



Научная статья

УДК 58.084.1+631.86+631.81.095.337

doi: 10.55186/25876740_2024_67_3_273

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА НА ВСХОЖЕСТЬ И БИОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА

Н.А. Любимова, Г.Ю. Рабинович

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

Аннотация. Использование наночастиц ZnO и биопрепаратов считаются экономически выгодными и экологически безопасными способами повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Данная работа посвящена исследованию влияния совместного применения биопрепарата ЖФБ (жидкофазный биопрепарат) и наночастиц ZnO, синтезированных с использованием экстракта зеленого чая и раствора ZnSO₄·7H₂O концентрацией 0,5 моль/л, на энергию прорастания, всхожесть и биометрию проростков льна-долгунца сорта Тверской. Результаты микробиологического анализа биопрепарата ЖФБ-Zn показали, что при введении в ЖФБ наночастиц ZnO количество аммонифицирующих и амилолитических микроорганизмов снизилось в 4,5 и 13,7 раза по сравнению с ЖФБ. В работе изучалось два способа применения биопрепаратов: полив и инокуляция. Так, при поливе ЖФБ и ЖФБ-Zn энергия прорастания была 76-89,5 и 77-87% соответственно, тогда как всхожесть в обоих вариантах варьировалась от 82 до 90,5%. Наиболее выраженное положительное влияние совместного использования ЖФБ и наночастиц ZnO для полива было отмечено при исследовании средней длины одного проростка: в варианте ЖФБ-Zn была получена максимальная средняя длина 14-15 см, тогда как при использовании для полива ЖФБ и наночастиц ZnO средняя длина одного проростка была 12-14 см. Инокуляция семян в биопрепаратуре ЖФБ-Zn, наоборот, больше повлияла на энергию прорастания и всхожесть семян, которые увеличились по сравнению не только с контролем, но и с вариантом ЖФБ. При этом инокуляция семян в исследуемых препаратах не повлияла ни на среднюю длину, ни на среднюю массу одного проростка. Таким образом, совместное использование биопрепарата ЖФБ и наночастиц ZnO является весьма перспективным. Однако оно требует дополнительных исследований по выяснению максимальной концентрации наночастиц ZnO в ЖФБ, при которой теряются его полезные свойства.

Ключевые слова: лен сорта Тверской, биопрепарат ЖФБ, оксид цинка, биосинтез наночастиц, энергия прорастания, всхожесть, длина и масса проростка

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 22-76-00016.

Original article

INFLUENCE OF ZINC OXIDE NANOPARTICLES ON GERMINATION AND BIOMETRIC PARAMETERS OF FLAX

Н.А. Любимова, Г.Ю. Рабинович

Federal Research Centre Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia

Abstract. The use of ZnO nanoparticles and biological products are considered cost-effective and environmentally friendly ways to increase crop yields. This work is devoted to the study of the effect of the combined use of a biological product LPB (liquid-phase biological product) and ZnO nanoparticles, synthesized using green tea extract and a ZnSO₄·7H₂O solution with a concentration of 0.5 mol/l, on the germination energy, germination and biometry of fiber flax seedlings of the Tverskoy variety. The results of microbiological analysis of the biological product LPB-Zn showed that when ZnO nanoparticles were introduced into LPB, the number of ammonifying and amylolytic microorganisms decreased by 4.5 and 13.7 times compared to ZnO nanoparticles. The work studied two methods of using biological products: watering and inoculation. Thus, when irrigated with LPB and LPB-Zn, the germination energy was 76-89.5 and 77-87%, respectively, while germination in both options varied from 82 to 90.5%. The most pronounced positive effect of the combined use of LPB and ZnO nanoparticles for irrigation was noted when studying the average length of one seedling: in the LPB-Zn variant, a maximum average length of 14-15 cm was obtained, while when using LPB and ZnO nanoparticles for irrigation, the average length of one seedling was 12-14 cm. Inoculation of seeds in the biological preparation LPB-Zn, on the contrary, had a greater effect on the germination energy and germination of seeds, which increased compared not only to the control, but also to the variant LPB. At the same time, inoculation of seeds in the studied preparations did not affect either the average length or the average weight of one seedling. Thus, the combined use of the biological product LPB and ZnO nanoparticles is very promising. However, it requires additional research to determine the maximum concentration of ZnO nanoparticles in LPB at which its beneficial properties are lost.

Keywords: flax variety Tverskoy, biological product LPB, zinc oxide, biosynthesis of nanoparticles, germination energy, germination, length and weight of the seedling

Acknowledgments: the research was carried out with the support of the Russian Science Foundation within the framework of scientific project No. 22-76-00016.

Введение. В почвах цинк находится в виде ионов свободного цинка (Zn^{2+}), в комплексе с гидроксигруппой ($ZnOH^+$) или с органическими веществами, чаще в виде хелатов, а также в гуминовых соединениях в коллоидной форме. Растения поглощают цинк в виде катиона Zn^{2+} или его комплексов с органическими лигандами. При этом из корней в ткани побегов ионы Zn^{2+} поступают через ксилему, но высокая концентрация цинка обнаруживается и во флюзме, что свидетельствует о его подвижности в растительном организме. Несмотря на то, что цинк относится к тяжелым металлам, он влияет на синтез, стабилизацию и функционирование ДНК и РНК, так как, участвуя в формировании генетического материала, образует так называемые «цинковые

пальцы», связанные с белками-гистонами, взаимодействующими с молекулой ДНК. Кроме того, цинк участвует в выработке клетками энергии, синтезе белков, метаболизме углеводов и липидов. Также цинк включен в состав простетических групп внутриклеточных ферментов: дегидрогеназы, альдолазы, изомеразы, трансфосфорилазы, РНК- и ДНК-полимеразы, карбонгидразы. Помимо этого, цинк определяет скорость поступления ионов калия в растительные клетки через устьица, а также влияет на объем поглощаемой воды и ее транспорт и снижает отрицательные эффекты незначительного теплового воздействия и солевого стресса. Еще цинк необходим для синтеза триптофана, являющегося предшественником ауксина — гормона роста

растений. Ионы цинка помогают поддерживать целостность клеточных мембран за счет сохранения пространственной ориентации макромолекул, важных для транспорта других ионов, а также благодаря их взаимодействию с фосфолипидами и сульфогидрильными группами мембранных белков [1].

