

УДК 635.037:635.075

УЛУЧШЕНИЕ МОРФОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РАСТЕНИЯ ПЕРЦА ПРИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКЕ СЕМЯН НАНОЧАСТИЦАМИ ЦИНКА

© 2024 г. И. П. Ольховская¹, И. И. Крохмаль^{1,2}, Н. Н. Глушенко^{1*}

¹Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия

²Государственное автономное учреждение культуры города Москвы “Парк Зарядье”, Москва, Россия

*E-mail: nnglu@mail.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023

После доработки 05.06.2023

Принята к публикации 20.06.2023

Передовые нанотехнологии, позволяющие синтезировать наночастицы (НЧ) с заданными физико-химическими свойствами, предоставляют возможность изучения эффектов и механизмов воздействия НЧ на растения с целью повышения их продуктивности. В этом исследовании НЧ цинка в составе полимерного покрытия на основе карбоксиметилцеллюлозы и полиэтиленгликоля были использованы в качестве препарата для предпосевной обработки семян перца. Установлено, что НЧ цинка в концентрациях 10^{-5} % и 10^{-6} % в составе полимеров ускоряют рост растений, приводят к достоверному увеличению количества листьев, бутонов, объема корневой массы в среднем на 10–30% по сравнению с контрольными растениями. При этом в листьях растений при обработке семян НЧ цинка в концентрации 10^{-6} % наблюдается увеличение содержания пролина на 58% ($p \leq 0.05$), белка – на 20% ($p \leq 0.05$). При обработке семян наночастицами цинка в концентрации 10^{-5} % содержание сахара повышается на 36% ($p \leq 0.05$), хлорофилла – на 52% ($p \leq 0.05$) по сравнению с контролем.

Ключевые слова: наночастицы цинка, морфометрические показатели, хлорофилл А и В, общий, белок, пролин, сахар.

DOI: 10.31857/S0207401X24040115 EDN: VDYWRO

ВВЕДЕНИЕ

Современные нанотехнологии все шире используются в различных направлениях растениеводства [1–3]. Одним из важных микроэлементов в жизнедеятельности растений является цинк. Показано, что наночастицы (НЧ) цинка влияют на прорастание семян [4, 5], стимулируют рост растений, увеличивают площадь листьев, сухую массу и урожайность кукурузы, а также биомассу корней люцерны, томатов, огурцов [6, 7]. Механизм взаимодействия НЧ с растительными клетками не совсем ясен. В частности, процессы проникновения и накопления наночастиц, биохимические и физические барьеры, предотвращающие попадание наночастиц в растительную клетку, трансформация наночастиц в растительной ткани и другие вопросы остаются без ответа. Понятно одно, что НЧ являются источником ионов металлов, которые связываются с биолигандами и бел-

ками-переносчиками и активно участвуют в метаболизме.

Эффективность действия НЧ цинка при стимуляции роста и развития у всех растений разная и зависит от концентрации металла. Особенно важным свойством НЧ цинка является их способность защищать различные растения от воздействия абиотических факторов среды, фитопатологий и вирусных инфекций через механизмы регуляции метаболизма, повышения скорости генерации адезинтрифосфата, антиоксидантной защиты [8–10]. При использовании НЧ цинка в качестве удобрения есть опасения их влияния на компоненты почвы и микробиом, а впоследствии – и на структуру растений. Токсическое воздействие наночастиц цинка оксида на растения и микробы может быть обусловлено различными механизмами, включая образование активных форм кислорода, дестабилизацию лизосом и

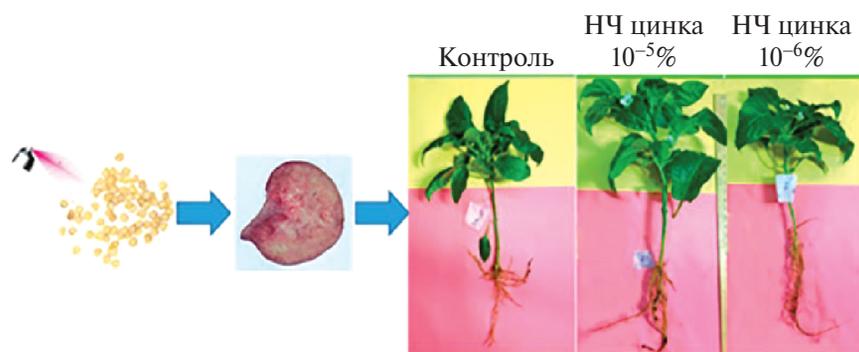


Рис. 1. Схема проведения опыта.

