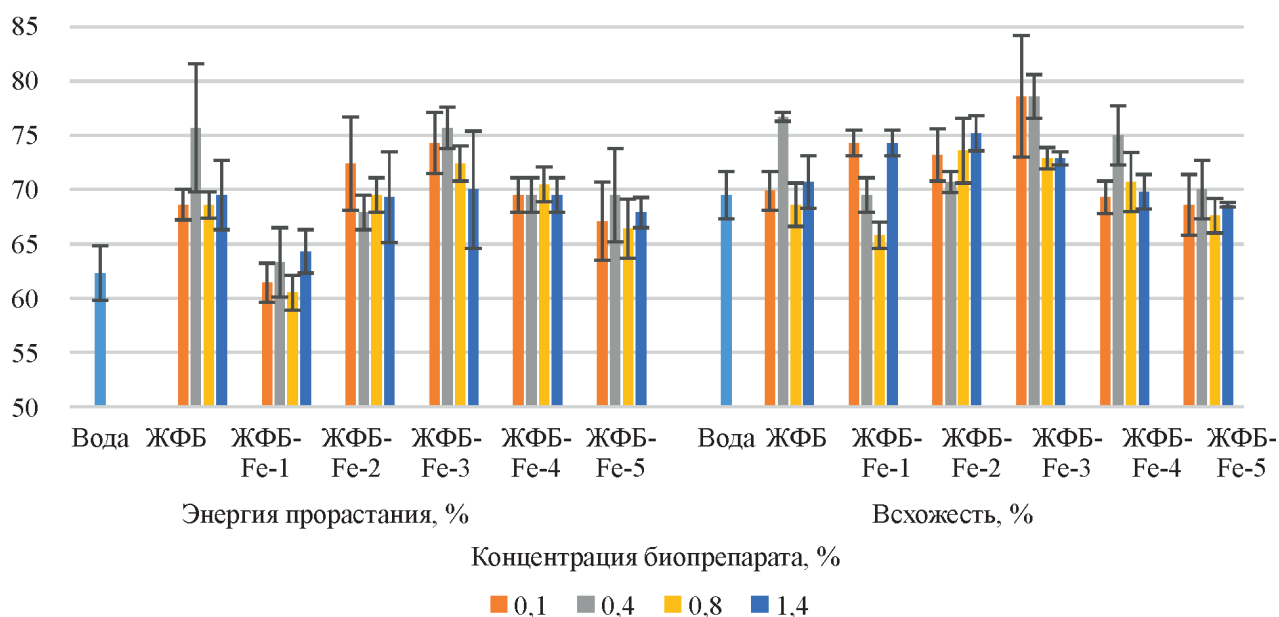


Рис. 2. Энергия прорастания и всхожесть семян льна сорта Дипломат

Fig. 2. Germination energy and viability of flax seeds of the Diplomat variety

всхожести семян, то она была практически одинаковой во всех исследуемых вариантах, за редким исключением. Наиболее заметное влияние на всхожесть оказал биопрепарат ЖФБ-Fe-3, при использовании которого она увеличилась на 4–9% по сравнению с контролем. Кроме того, выявлена сильная взаимосвязь между активностью каталазы и дегидрогеназы в биопрепаратах (см. табл. 1) и всхожестью семян ($r = 0,66$ и $0,89$ соответственно).

Использование биопрепаратов ЖФБ и ЖФБ-Fe с различной концентрацией наночастиц повлияло на среднюю длину и среднюю массу проростка (см. табл. 3). Так, средняя длина проростка в основном увеличилась на 2–5 см по сравнению с контролем. При этом максимальные значения получены в варианте ЖФБ-Fe-2: превышение показателей контроля на 4,0–5,5 см. Кроме того, при проращивании семян льна сорта Дипломат в отличие от сорта Надежда не было отмечено негативного влияния высоких концентраций наночастиц на рост и развитие растений. Средняя масса сырого проростка в основном была больше, чем в контроле, во всех опытных вариантах. Как и в случае со средней длиной, максимальная средняя масса зафиксирована в варианте ЖФБ-Fe-2: превышение показателей

контроля на 10–26 мг. Следует подчеркнуть, что средняя масса сырого проростка сильно коррелировала с численностью микроорганизмов, использующих минеральные формы азота ($r = 0,85$), и суммарным количеством микроорганизмов, использующих минеральные и органические формы азота ($r = 0,91$).