Дефицит цинка в почве приводит к снижению скорости фотосинтеза у растений, связанной с уменьшением устьичной проводимости, а в итоге — к появлению характерных хлорозных полос на листовой пластинке. Как следствие этого, уменьшается размер листьев и длина побегов растений по сравнению с данными, полученными для образцов, получающих цинк в полном объеме. Кроме того, снижается содержание



цинка в самих растениях, что приводит к снижению продуктивности сельскохозяйственных культур и качества получаемой из них пищи [2].

Недостаточное содержание цинка в почве, на которой возделывается та или иная культура, можно компенсировать применением различных видов цинкодержащих препаратов. Например, при опрыскивании листьев кукурузы сульфатом цинка концентрацией 0,2, 1,5 и 3 ppm в растениях увеличивалось относительное содержание воды, а также скорость фотосинтеза и содержание хлорофилла. Кроме того, в экспериментальных вариантах возросла урожайность кукурузы относительно контроля. При этом некорневая обработка сульфатом цинка не повлияла ни на высоту растений, ни на количество листьев [3].

Наряду с традиционными формами цинка в сельском хозяйстве также могут применяться и наночастицы ZnO, которые также оказались эффективными с точки зрения их положительного влияния на энергию прорастания и всхожесть семян, а также на рост растений. Кроме того, по сравнению с обычными наноудобрениями можно использовать в небольших количествах, что позволяет сократить их расход в несколько раз [4]. При этом наночастицы оксида цинка могут оказаться более эффективными по сравнению с обычными солями цинка, благодаря повышенной проницаемости наночастиц ZnO в растительные ткани. Например, некорневая обработка растений кофе (*Coffea arabica* L.) наночастицами ZnO концентрацией 10 mg/l положительно повлияла на сырую массу корней и листьев, которые увеличились на 37 и 95% соответственно по сравнению с контролем. При этом увеличение сухой массы корней, стеблей и листьев составило 28, 85 и 20% соответственно. Тогда как использование в этом исследовании моногидрата сульфата цинка ($ZnSO_4 \cdot H_2O$) негативно сказалось как на сырой, так и на сухой биомассе корней стеблей и листьев, которые снизились на 15, 26 и 8% и на 28, 85 и 20% соответственно по сравнению с контролем. Более того, листья, обработанные наночастицами ZnO, содержали значительно большее количество Zn ($1267,1 \pm 367,2$ mg/kg сухой массы) по сравнению с растениями, обработанными $ZnSO_4$ ($344,1 \pm 106,2$ mg/kg сухой массы), в то время как контрольные растения имели самое низкое содержание Zn в ткани листа ($53,6 \pm 18,9$ mg/kg сухой массы) [5]. Так же положительное влияние наночастиц ZnO, в количестве эквивалентном 50-75% от общей массы вносимого цинка, было отмечено при выращивании растений салата: при некорневой обработке биомасса растений увеличилась на 14-52%, а содержание хлорофилла — на 32-69% по сравнению с контрольным вариантом (пропитка семян раствором, содержащим ионы Zn^{2+}) [6]. Некорневое применение наночастиц ZnO на растениях кукурузы позволило увеличить сырую и сухую биомассу побегов на 31 и 53% соответственно по сравнению с контролем, тогда как некорневая обработка раствором $ZnSO_4$ привела к увеличению сырой и сухой биомассы на 22 и 38%. При этом соотношение корень-побег в обоих вариантах уменьшилось на 3,7% по сравнению с контролем [7]. За счет листового применения наночастиц ZnO на 37,7% по сравнению с контролем увеличилась урожайность проса жемчужного (*Pennisetum americanum* L.). Кроме того, при применении цинкодержащего наноудобрения

отмечается увеличение длины побега на 15,1%, длины и площади корня — на 4,2 и 24,2% соответственно, а также сухой биомассы растений — на 12,5% по сравнению с контролем (без каких-либо обработок) [8].

Использование микробных биопрепаратов — это еще один экономически выгодный и экологически безопасный способ повышения урожайности сельскохозяйственных культур [9]. В состав таких биопрепаратов могут быть включены симбиотические, ассоциативные и ризосферные микроорганизмы в количестве 1-5 млрд клеток в 1 мл или 1 г препарата, что позволяет им успешно конкурировать с аборигенной микрофлорой, повышая биологическую активность почвы и, следовательно, почвенное плодородие [10]. Эффективность различных биопрепаратов была проверена на яровой и озимой пшенице, озимой ржи, ячмене, горохе, гречихе, картофеле, льне-долгунце, подсолнечнике и хлопчатнике. Результаты многолетних опытов показали, что при применении различных биопрепаратов урожайность зерновых увеличилась в среднем на 15-20%, а овощных культур — на 20-30%. Кроме того, применение биопрепаратов положительно сказалось на качестве продукции, которое выразилось в повышении протеина, крахмала, сахаров и витаминов в зависимости от культуры [11].