повреждение ДНК. Это свойство наночастиц оксида цинка широко используется в пищевой промышленности при производстве упаковок. Включение наночастиц оксида цинка в системы доставки пищевых/кормовых биоактивных ингредиентов способствует повышению качества и безвредности продуктов питания, сохранности и безвредности продуктов питания [11]. В связи с этим, введение НЧ цинка в состав биопрепарата для питания растений является перспективным.

Для решения вопроса безопасности НЧ цинка в качестве удобрения предложены несколько вариантов: внекорневая подкормка, биокультивирование посадочного материала в асептических условиях и введение НЧ в покрытие для семян [12–14]. В работе рассматривается вариант предпосевной обработки семян НЧ цинка в составе полимерного покрытия. На наш взгляд, такой подход позволяет обеспечить индивидуальную доставку элемента каждому растению и экологическую безопасность.

Цель настоящего исследования – выяснение биологических последствий обработки семян наночастицами цинка в составе полимеров на морфофизиологические показатели растений перца в вегетативный период.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

Наночастицы цинка были получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 [15]. Исследование физико-химических характеристик НЧ цинка было проведено сотрудниками Лаборатории нано- и микроструктурного материаловедения ИНЭПХФ РАН.

Объектом исследования была выбрана культура растения перца *Capsicum annuum* L., сорта Задира.

Для проведения предпосевной обработки семян перца была использована композиция на основе Na-карбоксиметилцеллюлозы и полиэтиленгликоля-400, в которую вводили суспензию наночастиц металлов в нужной концентрации. Подготовку биопрепаратов проводили по схеме, описанной в работе [14]. Далее семена обрабатывали полимером с НЧ цинка. Схема опытов представлена на рис. 1.

Для выращивания растений в подготовленные ящики с почвой раскладывали по 5 шт семян. Ящики помещали на стеллажи с контролируемым постоянным режимом: температура – 22–25 °С, влажность – 36%, освещенность – 3500–3000 люкс в режиме свет/темнота 12/12 ч/сут. Через 15 сут проверяли всхожесть семян. Через 60 сут роста и развития растений в фазе цветения оценивали следующие морфометрические показатели: высоту растений, количество листьев, длину и ширину корней, количество бутонов, сырую массу надземной части растений и корней, а также следующие биохимические показатели: содержание белка, пролина, сахара, хлорофилла А, В и общего в листьях перца.

Содержание белка в листьях определяли методом Лоури [16]. В качестве стандарта использовали бычий сывороточный альбумин [16]. Свежий растительный материал (0.5 г) растирали в фарфоровой ступке с 2 мл с концентрацией фосфатного буфера 0.2 моль/л (рН 8.0). Гомогенат заливали 10 мл холодного раствора 5.0%-ной трихлоруксусной кислоты, перемешивали и помещали на 20 мин в холодильник. Далее осаждали белок центрифугированием при скорости вращения $V = 6000$ об./мин в течение 15 мин. После центрифугирования надосадочную жидкость сливали. Осадок промывали охлажденным 96%-ным этанолом до полного исчезновения зеленой окраски

надосадочной жидкости. После повторного центрифугирования к промытому осадку добавляли 2 мл раствора 0.5 н NaOH. Пробирки помещали на кипящую баню на 5 мин, приливали еще 5 мл раствора 0.5 н NaOH, перемешивали и центрифугировали в течение 10 мин при $V = 6000$ об./мин. Надосадочную жидкость переносили в мерный стакан и измеряли общий объем щелочного гидролизата. К 1 мл щелочного гидролизата добавляли 5 мл смеси растворов (50 частей 2%-ного Na_2CO_3 в 0.1 н NaOH + 1 часть 0.5%-ной $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ в 1.0%-ном растворе виннокислого калия $V =$ натрия) и 0.5 мл реактива Фолина. Оптическую плотность белка измеряли при длине волны $\lambda = 750$ нм.

Содержание хлорофилла в свежих листьях растений определяли при 50%-ном цветении. Оценку содержания хлорофилла проводили методами Arnon [17] и Kirh [18]. К 1 мл гомогената растертых листьев добавляли 4 мл 80%-ного (по объему) ацетона и давали постоять в темноте при комнатной температуре в течение 10 мин. Далее центрифугировали при $V = 2000$ об./мин в течение 5 мин. Супернатант использовали для определения хлорофилла методом спектрофотометрии. Оптическую плотность хлорофилла А определяли при $\lambda = 645$ нм, хлорофилла В – при $\lambda = 663$ нм на спектрофотометре Hitachi U-3900 компании Hitachi (Japan). Концентрацию хлорофиллов рассчитывали по уравнениям для 80%-ного ацетона (по Вернону): $C_{\text{хл.А}} = 11.63D_{663} - 2.39D_{645}$; $C_{\text{хл.В}} = 20.11D_{645} - 5.18D_{663}$; $C_{\text{хл.А} + \text{хл.В}} = 6.45D_{663} + 17.7D_{645}$, где C – концентрация хлорофилла, D – значение оптической плотности при данной длине волны.