Необходимо отметить, что во всех исследуемых вариантах энергия прорастания и всхожесть семян обоих сортов оказались достаточно низкими. С одной стороны, это может быть связано с их сортовыми особенностями, с другой – причиной может являться неправильно выбранный объем полива (5 мл). Так, достоверно известно, что при проведении трехгодичного эксперимента в полевых условиях всхожесть семян льна различных сортов существенно снизилась в год, который характеризовался относительной влагообеспеченностью в период формирования семян (июль – август) [16]. Тем не менее в нашем эксперименте используемые для полива биопрепараты с наночастицами оксида железа положительно повлияли на все исследуемые параметры.

Положительное влияние оксида железа в наноформе подтверждено и другими авторами. Например, в [17] отмечено, что листовая подкормка лекарственных растений

Табл. 3. Результаты опыта по проращиванию семян льна сорта Дипломат

Table 3. Results of the experiment on germination of flax seeds of the Diplomat variety

Биопрепарат	Концентрация, %			
	0,1	0,4	0,8	1,4
<i>Средняя длина проростка, см</i>				
Контроль (вода)	11,3 ± 0,4			
ЖФБ	13,4 ± 1,3	14,3 ± 1,6	14,5 ± 1,2	14,1 ± 1,1
ЖФБ-Fe-1	14,6 ± 1,3	14,2 ± 0,9	12,9 ± 1,0	13,0 ± 0,8
ЖФБ-Fe-2	16,2 ± 0,6	16,1 ± 0,7	15,0 ± 0,8	16,5 ± 0,6
ЖФБ-Fe-3	13,5 ± 0,7	13,3 ± 0,8	13,1 ± 0,7	14,0 ± 0,7
ЖФБ-Fe-4	15,2 ± 1,0	14,9 ± 0,9	14,9 ± 1,0	16,2 ± 0,8
ЖФБ-Fe-5	16,1 ± 0,7	15,1 ± 0,6	14,0 ± 0,8	14,7 ± 0,6
<i>Средняя масса сырого проростка, мг</i>				
Контроль (вода)	48,1 ± 3,0			
ЖФБ	53,2 ± 1,0	66,3 ± 3,3	47,7 ± 0,8	61,5 ± 2,7
ЖФБ-Fe-1	59,2 ± 2,1	64,8 ± 3,6	60,0 ± 1,4	67,8 ± 4,0
ЖФБ-Fe-2	74,6 ± 2,8	73,5 ± 6,8	58,3 ± 3,1	59,1 ± 2,2
ЖФБ-Fe-3	51,8 ± 2,8	54,5 ± 2,1	54,1 ± 1,5	60,0 ± 2,1
ЖФБ-Fe-4	55,3 ± 3,0	53,7 ± 2,9	48,7 ± 1,2	57,0 ± 4,7
ЖФБ-Fe-5	46,4 ± 2,1	53,2 ± 4,5	53,8 ± 5,1	48,0 ± 3,0

Pseudostellaria heterophylla раствором наночастиц Fe_3O_4 в концентрации 20–50 мг/л стимулировало увеличение длины и диаметра побегов и сухой массы корневого клубня, способствуя росту урожайности корневых клубней на единицу площади. В то же время дальнейшее повышение концентрации до 100 мг/л вызвало обратный эффект. Положительное влияние наночастиц на урожайность авторы связывают с улучшением фотосинтетической активности, а также со стимулированием синтеза органического вещества и его распределением в растительном организме [17]. D.B. Dola et al. [18] установлено, что листовая обработка сои наночастицами Fe_3O_4 в концентрации 200 ppm в засушливых условиях положительно влияет на рост растений, что отражается в увеличении их высоты, массы свежих листьев и стеблей, а также общей свежей и сухой массы на 21; 31; 46; 33 и 48% соответственно по сравнению с контролем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты лабораторного эксперимента на семенах льна сортов Надежда и Дипломат показали, что биопрепараты ЖФБ-Fe с различной концентрацией наночастиц Fe_3O_4

положительно повлияли на все исследуемые параметры.