Исходя из всего вышеизложенного, использование наночастиц ZnO и применение биопрепаратов являются перспективными способами повышения продуктивности сельскохозяйственных растений. В связи с этим хотелось бы изучить эффективность их совместного применения, так как в литературе информации об этом очень мало. Например, в работе [12] было показано, что при одновременной обработке тритикале биопрепаратором, содержащим микоризу и ризобактерии, стимулирующие рост растений, и наночастицами ZnO концентрацией 0,9 g/l в условиях сильной засухи относительное содержание воды увеличилось на 22,5, 32,5 и 40,6% на стадиях цветения, колошения и налива зерна соответственно по сравнению с контролем (без обработки биопрепаратором и наночастицами). При этом урожайность зерна в данном варианте была ниже, чем в контроле [12].

Цель представленной работы заключается в изучении совместного влияния на прорастание семян льна-долгунца сорта Тверской биопрепарата ЖФБ (жидкофазный биопрепарат) и наночастиц оксида цинка в условиях лабораторного эксперимента.

ЖФБ (жидкофазный биопрепарат) был получен ферментацией торфонавоновой смеси с последующей экстракцией и представляет собой жидкость коричневого цвета с pH=7,5-8,5, содержащую агрономически полезные микроорганизмы (аммонифицирующие, амилолитические, фосфатомобилизующие и др.), макро- и микрэлементы и биологически активные вещества. Ранее ЖФБ был апробирован на различных сельскохозяйственных культурах, в том числе на овощных: огурцах, перце сладком и свекле столовой. Во всех случаях при использовании биопрепарата наблюдалось повышение продуктивности культур на 10-30% по сравнению с контрольными вариантами [13].

Объектом исследований был выбран лен-долгунец, так как его энергия прорастания и всхожесть напрямую зависят от количества микрэлементов (в том числе и цинка) в почве.

Также в полевых экспериментах было обнаружено, что предпосевная обработка семян льна наночастицами ZnO положительно влияет на энергию прорастания и всхожесть семян льна-долгунца, а также на некоторые биометрические параметры [14, 15].

Экспериментальная часть. Работа была выполнена во Всероссийском научно-исследовательском институте мелиорированных земель (ВНИИМЗ) — филиале ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева» в 2022 г.

Получение экстракта и биосинтез наночастиц ZnO. Наночастицы ZnO были синтезированы методом зеленого синтеза с использованием экстракта коммерчески доступного зеленого чая торговой марки «Принцесса Ява, Традиционный», производства ООО «НЕП» и раствора $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ концентрацией 0,5 моль/л. Для получения экстракта зеленый чай (100 г) был высыпан в кипящую дистиллированную воду (объем 2 л) и прокипячен в течение 30 минут. После охлаждения экстракт был отфильтрован через воронку Бюхнера. После этого для получения наночастиц ZnO экстракт был смешан с раствором сульфата цинка в объемном соотношении 1:4 (раствор соли:экстракт) и нагрет на кипящей водяной бане в течение 20 минут. В результате нагревания цвет раствора поменялся со светло-зеленого на желтый, и появился хлопьевидный осадок.

Получение биопрепарата ЖФБ-Зн. Зеленый чай, содержащий наночастицы ZnO, смешивали с готовым ЖФБ для усиления присущих ему полифункциональных свойств в объемном соотношении 1:50 (2 мл чая и 100 мл ЖФБ). Полученный ЖФБ-Зн, а также исходный ЖФБ были исследованы микробиологическим (методом предельных разведений) и биохимическим (определение каталазной и дегидрогеназной активностей) методами.

Лабораторное исследование полученного биопрепарата на семенах льна сорта Тверской. Для сравнительного изучения влияния полученного биопрепарата ЖФБ-Зн, а также исходного ЖФБ и наночастиц ZnO по отдельности на растительный организм был заложен модельный эксперимент с семенами льна сорта Тверской. Согласно данным Госреестра, данный сорт относится к среднеспелым. Растение средней высоты, стебель средней длины. Венчик цветка маленький. Точечность чашелистика отсутствует или очень слабая. Лепесток в стадии бутона сине-фиолетовый, при полном развитии синий. Продольная складчатость лепестка отсутствует. Нить тычинки у вершины синяя. Пыльник синеватый. Пестик у основания синий. Время начала цветения среднее. Коробочка маленькая, бахромчатость ложной перегородки отсутствует. Масса 1000 семян малая. Семена коричневые. В Северо-Западном регионе средняя урожайность льносоломы — 30,3 ц/га, семян — 4,1 ц/га. Содержание волокна — 27,8%, выход длинного волокна — 21,4%, относительная разрывная нагрузка расчетная — 15 г/текс. Вегетационный период 72 дня. Устойчивость к полеганию — 4,7, осыпанию — 4,4, засухе — 3,2 балла. Бактериозом и фузариозным увяданием поражался от слабой до средней степени, антракнозом — выше среднего (<https://gossortrf.ru/registry/gosudarstvennyy-reestr-seleksionnykh-dostizheniy-dopushchennykh-ki-ispolzovaniyu-tom-1-sorta-rasteni/tverskoy-lendolgunets/>).



В опыте использовали семена четвертой продукции, II категории по сортовой чистоте. Фитопатологическая оценка семян не проводилась, оценка качества определялась путем тщательного осмотра на предмет зараженности болезнями, с последующей калибровкой по размеру и массе. Перед непосредственным использованием семена льна дезинфицировали 1%-м раствором марганцовистого калия в течение 5 минут.