Содержание сахара в листьях перца на стадии цветения оценивали по методу Dubo et al. [19], модифицированному Johnson et al. [20]. Свежий растительный материал (0.5 г) гомогенизировали с 10 мл дистиллированной воды. Далее центрифугировали при $V = 3000$ об./мин в течение 5 мин. Затем к 0.1 мл надосадочной жидкости добавляли 1.5 мл фенола. После 1 ч инкубации при комнатной температуре добавляли 5 мл концентрированной H_2SO_4 . Поглощение каждого образца регистрировали при $\lambda = 420$ нм. Концентрацию определяли по калибровочной кривой.

Содержание пролина определяли с помощью нингидринового реактива (1.25 г нингидрина + + 30 мл ледяной уксусной кислоты + 20 мл 6 М

H_3PO_4) по методу, описанному в работе [21]. Навеску листовой пластики (200 мг) заливали 5–20 мл кипящей дистиллированной воды и выдерживали в течение 10 мин на водяной бане при температуре 100 °С. В чистую пробирку заливали 2 мл ледяной уксусной кислоты, 2 мл нингидринового реактива и 2 мл приготовленного экстракта. Пробы инкубировали в течение 20 мин на водяной бане при температуре 100 °С, охлаждали при комнатной температуре и измеряли оптическую плотность при $\lambda = 520$ нм на спектрофотометре компании Hitachi U-3900 (Japan). Содержание пролина рассчитывали с помощью калибровочной кривой, используя для построения химически чистый пролин производства компании Sigma-Aldrich (USA).

Статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 20 (“StatSoft, Inc.”, USA). Определяли средние значения изучаемых показателей (M) и стандартные ошибки среднего ($\pm SEM$). Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (t -критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при доверительной вероятности $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Современное развитие нанотехнологий открывает новые перспективы в совершенствовании способов выращивания овощных культур [1–3]. Один из путей получения высоких урожаев – использование высококачественного посадочного материала, который растят в асептических условиях на питательных средах с наночастицами металлов-микроэлементов вместо солей [13].

Другим вариантом использования нанотехнологий является предпосевная обработка семян наночастицами микроэлементов в составе полимерного покрытия. Идея такой обработки семян связана, во-первых, с необходимостью обеспечения каждого растения микроэлементами, а во-вторых, с предупреждением загрязнения почвы наночастицами, которые в силу своей высокой реакционной способности могут оказывать отрицательное воздействие на химический состав почвы и почвенный микробиом [22].

Используемые НЧ цинка представляют собой монокристаллические структуры круглой

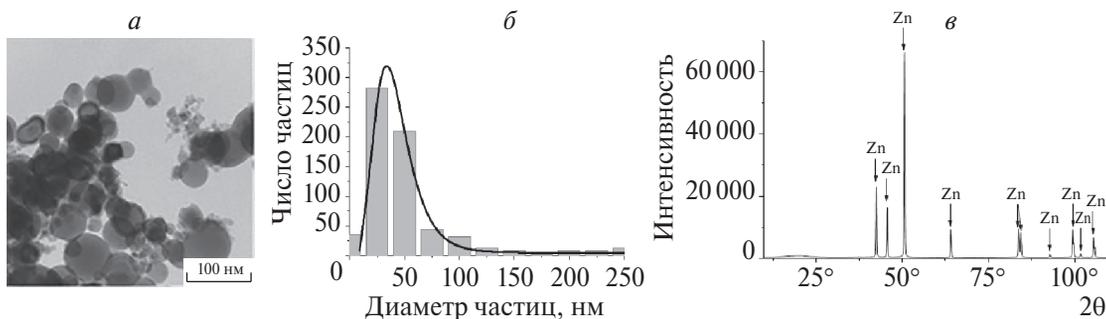


Рис. 2. Физико-химические характеристики наночастиц цинка: *a* – изображение НЧ цинка, полученное методом просвечивающей электронной микроскопии; *б* – кривая распределения НЧ по размерам; *в* – рентенограмма НЧ.