Так, при проращивании семян среднеспелого сорта Надежда энергия прорастания и всхожесть семян увеличились на 15–20 и 13–16% по сравнению с контролем при поливе биопрепаратом ЖФБ-Fe-3 с дозой порошка, содержащего наночастицы, 100 мг/л. Кроме того, практически во всех вариантах, за исключением ЖФБ-Fe-5 с дозой порошка 500 мг/л, средняя длина проростка варьировала от 15 до 17 см, т.е. была больше, чем в контроле, на 3–5 см. Выявлена умеренная обратная взаимосвязь между всхожестью семян и численностью микроорганизмов, использующих органические формы азота ($r = -0,64$), а также умеренная прямая зависимость между активностью каталазы и дегидрогеназы и средней длиной проростка ($r = 0,56$ и $0,66$ соответственно).

При проращивании семян льна позднеспелого сорта Дипломат отмечено наибольшее влияние исследуемых биопрепаратов на увеличение средней длины и средней массы проростка. Так, максимальные прибавки относительно контроля в длине и массе проростков наблюдались в варианте ЖФБ-Fe-2 (доза

порошка 50 мг/л) – 4,0–5,5 и 10,0–26,0 мг соответственно. Важно отметить, что средняя масса сырого проростка сильно коррелировала с численностью микроорганизмов, использующих минеральные формы азота ($r = 0,85$), и суммарным количеством микроорганизмов, использующих минеральные и органические формы азота ($r = 0,91$).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Базанов Т.А., Уцаповский И.В., Логинова Н.Н., Смирнова Е.В., Михайлова П.Д. Метод ISSR-маркирования в исследовании генетического разнообразия сортов льна // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2023. № 24 (5). С. 767–776. DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.5.767-776.
2. Басова Н.В., Новиков Э.В. Анализ производства лубяных культур в России за период импортозамещения // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 2 (3). С. 54–63. DOI: 10.54016/SVITOK.2023.67.29.007.
3. Круглова С.А., Золотова Р.П. Эффективность применения биоконкомплекс «Фитогулат» при возделывании льна-долгунца в условиях Костромской области // Владимирский земледелец. 2020. № 4. С. 14–17. DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10139.
4. Конова А.М., Прудникова А.Г., Гаврилова А.Ю. Управление продуктивностью льна-долгунца путем обработки семян микроэлементами и нанопрепаратом // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 27–31. DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp27-31.
5. Khatri A., Bhatia R. Efficacy of nanofertilizers over chemical fertilizers in boosting agronomic production // Nature Environment and Pollution Technology. 2023. Vol. 22. N 2. P. 767–776. DOI: 10.46488/NEPT.2023.v22i02.019.
6. Ahmed M.A., Shafei-Masouleh S.-S., Mohsin R.M., Salih Z.K. Foliar application of iron oxide nanoparticles promotes growth, mineral contents, and medicinal qualities of *Solidago virgaurea* L. // Journal of Soil Science and Plant Nutrition. 2023. Vol. 23. P. 2610–2624. DOI: 10.1007/s42729-023-01218-2.
7. Szuplewska A., Sikorski J., Matczuk M., Ruzik L. Enhanced edible plant production using nano-manganese and nano-iron fertilizers: Current status, detection methods and risk assessment // Plant Physiology and Biochemistry. 2023. Vol. 199. P. 107745–107757. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.107745.
8. Gupta N., Jain S.K., Tomar B.S., Anand A., Sagar V., Chaubey T., Singh A.K. 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. Vol. 11. P. 3211–3231. DOI: 10.3390/plants1123211.
9. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Zh. Physiological impacts of zero valent iron, Fe₃O₄ and Fe₂O₃ nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers // Environmental Pollution. 2021. Vol. 269. P. 116134–116145. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116134.
10. Рассохина И.И. Использование микроорганизмов как средство повышения продуктивности и устойчивости сельскохозяйственных культур // Агрозоотехника. 2021. Т. 4. № 3. С. 1–17. DOI: 10.15838/alt.2021.4.3.2.
11. Kong W.-L., Wang Y.-H., Wu X.-Q. Enhanced iron uptake in plants by volatile emissions of *Rahnella aquatilis* JZ-GX1 // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. P. 704000–704012. DOI: 10.3389/fpls.2021.704000.
12. 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. Vol. 17. P. 100275–100290. DOI: 10.1016/j.rhosph.2020.100275.
13. 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. DOI: 10.19047/0136-1694-2024-SPYC-164-192.
14. 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. Vol. 390. P. 01016.
15. Abolarinwa T.O., Ajose D.J., Oluwarinde B.O. Antimicrobial properties and cytotoxicity of iron oxide nanoparticles synthesized using *Melia azedarach* leaf extract against diarrhoeal pathogens // BioNanoScience. 2024. Vol. 14. P. 5003–5016. DOI: 10.1007/s12668-024-01393-1.
16. Торопова Е.Ю., Купцевич Н.А., Порсев И.Н. Факторы, определяющие качество семян льна