Прорашивание семян льна осуществлялось согласно ГОСТ 12038-84 в течение 7 суток в стеклянных чашках Петри на фильтровальной бумаге при температуре 22±1°C в темноте. В данном эксперименте было использовано 2 способа применения биопрепаратов: семена либо поливали готовыми биопрепаратами объемом 5 мл, либо предварительно замачивали перед посевом на 3 часа в растворах биопрепаратов. Концентрация препаратов варьировалась от 0,05 до 1,0%. В каждом варианте было предусмотрено 4 повторности (по 35 семян в каждой). Оценка эффективности биопрепаратов проводилась путем определения энергии прорастания семян, их всхожести, а также определения средней длины и средней массы одного проростка. В качестве контроля использовалась дистиллированная вода.

Статистическую обработку результатов осуществляли с использованием программы Microsoft Office Excel 2007. Данные в таблицах представлены в виде среднеарифметического значения плюс-минус доверительный интервал (объем выборки $n=140$).

Результаты и обсуждение. Изменение в процессе нагревания цвета раствора со светло-зеленого на желтый, а также выпадение хлопьевидного осадка свидетельствовали о формировании наночастиц ZnO. Подобные изменения наблюдались и в других работах. Например, в работе M. Nilavukkarasi с соавт. [16] в процессе синтеза наночастиц ZnO с использованием экстракта листьев растения *Capparis zeylanica* и раствора ацетата цинка концентрацией 0,2 моль/л наблюдали образование осадка светло-желтого цвета. В другой работе наночастицы ZnO были получены с использованием экстракта из листьев молочая (*Euphorbia hirta*) и нитрата цинка. При этом в процессе синтеза цвет раствора изменился с прозрачного на желтый, что свидетельствовало о формировании наночастиц [17].

Полученный биопрепарат ЖФБ-Зн и исходный ЖФБ были охарактеризованы микробиологическим и биохимическим методами. Результаты исследования обоих биопрепаратов показали (табл. 1), что добавление наночастиц ZnO не влияет на кислотность ЖФБ, которая остается на уровне 8,5-8,6. Также наночастицы ZnO не влияли на активность фермента каталазы, тогда как активность дегидрогеназы в ЖФБ-Зн снизилась в 1,4 раза по сравнению с исходным ЖФБ. Вероятно, это может быть связано с тем, что в дегидрогеназах цинк присутствует в качестве простетической группы в физиологически обусловленном количестве, поэтому перенасыщение этим металлом среди (ЖФБ) приводит к ингибированию его активности.

Наиболее существенно наночастицы ZnO влияли на микрофлору ЖФБ. Так, в биопрепарате ЖФБ-Зн количество аммонийфицирующих и амилолитических микроорганизмов снизилось в 4,5 и 13,7 раза соответственно по сравнению с ЖФБ. Такое снижение азоттрансформирующих

микроорганизмов связано с антибактериальной активностью наночастиц ZnO, механизм которой до сих пор остается спорным. С одной стороны, антибактериальная активность наночастиц ZnO может быть связана с их прямым взаимодействием с клеточными стенками, провоцирующим нарушение целостности бактериальной клетки, а также проникновение наночастиц внутрь клетки, что вызывает дисфункцию мембран. С другой стороны, причиной снижения количества микроорганизмов может быть высвобождение antimикробных ионов Zn²⁺, а также образование активных форм кислорода, которые также могут повредить бактериальную клетку [18].

Результаты исследования влияния биопрепаратов ЖФБ и ЖФБ-Зн, а также наночастиц ZnO (ZnO НЧ) на энергию прорастания, всхожесть и биометрические параметры проростков льнодолгунца представлены в таблицах 2 и 3. Важно отметить, что для получения рабочего раствора наночастиц ZnO экстракт чая, содержащий наночастицы ZnO, был разбавлен дистиллированной водой в объемном соотношении 1:50. Таким образом, концентрация наночастиц в вариантах ЖФБ-Зн и ZnO НЧ была одинаковой.

При поливе семян льна ЖФБ энергия прорастания не зависела от концентрации исследуемых биопрепаратов (табл. 2). Так, при использовании для полива семян льна исходного ЖФБ энергия их прорастания варьировалась от 76 до 89,5%, что было на 1-14% больше, чем при поливе водой (контроль). Значения энергии прорастания при использовании ЖФБ-Зн практически были равны данным в варианте с ЖФБ и составили 77-87%. Однако при использовании для полива семян наночастиц ZnO энергия их прорастания была практически равна, а в некоторых случаях ниже энергии прорастания в контроле и составила 69-80%.

Как и в случае с энергией прорастания, всхожесть семян при поливе не зависела от концентрации биопрепаратов (табл. 2). Так, при использовании исходного ЖФБ, а также ЖФБ-Зн всхожесть была на 1-8% больше, чем в контроле. Тогда как при поливе семян раствором, содержащим ZnO НЧ, всхожесть была либо ниже, либо практически равна контролюному значению.

Наиболее выраженное влияние совместного использования биопрепарата ЖФБ и наночастиц ZnO для полива было отмечено при исследовании средней длины одного проростка (табл. 2). Так, при использовании исходного ЖФБ средняя длина одного проростка составила 13-14 см, что было на 2-3 см больше, чем при поливе водой, тогда как в варианте ZnO НЧ средняя длина одного проростка была больше, чем на контроле на 1,5-3 см. Максимальные значения средней длины одного проростка 14-15 см были получены при поливе семян биопрепаратором ЖФБ-Зн в диапазоне концентраций от 0,05 до 0,7%. Однако при использовании 1%-го ЖФБ-Зн средняя длина одного проростка уменьшилась до 13 см, что, вероятно, связано с ингибированием роста растений, связанным с высокой концентрацией биопрепарата и наночастиц ZnO в нем. Таким образом, исходя из полученных данных можно говорить о синергетическом эффекте, возникающем между биопрепаратором ЖФБ и наночастицами ZnO, который проявляется в увеличении средней длины одного проростка при использовании ЖФБ-Зн по сравнению не только с контролем, но и с вариантами отдельного

применения каждого компонента. Однако ни один из исследуемых препаратов не повлиял на среднюю массу одного сырого проростка, которая в основном варьировалась от 52 до 61 мг. Несмотря на тот факт, что при использовании ЖФБ-Зн средняя длина одного проростка оказалась больше, чем в прочих вариантах, проростки в этом случае были довольно тонкие, за счет чего их средняя масса практически сравнялась с массой проростков в вариантах ЖФБ и ZnO НЧ.