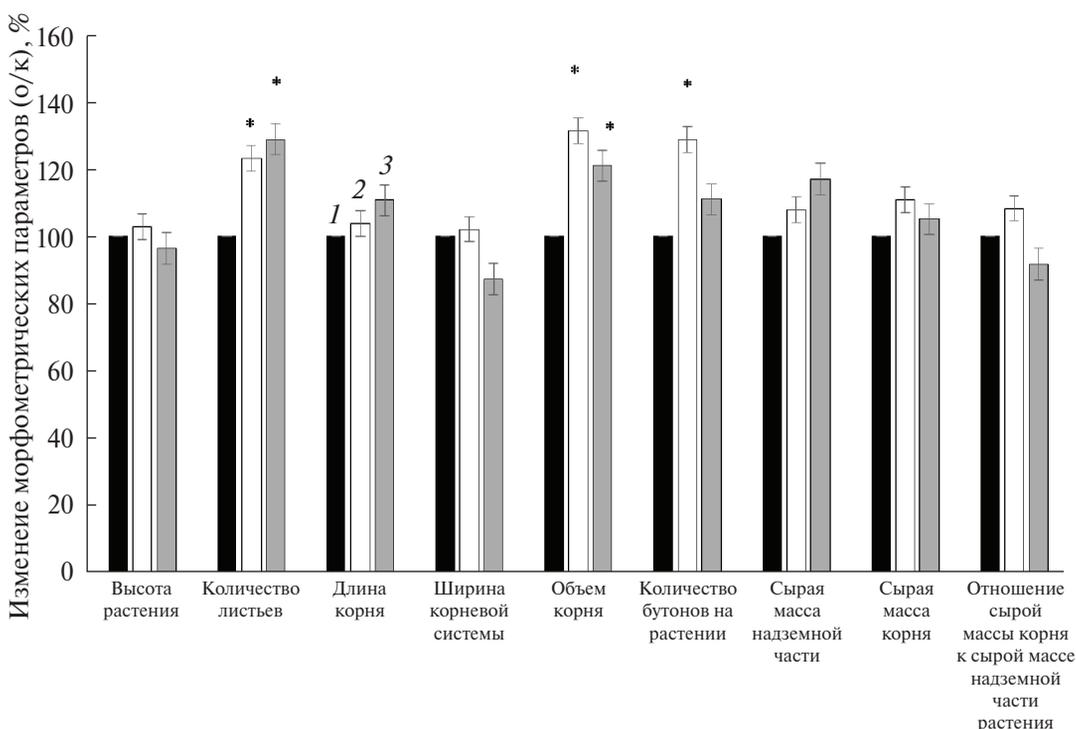


Рис. 3. Изменение морфометрических показателей растений перца, выращенных из семян, обработанных препаратом с наночастицами цинка: 1 – контроль (необработанные семена); 2 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-5}\%$; 3 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-6}\%$; * – достоверность изменений по критерию Стьюдента $p \leq 0.05$.

правильной формы. Кривая распределения наночастиц цинка лежит в области размеров в области 0–250 нм. Средний диаметр полученных частиц цинка составляет (60.6 ± 3.7) нм. Оксидных фаз методом рентгенофазового анализа не обнаружено не было (рис. 2).

Для оценки влияния предпосевной обработки семян перца препаратами с НЧ цинка на продуктивность растений были измерены морфометрические показатели, представленные на рис. 3. Видно, что предпосевная обработка семян перца наночастицами цинка в концентрациях $10^{-5}\%$ и $10^{-6}\%$ в составе полимеров приводит к увеличе-

нию длины корней, сырой массы надземной части растений, к достоверному увеличению количества листьев и бутонов, объема корневой массы в среднем на 10–30% по сравнению с контрольными образцами – растениями, выращенными из семян, необработанных препаратами. Активное влияние НЧ цинка на вегетативный рост растений наблюдали и другие авторы. Так, при обработке семян канолы сортов *Faisal canola* и *Shiralee* опрыскиванием суспензией, содержащей наночастицы цинка в концентрации 15 мг/л, наблюдали увеличение числа побегов у *Faisal canola* на

25% и у *Shiralee* на 29% по сравнению с необработанными контрольными растениями [12].

Ранее сообщалось о положительном влиянии НЧ цинка на рост других видов растений, что подтверждает наши выводы. Показано, что внекорневая подкормка растений наночастицами цинка увеличивает высоту побегов, длину и массу корней проса [23], биомассу корней и побегов маша, кукурузы и подсолнечника [6, 24, 25], стимулирует рост лука, нута, арахиса [26–28].