в Курганской области // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 12 (122). С. 15–19.

17. Li J., Ma Y., Xie Y. Stimulatory effect of Fe₃O₄ nanoparticles on the growth and yield of *Pseudostellaria heterophylla* via improved photosynthetic performance // HortScience. 2021. Vol. 56 (7). P. 753–761. DOI: 10.21273/HORTSCI15658-20.
18. Dola D.B., Mannan M.A., Sarker U., Islam T., Ercisli S., Saleem M.H., Pop O.L., Marc R.A. Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of *Glycine max* seed in water deficits // Frontiers in Plant Science. 2022. Vol. 13. P. 992535. DOI: 10.3389/fpls.2022.992535.

REFERENCES

1. Bazanov T.A., Uschapovsky I.V., Loginova N.N., Smirnova E.V., Mikhaylova P.D. Method of ISSR-marking in the study of genetic diversity of flax varieties. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka = Agricultural Science Euro-North-East*, 2023, no. 24 (5), pp. 767–776. (In Russian). DOI: 10.30766/2072-9081.2023.24.5.767-776.
2. Basova N.V., Novikov E.V. Analysis of the production of bast crops in Russia for the period of import substitution. *Tekhnicheskie kul'tury. Nauchnyy sel'skokozyajstvennyy zhurnal = Technical Crops. Scientific Agricultural Journal*, 2023, no. 2 (3), pp. 54–63. (In Russian). DOI: 10.54016/SVITOK.2023.67.29.007.
3. Kruglova S.A., Zolotova R.P. Efficiency of the biocomplex "Phytohumate" in cultivating linen flax in Kostroma region. *Vladimirskiy zemledel'ec = Vladimir agriculturist*, 2020, no. 4, pp. 14–17. (In Russian). DOI: 10.24411/2225-2584-2020-10139.
4. Konova A.M., Prudnikova A.G., Gavrilova A.Yu. Control the productivity of flax by treating seeds with microelements and nanopreparation. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agricultural Scientific journal*, 2021, no. 12, pp. 27–31. (In Russian). DOI: 10.28983/asj.y2021i12pp27-31.
5. Khatri A., Bhateria R. Efficacy of nanofertilizers over chemical fertilizers in boosting agronomic production. *Nature Environment and Pollution Technology*, 2023, vol. 22, no. 2, pp. 767–776. DOI: 10.46488/NEPT.2023.v22i02.019.
6. Ahmed M.A., Shafei-Masouleh S.-S., Mohsin R.M., Salih Z.K. Foliar application of iron oxide nanoparticles promotes growth, mineral contents, and medicinal qualities of *Solidago virgaurea* L. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2023, vol. 23, pp. 2610–2624. DOI: 10.1007/s42729-023-01218-2.
7. Szuplewska A., Sikorski J., Matczuk M., Ruzik L. Enhanced edible plant production using nano-manganese and nano-iron fertilizers: Current status, detection methods and risk assessment. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2023, vol. 199, pp. 107745–107757. DOI: 10.1016/j.plaphy.2023.107745.
8. Gupta N., Jain S.K., Tomar B.S., Anand A., Sagar V., Chaubey T., Singh A.K. 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, vol. 11, pp. 3211–3231. DOI: 10.3390/plants11233211.
9. Li M., Zhang P., Adeel M., Guo Zh. Physiological impacts of zero valent iron, Fe₃O₄ and Fe₂O₃ nanoparticles in rice plants and their potential as Fe fertilizers. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 269, pp. 116134–116145. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116134.
10. Rassokhina I.I. The use of microorganisms as a means to increase productivity and sustainability of agricultural crops. *Agrozootekhnika = Agrozootekhnika*, 2021, vol. 4, no. 3. pp. 1–17. (In Russian). DOI: 10.15838/alt.2021.4.3.2.
11. Kong W.-L., Wang Y.-H., Wu X.-Q. Enhanced iron uptake in plants by volatile emissions of *Rhizobium aquatilis* JZ-GX1. *Frontiers in Plant Science*, 2021, vol. 12, pp. 704000–704012. DOI: 10.3389/fpls.2021.704000.
12. 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, vol. 17, pp. 100275–100290. DOI: 10.1016/j.rhisph.2020.100275.
13. Lyubimova N.A., Rabinovich G.Yu. Influence of Fe₃O₄ nanoparticles on potato yield and development of soil microflora. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*, 2024, no. S1, pp. 164–192. (In Russian). DOI: 10.19047/0136-1694-2024-SP YC-164-192.
14. 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, vol. 390, P. 01016.