При инокуляции семян льна исследуемыми биопрепаратами энергия прорастания и всхожесть (табл. 3) были ниже на 2%, чем при поливе. При этом, как и при поливе семян, оба этих параметра не зависели от концентрации биопрепаратов.

Так, при инокуляции семян ЖФБ концентрацией 0,1-1,0% энергия прорастания в основном была больше, чем на контроле на 6-8%. В то же время при замачивании семян в биопрепараторе ЖФБ-Зн в диапазоне концентраций от 0,1 до 1% энергия прорастания была больше по сравнению с контролем на 4-12%. В варианте с применением ZnO НЧ энергия прорастания была практически равна контролю за исключением максимальной концентрации 1%, при которой данный параметр был больше, чем на контроле на 6%.

Всхожесть семян льна при инокуляции (табл. 3) биопрепаратами ЖФБ и ЖФБ-Зн концентрацией 0,1-1% была выше, чем на контроле на 2-7% и на 2-9% соответственно, тогда как при использовании для замачивания только наночастиц ZnO значения всхожести семян оказались равны контролю. В отличие от полива инокуляция семян исследуемыми биопрепаратами практически не повлияла на среднюю длину одного проростка, которая во всех экспериментальных вариантах была больше, чем на контроле на 1-3 см (табл. 3). Кроме того, инокуляция биопрепаратами не повлияла на среднюю массу одного сырого проростка, которая практически во всех случаях была либо равна, либо на 3-8 мг была больше массы в контроле (табл. 3).

В целом, можно констатировать, что совместное использование биопрепарата ЖФБ и наночастиц ZnO положительно влияет на энергию прорастания и всхожесть семян льна как при их поливе, так и при инокуляции биопрепаратами различной концентрации. Кроме того, полив биопрепаратором ЖФБ-Зн положительно повлиял и на среднюю длину одного проростка. Также положительное влияние наночастиц ZnO концентрацией 1000 ppm на всхожесть арахиса, а также длину стебля и корня было отмечено в работе Т.Н. В.К.У. Prasad с соавт. Так, всхожесть семян увеличилась на 9 и 14% по сравнению с данными, полученными при использовании ZnSO₄ такой же концентрации и контролем. При этом максимальная длина побега (8,7 см) и корня (11,7 см) также были зафиксированы при использовании наноразмерного ZnO, тогда как в контроле длина побега и корня составили 3,1 и 5,0 см соответственно [19].

Однако не всегда наночастицы ZnO положительно влияют на всхожесть семян. Например, в работе [20] сравнили влияние наночастиц ZnO на всхожесть семян люцерны (*Medicago sativa*), огурца (*Cucumis sativus*) и томата (*Solanum lycopersicum*). В результате было обнаружено, что при концентрации наночастиц 1600 мг/л всхожесть огурцов увеличивалась на 10%, а всхожесть люцерны и томатов снижалась





Таблица 1. Характеристика биопрепаратов ЖФБ и ЖФБ-Зн
Table 1. Characteristics of biological products LPB and LPB-Zn

Био-препарат	рН	Численность микроорганизмов, *10 ¹⁰ КОЕ/мл		Активность катализы, смЗО2/г·мин	Активность дегидрогеназы, мг ТФФ/г·24 ч
		аммони-фицирующих	амило-литических		
ЖФБ	8,6	172,6	79,4	0,20	0,74
ЖФБ-Зн	8,5	38,1	5,8	0,22	0,54

Таблица 2. Результаты исследования при поливе семян льна биопрепаратами
Table 2. Results of the study when watering flax seeds with biological products