Помимо влияния наночастиц цинка на морфометрические показатели, предпосевная обработка семян перца способствует изменениям физиологической реакции растений на воздействие НЧ. Хлорофилл и каротиноиды играют незаметную роль в процессе фотосинтеза, определяя фотосинтетическую способность растений. Содержание хлорофилла и каротиноидов может изменяться в зависимости от условий роста, состояния, здоровья и различных факторов окружающей среды [29]. При изучении влияния НЧ цинка на содержание пигментов листьев канолы [12], арахиса [28], томатов [13], фасоли [30], кинзы [31] установлена положительная тенденция в изменении содержания пигментов. Следует отметить, что эти эффекты являются дозозависимыми: в больших концентрациях, вплоть до 400 мг/л, обработка наночастицами цинка приводит к фитотоксическому действию [32].

На рис. 4 представлены данные по влиянию предпосевной обработки наночастицами цинка в составе полимеров на изменение содержания фотосинтетических пигментов листьев перца. Видно, что предпосевная обработка семян перца наночастицами цинка в составе полимеров в концентрации $10^{-5}\%$ приводит к увеличению хлорофилла А на 19,5%, хлорофилла В – на 44%, общего хлорофилла – на 25% по сравнению с контрольными образцами. Предпосевная обработка семян перца НЧ цинка в составе полимеров в концентрации $10^{-6}\%$ приводит к снижению содержания хлорофилла А на 55% и к достоверному увеличению хлорофилла В на 44%. Положительное воздействие препаратов цинка в концентрации $15 \cdot 10^{-3}\%$ на содержание фотосинтезирующих пигментов (хлорофилла А – на 47–50%, хлорофилла на В – на 46–54%) при обработке семян канолы наблюдали и другие исследователи [12].

Изменение концентрации пролина, растворимых белков и сахаров в листьях перца, выращенных

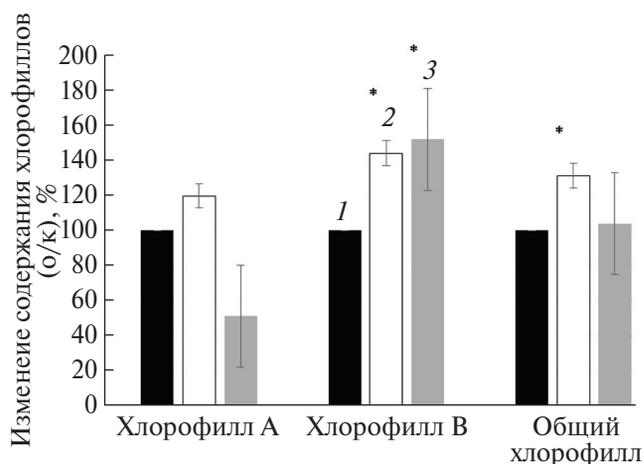


Рис. 4. Изменение содержания хлорофилла А, хлорофилла В и общего хлорофилла в листьях перца после предпосевной обработки семян наночастицами цинка в составе полимеров: 1 – контроль (необработанные семена); 2 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-5}\%$; 3 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-6}\%$; * – достоверность изменений по критерию Стьюдента $p < 0.05$.

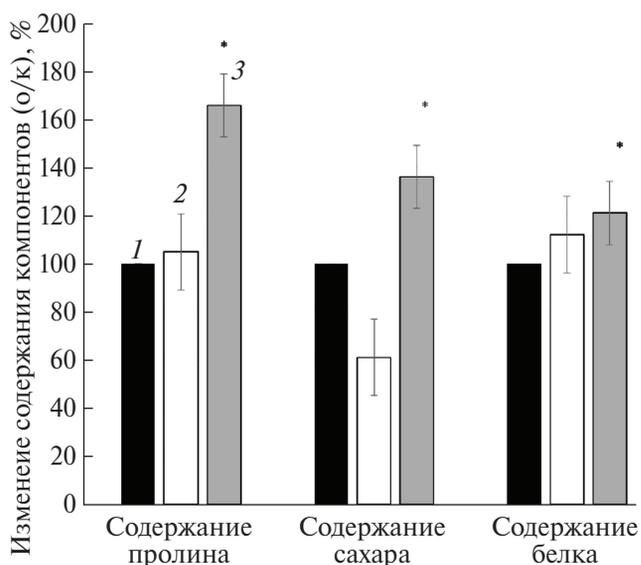


Рис. 5. Изменение содержание пролина, растворимых сахаров и белка в листьях растения перца после предпосевной обработки семян наночастицами цинка в составе полимеров: 1 – контроль (необработанные семена); 2 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-5}\%$; 3 – предпосевная обработка семян НЧ цинка в концентрации $10^{-6}\%$; * – достоверность изменений по критерию Стьюдента $p < 0.05$.