15. Abolarinwa T.O., Ajose D.J., Oluwarinde B.O. Antimicrobial properties and cytotoxicity of iron oxide nanoparticles synthesized using *Melia azedarach* leaf extract against diarrhoeal pathogens. *BioNanoScience*, 2024, vol. 14, pp. 5003–5016. DOI: 10.1007/s12668-024-01393-1.
16. Toropova E. Yu., Kuptsevich N.A., Porsev I.N. The factors determining linseed quality in the Kurgan region. *Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2014, no. 12 (122), pp. 15–19. (In Russian).
17. Li J., Ma Y., Xie Y. Stimulatory effect of Fe_3O_4 nanoparticles on the growth and yield of *Pseudostellaria heterophylla* via improved photosynthetic performance. *HortScience*, 2021, vol. 56 (7), pp. 753–761. DOI: 10.21273/HORTSCI15658-20.
18. Dola D.B., Mannan M.A., Sarker U., Islam T., Ercisli S., Saleem M.H., Pop O.L., Marc R.A. Nano-iron oxide accelerates growth, yield, and quality of *Glycine max* seed in water deficits. *Frontiers in Plant Science*, 2022, vol. 13, p. 992535. DOI: 10.3389/fpls.2022.992535.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Любимова Надежда Андреевна**, заведующая лабораторией, научный сотрудник, кандидат химических наук; SPIN-код 7515-3119, ORCID 0000-0002-5831-5000; **адрес для переписки:** Россия, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2; e-mail: n.nemygina@gmail.com

Рабинович Галина Юрьевна, заведующая отделом, главный научный сотрудник, доктор биологических наук, профессор; SPIN-код 1437-3617, ORCID 0000-0002-5060-6241

AUTHOR INFORMATION

✉ **Nadezhda A. Lyubimova**, Laboratory Head, Researcher, Candidate of Science in Chemistry; SPIN-code 7515-3119, ORCID 0000-0002-5831-5000; **address:** Build. 2, 7, Pyzhevsky Lane, Moscow, 119017, Russia; e-mail: n.nemygina@gmail.com

Galina Yu. Rabinovich, Department Head, Head Researcher, Doctor of Science in Biology, Professor; SPIN-code 1437-3617, ORCID 0000-0002-5060-6241

Дата поступления статьи / Received by the editors 20.04.2025
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 01.07.2025
Дата публикации / Published 19.12.2025