Вариант	Концентрация биопрепарата, %					
	0,05	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
Энергия прорастания семян, %						
Вода			75,0 ± 2,2			
ЖФБ	86,7 ± 2,1	76,4 ± 2,7	81,9 ± 1,9	82,1 ± 1,5	80,0 ± 0,8	89,5 ± 2,2
ЖФБ-Зн	77,1 ± 2,8	82,9 ± 5,6	84,3 ± 4,7	84,8 ± 3,2	87,1 ± 2,0	81,0 ± 3,2
ZnO НЧ	72,4 ± 4,3	70,5 ± 1,6	74,3 ± 1,9	69,5 ± 1,6	74,3 ± 2,8	80,0 ± 2,7
Всходость семян, %						
Вода			82,3 ± 1,4			
ЖФБ	90,5 ± 3,2	82,9 ± 4,0	88,6 ± 4,8	84,8 ± 1,6	84,3 ± 1,8	90,0 ± 0,4
ЖФБ-Зн	81,0 ± 4,3	85,0 ± 1,5	90,5 ± 0,3	89,5 ± 5,8	88,6 ± 0,6	83,8 ± 3,2
ZnO НЧ	80,7 ± 5,8	74,3 ± 2,8	80,0 ± 3,2	78,6 ± 2,0	81,9 ± 4,3	83,8 ± 2,2
Средняя длина одного проростка, см						
Вода			11,1 ± 0,2			
ЖФБ	13,2 ± 0,7	13,7 ± 0,9	13,5 ± 0,7	13,8 ± 0,8	13,5 ± 0,8	13,0 ± 0,7
ЖФБ-Зн	14,6 ± 0,6	14,9 ± 0,8	15,3 ± 1,2	14,3 ± 0,7	14,2 ± 0,6	13,2 ± 0,8
ZnO НЧ	14,0 ± 0,7	12,6 ± 0,7	12,9 ± 0,7	13,8 ± 0,7	13,8 ± 0,8	13,7 ± 0,7
Средняя масса одного проростка, мг						
Вода			51,6 ± 0,2			
ЖФБ	57,6 ± 0,7	55,8 ± 1,7	52,5 ± 2,4	61,1 ± 3,0	59,2 ± 2,2	60,2 ± 5,4
ЖФБ-Зн	56,5 ± 1,3	53,3 ± 4,4	55,9 ± 1,6	53,4 ± 2,0	55,6 ± 3,8	58,2 ± 5,2
ZnO НЧ	46,3 ± 2,7	52,8 ± 2,6	56,8 ± 1,7	59,5 ± 3,4	58,9 ± 4,0	55,4 ± 1,3

Таблица 3. Результаты исследования при инокуляции семян льна различными биопрепаратами
Table 3. Results of the study when inoculating flax seeds with various biological products

Вариант	Концентрация биопрепарата, %					
	0,05	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0
Энергия прорастания семян, %						
Вода			73,7 ± 2,1			
ЖФБ	71,4 ± 2,8	81,9 ± 1,8	79,3 ± 1,6	80,7 ± 2,7	80,0 ± 3,2	81,9 ± 1,6
ЖФБ-Зн	72,9 ± 2,0	77,1 ± 2,8	84,3 ± 2,8	85,7 ± 2,8	79,1 ± 0,8	80,0 ± 7,4
ZnO НЧ	73,4 ± 2,7	72,0 ± 2,8	74,3 ± 2,8	73,3 ± 3,2	73,5 ± 2,2	79,0 ± 1,6
Всходость семян, %						
Вода			79,3 ± 2,1			
ЖФБ	77,1 ± 4,8	81,9 ± 1,8	86,2 ± 1,6	83,6 ± 1,2	85,7 ± 2,8	86,7 ± 3,2
ЖФБ-Зн	74,3 ± 2,8	81,4 ± 2,0	88,6 ± 2,3	87,6 ± 3,2	81,9 ± 1,4	82,9 ± 1,4
ZnO НЧ	80,7 ± 2,7	75,7 ± 2,0	77,1 ± 0,2	78,1 ± 1,8	75,7 ± 1,8	80,7 ± 2,6
Средняя длина одного проростка, см						
Вода			12,2 ± 0,3			
ЖФБ	13,4 ± 0,8	13,7 ± 0,9	13,6 ± 0,6	14,4 ± 0,6	13,9 ± 0,7	14,8 ± 0,8
ЖФБ-Зн	14,0 ± 0,8	14,7 ± 1,6	13,9 ± 0,7	13,5 ± 0,7	13,1 ± 0,7	15,1 ± 0,6
ZnO НЧ	13,3 ± 0,8	13,0 ± 0,8	14,9 ± 0,7	15,5 ± 0,7	14,4 ± 0,8	13,4 ± 0,7
Средняя масса одного проростка, мг						
Вода			53,5 ± 1,6			
ЖФБ	54,6 ± 3,5	57,7 ± 4,7	60,1 ± 3,5	61,6 ± 3,0	59,7 ± 3,9	55,8 ± 5,0
ЖФБ-Зн	53,6 ± 2,3	56,3 ± 2,0	56,7 ± 1,5	57,5 ± 3,4	57,1 ± 2,4	55,6 ± 4,3
ZnO НЧ	54,1 ± 1,0	49,4 ± 4,6	53,2 ± 3,0	56,3 ± 1,6	55,1 ± 1,2	56,3 ± 4,4

на 40 и 20% соответственно по сравнению с контролем, тогда как при использовании Zn²⁺ концентрацией 250 г/л по сравнению с контролем снижалась только всхожесть томатов [20]. С другой стороны, обработка семян жемчужного проростка наночастицами ZnO (концентрация 200 ppm) повысила не только всхожесть семян на 17%, но и устойчивость растений к заболеваемости ложной мучнистой росой на 35% по сравнению с необработанным контролем. Кроме того, при использовании наноразмерного ZnO достоверно увеличилась высота растений, а также масса сухих и сухих проростков [21].

Заключение. В целом можно сказать, что совместное использование биопрепарата ЖФБ и наночастиц ZnO положительно влияет на энергию прорастания, всхожесть семян льна сорта Тверской, а также на среднюю длину одного проростка. Так, при поливе семян биопрепаратами ЖФБ и ЖФБ-Зн энергия прорастания и всхожесть семян были практически одинаковыми, но больше, чем в контроле на 1-14 и на 1-8%. Тогда как полив раствором, содержащим только наночастицы ZnO, никак не повлиял на оба этих параметра. При этом максимальная средняя длина одного проростка (14-15 см) была получена в варианте ЖФБ-Зн, что свидетельствовало о возникновении синергетического эффекта между двумя компонентами. Отсутствие различий в значениях энергии прорастания и всхожести семян между вариантами ЖФБ и ЖФБ-Зн можно объяснить снижением количества микроорганизмов в биопрепарата ЖФБ после введения в него наночастиц ZnO. Вероятно, что в данном случае наночастицы компенсируют недостаток микроорганизмов, стимулирующих прорастание семян, тем самым выравнивая значения энергии прорастания и всхожести семян.