из семян, обработанных НЧ цинка представлены на рис. 5. Предпосевная обработка семян препаратами с НЧ Zn в концентрациях $10^{-5}\%$ и $10^{-6}\%$ приводит к увеличению содержания пролина в листьях перца соответственно на 4% и 58% ($p < 0.05$) по сравнению с контрольными

растениями. Содержание сахара достоверно увеличивается на 36% в листьях при обработке семян НЧ цинка в концентрации $10^{-5}\%$. Содержание белка в листьях перца увеличивается на 12 и 20% ($p \leq 0.05$) при обработке семян НЧ цинка соответственно в концентрациях $10^{-5}\%$ и $10^{-6}\%$ по сравнению с контрольными растениями. Однако наблюдаемые морфофизиологические показатели растения перца далеки от объяснения механизмов воздействия НЧ цинка. В этом отношении особое место занимает исследование авторов по оценке протеома и скорости экспрессии гена при обработке семян НЧ цинка. Протеомный анализ и анализ экспрессии генов листьев растений, семена которых были обработаны НЧ цинка, показал, что НЧ обладают способностью влиять на уровни белка и транскрипцию генов, что может объяснить причину изменения морфологических и физиологических параметров [12]. Отсутствие достаточного экспериментального материала, ограниченное число публикаций об участии наночастиц цинка в экспрессии генов, связанных с ростом и продуцированием, не позволяет понять молекулярную роль этих НЧ в физиологических процессах растений. Работы в этом направлении будут продолжены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование передовых технологий в растениеводстве позволит решить важнейшую продовольственную проблему. Предложено проводить предпосевную обработку семян перца наночастицами цинка в составе полимерного покрытия. Такой способ позволит обеспечить жизненно необходимым микроэлементом каждое растение и обезопасить почву от загрязнения наночастицами. Проведенные исследования свидетельствуют об улучшении морфометрических показателей растения перца в вегетативный период, а также о повышении содержания фотосенсибилизирующих пигментов, белка, пролина, сахара в листьях растений. Такие изменения морфофизиологических параметров растений являются предпосылкой для увеличения урожайности перца.

Исследование было поддержано грантом Российского научного фонда № 22-26-00109.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siddiqi K.S., Husen A. // Crit Rev Biotechnol. 2022. V. 42. № 7. P. 973.
<https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1975091>
2. Aqeel U., Aftab T., Khan M.M.A. et al. // Chemosphere. 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132672>
3. Калинина И.Г., Иванов В.Б., Семенов С.А. и др. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 6. С. 71.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21060054>
4. De la Rosa G., Lopez-Moreno M. L., de Haro D. et al. // Pure Appl. Chem. 2013. V. 85. P. 2161.
<https://doi.org/10.1351/pac-con-12-09-05>
5. Meena D.S., Jayadeva H.M., Gautam C. et al. // Intern. J. Plant Soil Sci. 2017. V. 16. P. 1.
<https://doi.org/10.9734/ijpss/2017/33687>
6. Taheri M., Qarache H.A., Qarache A.A. et al. // STEM Fellowship J. 2016. V. 1. P. 17.
<https://doi.org/10.17975/sfj-2015-011>
7. Sofy A.R., Sofy M.R., Hmed A.A. et al. // Molecules. 2021. V. 26. № 5. P. 1337.
<https://doi.org/10.3390/molecules26051337>
8. Yasmin H., Mazher J., Azmat A. et al. // Ecotoxicol Environ Saf. 2021. V. 218. P. 112.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112262>
9. Faizan M., Bhat J.A., Chen C. et al. // Plant Physiol Biochem. 2021. V. 161. P. 122.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.002>
10. Базунова М.В., Мустакимов Р.А., Кулиш Е.И. // Хим. физика. 2021. Т. 40. № 9. С. 72.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21090028>
11. Sheteiwy M.S., Shaghaleh H., Hamoud Y.A. et al. // Environ. Sci. Pollut. Res Intern. 2021. V. 28. № 28: P. 36942.
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14542-w>
12. Sohail, Sawati L., Ferrari E. et al. // Front. Plant. Sci. 2022. V. 25. № 13. P. 798751.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.798751>
13. Chen Yu, Lu Jinying, Liu Min. et al. // IET Nanobiotechnol. 2020. V. 14. № 5. P. 382.
<https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.01832>
14. Yurina T.A., Drobin G.V., Bogoslovskaya O.A. et al. // Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya. 2021. V. 56. № 1. P. 135.
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.135eng>
15. Leipunsky, I.O., Zhigach, A.N., Kuskov, M.L. et al. // J. Alloys. Compd. 2018. V. 778. P. 271.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
16. Lowery O.H., Rosenbrough N.J., Farr A.L. et al. // J. Biol. Chem. 1951. V. 27. P. 265.
17. Arnon D.J. // Plant Physiol. 1949. V. 24. P. 1.
18. Kirch J.T.O. // Planta. 1968. V. 78. P. 200.
19. Dubo S.M., Giles K.A., Hmlilton J.K. et al. // Anal. Chem. 1956. V. 28. P. 350.
20. Johnson R.P., Balwani T.L., Johnson L.J. et al. // Anim. Sci. 1966. V. 25. P. 617.
21. Bates L.S. // Plant Soil. 1973. V. 39. P. 205.
22. Afzal S., Singh N.K. // Environ Pollut. 2022. V. 314. P. 120224.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120224>