При инокуляции семян льна в исследуемых биопрепаратах синергетический эффект при использовании ЖФБ-Зн, наоборот, был наиболее выражен при изучении энергии прорастания и всхожести семян, которые были больше не только контрольных значений на 4-12 и 2-9% соответственно, но и на 2% больше, чем энергия прорастания и всхожесть при замачивании в ЖФБ. При этом инокуляция семян в исследуемых препаратах не повлияла ни на среднюю длину, ни на среднюю массу одного проростка. Таким образом, с точки зрения энергии прорастания и всхожести семян, предпочтительнее использовать полив семян биопрепаратами. Однако необходимы дополнительные исследования по влиянию различных доз наночастиц ZnO на микробиологические свойства ЖФБ, а также по воздействию биопрепарата ЖФБ с различным количеством наночастиц ZnO на энергию прорастания, всхожесть и биометрические параметры льна-долгунца.

Список источников

- Иванищев В.В. Цинк в природе и его значение для растений // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2022. Вып. 2. С. 35-49.
- Mattielo, E.M., Neves, J.C. L., Ventrella, M.C., Araujo, W.L. (2015). Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. *Journal of Plant Physiology*, vol. 183, pp. 138-143.
- Munirah, N., Khairi, M., Nozulaidi, M., Jahan, M. (2015). The Effects of zinc application on physiology and production of corn plants. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 9 (2), pp. 362-367.