23. *Tarafdar J.C., Raliya R., Mahawar H. et al.* // *Agric. Res.* 2014. V. 3. P. 257.
<https://doi.org/10.1007/s40003-014-0113>
24. *Dhoke S.K., Mahajan P., Kamble R. et al.* // *Nanotechnol. Dev.* 2013. V. 3. P. 111.
25. *Torabian S., Zahedi M., Khoshgoftar A.H.* // *J. Plant Nutr.* 2016. V. 39. P. 172.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1009107>
26. *Laware S.L., Raskar S.* // *Intern. J. Curr. Microbiol. Sci.* 2014. V. 3. P. 874.
27. Жуков А.М., Солодилов В.И., Третьяков И.В. и др. // *Хим. физика.* 2022. Т. 41. № 9. С. 64.
<https://doi.org/10.31857/S0207401X22090138>
28. *Prasad R., Kumar V., Prasad K.S.* // *Afr. J. Biotechnol.* 2014. V. 13. P. 705.
<https://doi.org/10.5897/ajbx2013.13554>
29. *Pinto F., Celesti M., Acebron K.* // *Plant Cell Environ.* 2020. V. 43. P. 1637.
<https://doi.org/10.1111/pce.13754>
30. *Raliya R., Tarafdar J.C.* // *Agric. Res.* 2013. V. 2. P. 48.
31. *Reddy Pullagurala V.L., Adisa I.O., Rawat S.* // *Plant Physiol. Biochem.* 2018. V. 132. P. 120.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.037>
32. *Wang X., Yang X., Chen S. et al.* // *Front. Plant Sci.* 2016. V. 6. P. 1243.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01243>

IMPROVEMENT OF MORPHOPHYSIOLOGICAL PARAMETERS OF PEPPER AFTER THE SEED PRE-SOWING TREATMENT WITH ZINC NANOPARTICLES

I. P. Olkhovskaya^a, I. I. Krokmal^{a, b}, N.N. Glushchenko^{a*}

¹*Semenov Federal Research Center for Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*State Autonomous Cultural Institution of the City of Moscow "Zaryadye Park", Moscow, Russia*

*E-mail: nnglu@mail.ru

Advanced nanotechnologies allow synthesizing nanoparticles (NPs) with given physical and chemical properties providing an opportunity to study the effects and mechanisms of NPs influence on plants in order to improve their productivity. In this study, Zn NPs introduced in the polymer coating were used as a preparation for pepper seeds pre-sowing treatment. It was found that Zn NPs in concentrations of 10⁻⁵% and 10⁻⁶% in polymers accelerated plant growth and led to a significant increase in the number of leaves and buds, root mass volume being increased by an average of 10–30% compared to the control. After seed treatment with 10⁻⁶% Zn NPs the increase of proline content in plant leaves grew by 58% ($p \leq 0.05$), protein content by 20% ($p \leq 0.05$); treatment of seeds with Zn HPs at 10⁻⁵% concentration led to sugar content enlargement by 36% ($p \leq 0.05$), chlorophyll by 52% ($p \leq 0.05$) as compared with control.

Keywords: zinc nanoparticles, morphometric parameters, chlorophyll A, B, total, protein, proline, sugar.