4. Sabir, S., Arshad, M., Chaudhari, S.K. (2014). Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications. *The Scientific World Journal*, Article ID 925494.
5. Rossi, L., Fedenia, L.N., Sharifan, H. et al. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica*L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 135, pp. 160-166.
6. Garza-Alonso, C.A., Juarez-Maldonado, A., Gonzalez-Morales, S. et al. (2023). ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Helyon*, vol. 9, p. e12787.
7. Umar, W., Hameed, M.K., Aziz, T. et al. (2021). Synthesis, characterization and application of ZnO nanoparticles for improved growth and Zn biofortification in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 67, pp. 1164-1176.
8. Tarafdar, J.C., Raliya, R., Mahawar, H. et al. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agric Res.*, vol. 3, pp. 257-262.
9. Кожемяков А.П., Лактионов Ю.В., Попова Т.А. и др. Агротехнологические основы создания усовершенствованных форм микробных биопрепаратов для земледелия // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 3. С. 369-376.
10. Муродова С.С., Давранов К.Д. Комплексные микробные препараты. Применение в сельскохозяйственной практике // *Biotechnology acta*. 2014. Т. 7. № 6. С. 92-101.
11. Петрова С.Н., Парахин Н.В. Микробные препараты как способ формирования эффективных растительно-микробных систем // Зернобобовые и крупяные культуры. 2013. № 2 (6). С. 86-91.
12. Arough, Y.K., Sharifi, R.S., Sharifi, R.S. (2016). Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, vol. 11:1, pp. 167-177.
13. Fomicheva, N., Rabinovich, G., Kashkova, A. (2023). The effect of the biopreparation of LPB on the yield of vegetable crops. *E3S Web of Conferences*, vol. 390, pp. 01016-01021.
14. Конова, А.М., Прудникова, А.Г., Гаврилова, А.Ю. Управление продуктивностью льна-долгунца путем обработки семян микроэлементами и нанопрепаратором // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 27-31.
15. Яблоков А.Г., Ольховская И.П., Крохмаль И.И. Ответная реакция семян льна на воздействие наночастиц железа и цинка // Современные тенденции развития технологий здоровьесбережения: сборник трудов Седьмой научной конференции с международным участием, Москва, 19 декабря 2019 г. М.: ФГБНУ ВИЛАР, 2019. Т. 12. С. 133-138.
16. Nilavukkarasia, M., Vijayakumar, S., Prathipkumar, S. (2020). Capparis zeylanicamediated bio-synthesized ZnO nanoparticles as antimicrobial, photocatalytic and anti-cancer applications. *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 3, pp. 335-343.
17. Ahmad, W., Kalra, D. (2020). Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of ZnO nanoparticles using Euphorbia hirta leaf extract. *Journal of King Saud University — Science*, vol. 32, pp. 2358-2364.
18. Ali, A., Phull, A.-R., Zia, M. (2018). Elemental zinc to zinc nanoparticles: is ZnO NPs crucial for life? Synthesis, toxicological, and environmental concerns. *Nanotechnol Rev.*, vol. 7 (5), pp. 413-441.
19. Prasad, T.N. V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y. et al. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 35:6, pp. 905-927.
20. De la Rosa G., López-Moreno, M.L., de Haro, D. et al. (2013). Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: Root development and X-ray absorption spectroscopy studies. *Pure Appl. Chem.*, vol. 85, no. 12, pp. 2161-2174.
21. Nandhini, M., Rajini, S.B., Udayashankar, A.C. et al. (2019). Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. *Crop Protection*, vol. 121, pp. 103-112.
- References**
1. Ivanishchev, V.V. (2022). Tsink v prirode i ego znachenie dlya rastenii [Zinc in nature and its importance for plants]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle* [News of the Tula State University. Sciences of Earth], issue 2, pp. 35-49.
 2. Mattiello, E.M., Neves, J.C. L., Ventrella, M.C., Araujo, W.L. (2015). Zinc deficiency affects physiological and anatomical characteristics in maize leaves. *Journal of Plant Physiology*, vol. 183, pp. 138-143.
 3. Munirah, N., Khairi, M., Nozulaidi, M., Jahan, M. (2015). The Effects of zinc application on physiology and production of corn plants. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 9 (2), pp. 362-367.
 4. Sabir, S., Arshad, M., Chaudhari, S.K. (2014). Zinc oxide nanoparticles for revolutionizing agriculture: synthesis and applications. *The Scientific World Journal*, Article ID 925494.
 5. Rossi, L., Fedenia, L.N., Sharifan, H. et al. (2019). Effects of foliar application of zinc sulfate and zinc nanoparticles in coffee (*Coffea arabica*L.) plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 135, pp. 160-166.
 6. Garza-Alonso, C.A., Juarez-Maldonado, A., Gonzalez-Morales, S. et al. (2023). ZnO nanoparticles as potential fertilizer and biostimulant for lettuce. *Helyon*, vol. 9, p. e12787.
 7. Umar, W., Hameed, M.K., Aziz, T. et al. (2021). Synthesis, characterization and application of ZnO nanoparticles for improved growth and Zn biofortification in maize. *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 67, pp. 1164-1176.
 8. Tarafdar, J.C., Raliya, R., Mahawar, H. et al. (2014). Development of zinc nanofertilizer to enhance crop production in pearl millet (*Pennisetum americanum*). *Agric Res.*, vol. 3, pp. 257-262.
 9. Кожемяков, А.П., Лактионов, Ю.В., Попова, Т.А. и др. Агротехнологические основы создания усовершенствованных форм микробных биопрепаратов для земледелия // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. № 3. С. 369-376.
 10. Муродова, С.С., Давранов, К.Д. Комплексные микробные препараты. Применение в сельскохозяйственной практике // *Biotechnology acta*. 2014. Т. 7. № 6. С. 92-101.
 11. Петрова, С.Н., Парахин, Н.В. Микробные препараты как способ формирования эффективных растительно-микробных систем // Зернобобовые и крупяные культуры. 2013. № 2 (6). С. 86-91.
 12. Arough, Y.K., Sharifi, R.S., Sharifi, R.S. (2016). Bio fertilizers and zinc effects on some physiological parameters of triticale under water-limitation condition. *Journal of Plant Interactions*, vol. 11:1, pp. 167-177.
 13. Fomicheva, N., Rabinovich, G., Kashkova, A. (2023). The effect of the biopreparation of LPB on the yield of vegetable crops. *E3S Web of Conferences*, vol. 390, pp. 01016-01021.
 14. Конова, А.М., Прудникова, А.Г., Гаврилова, А.Ю. Управление продуктивностью льна-долгунца путем обработки семян микроэлементами и нанопрепаратором // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 27-31.
 15. Яблоков А.Г., Ольховская И.П., Крохмаль И.И. Ответная реакция семян льна на воздействие наночастиц железа и цинка // Современные тенденции развития технологий здоровьесбережения: сборник трудов Седьмой научной конференции с международным участием, Москва, 19 декабря 2019 г. М.: ФГБНУ ВИЛАР, 2019. Т. 12. С. 133-138.
 16. Nilavukkarasia, M., Vijayakumar, S., Prathipkumar, S. (2020). Capparis zeylanicamediated bio-synthesized ZnO nanoparticles as antimicrobial, photocatalytic and anti-cancer applications. *Materials Science for Energy Technologies*, vol. 3, pp. 335-343.
 17. Ahmad, W., Kalra, D. (2020). Green synthesis, characterization and antimicrobial activities of ZnO nanoparticles using Euphorbia hirta leaf extract. *Journal of King Saud University — Science*, vol. 32, pp. 2358-2364.
 18. Ali, A., Phull, A.-R., Zia, M. (2018). Elemental zinc to zinc nanoparticles: is ZnO NPs crucial for life? Synthesis, toxicological, and environmental concerns. *Nanotechnol Rev.*, vol. 7 (5), pp. 413-441.
 19. Prasad, T.N. V.K.V., Sudhakar, P., Sreenivasulu, Y. et al. (2012). Effect of nanoscale zinc oxide particles on the germination, growth and yield of peanut. *Journal of Plant Nutrition*, vol. 35:6, pp. 905-927.
 20. De la Rosa G., López-Moreno, M.L., de Haro, D. et al. (2013). Effects of ZnO nanoparticles in alfalfa, tomato, and cucumber at the germination stage: Root development and X-ray absorption spectroscopy studies. *Pure Appl. Chem.*, vol. 85, no. 12, pp. 2161-2174.
 21. Nandhini, M., Rajini, S.B., Udayashankar, A.C. et al. (2019). Biofabricated zinc oxide nanoparticles as an eco-friendly alternative for growth promotion and management of downy mildew of pearl millet. *Crop Protection*, vol. 121, pp. 103-112.

Информация об авторах:

Любимова Надежда Андреевна, кандидат химических наук, научный сотрудник, ВНИИМЗ — филиал ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева»,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5000>, n.nemygina@gmail.com

Рабинович Галина Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, заведующий отделом биотехнологий, ВНИИМЗ — филиал ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева», ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5060-6241>, 2016vniimz-noo@list.ru

Information about the authors:

Nadezhda A. Lyubimova, candidate of chemical sciences, researcher, VNIIIMZ — branch of Federal Research Centre Dokuchaev Soil Science Institute, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5831-5000>, n.nemygina@gmail.com

Galina Yu. Rabinovich, doctor of biological science, professor, head of the department of biotechnology, VNIIIMZ — branch of Federal Research Centre Dokuchaev Soil Science Institute, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5060-6241>, 2016vniimz-noo@list.ru

 n.nemygina@gmail.com