REFERENCES

1. K.S. Siddiqi, A. Husen, Crit. Rev. Biotechnol. **42** (7), 973 (2022).
<https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1975091>
2. U. Aqeel, T. Aftab, M.M.A. Khan, et al., Chemosphere **291** (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132672>
3. I. G. Kalinina, V. B. Ivanov, S. A. Semenov, Russ. J. Phys. Chem. B **15** (3), 506 (2021).
4. G. De la Rosa, M. L. Lopez-Moreno de Haro, et al., Pure Appl. Chem. **85**, 2161 (2013).
<https://doi.org/10.1351/pac-con-12-09-05>
5. D. S. Meena, H. M. Jayadeva, C. Gautam, et al., Int. J. Plant Soil Sci. **16**, 1 (2017).
<https://doi.org/10.9734/ijpss/2017/33687>
6. M. Taheri, H. A. Qarache, A. A Qarache, et al., STEM Fellowship J. **1**, 17 (2016).
<https://doi.org/10.17975/sfj-2015-011>
7. A. R. Sofy, M. R. Sofy, A. A. Hmed, et al., Molecules **26** (5), 1337 (2021).
<https://doi.org/10.3390/molecules26051337>
8. H. Yasmin, J. Mazher, A. Azmat, et al., Ecotoxicol. Environ. Saf. **218**, 112 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112262>
9. M. Faizan, J.A. Bhat, C. Chen, et al., Plant Physiol. Biochem. **161**, 122 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.02.002>
10. M. V. Bazunova, R. A. Mustakimov, E. I. Kulish, Russ. J. Phys. Chem. B **15** (5), 888 (2021).
11. M. S. Sheteiw, H. Shaghaleh, Y. A. Hamoud, et al., Environ. Sci. Pollut. Res. Int. **28** (28), 36942 (2021).
<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14542-w>
12. Sohail, L. Sawati, Ferrari E., et al., Front. Plant Sci. **25** (13), 798751 (2022).
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.798751>
13. Chen Yu, Lu Jinying, Liu Min, et al., IET Nanobio-techn. **14** (5), 382 (2020).
<https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2019.01832>
14. T. A. Yurina, G. V. Drobin, O. A. Bogoslovskaya, et al., Sel'skokhozyaistvennaya Biologiya. **56** (1), 135 (2021).
<https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.135eng>
15. I. O. Leipunsky, A. N. Zhigach, M. L. Kuskov, et al., J. Alloys Compd. **778**, 271 (2018).
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
16. O. H. Lowery, N. J. Rosenbrough, A. L. Farr, et al., J. Biol. Chem. **27**, 265 (1951).
17. D. Arnon, J. Plant. Physiol. **24**, 1 (1949).
18. J. T. O. Kirch, Planta **78**, 200 (1968).
19. S. M. Dubo, K. A. Giles, J. K. Hmlton, et al., Anal. Chem. **28**, 350 (1956).
20. R. P. Johnson, T. L. Balwani, L. J. Johnson, et al., Anim. Sci. **25**, 617 (1966).
21. L. S. Bates, Plant. Soil. **39**, 205 (1973).
22. S. Afzal, N. K. Singh, Environ. Pollut. **314**, 120224 (2022).
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120224>
23. J.C. Tarafdar, R. Raliya, H. Mahawar et al. Agric. Res. **3**, 257 (2014).
<https://doi.org/10.1007/s40003-014-0113>
24. S. K. Dhoke, P. Mahajan, R. Kamble, et al., Nanotechnol. Dev. **3**, 111 (2013).
25. S. Torabian, M. Zahedi, A.H. Khoshgoftar, J. Plant Nutr. **39**, 172 (2016).
<https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1009107>
26. S. L. Laware, S. Raskar, Int. J. Curr. Microbiol. Sci. **3**, 874 (2014).
27. A. M. Zhukov, V. I. Solodilov, I. V. Tretyakov, Russ. J. Phys. Chem. B **16**, (5) 926 (2022).

28. R. Prasad, V. Kumar, K. S. Prasad, *Afr. J. Biotechnol.* **13**, 705 (2014). <https://doi.org/10.5897/ajbx2013.13554>
29. F. Pinto, M. Celesti, K. Acebron, *Plant Cell Environ.* **43**, 1637 (2020). doi:10.1111/pce.13754.
30. R. Raliya, J. C. Tarafdar, *Agric. Res.* **2**, 48 (2013).
31. V. L. Reddy Pullagurala, I. O. Adisa, S. Rawat. *Plant Physiol. Biochem.* **132**, 120 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.08.037>
32. X. Wang, X. Yang, S. Chen, et al. *Front Plant Sci.* **6**, 1243 (2016). <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01243>