Стимуляторы роста растений

УДК 633.11:631.559.2:631.53.027.2

doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.135rus

**ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ
СЕМЯН ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ НАНОЧАСТИЦАМИ МЕТАЛЛОВ**Т.А. ЮРИНА¹, Г.В. ДРОБИН¹, О.А. БОГОСЛОВСКАЯ² ✉, И.П. ОЛЬХОВСКАЯ²,
Н.Н. ГЛУЩЕНКО²

Использование нанотехнологий в сельском хозяйстве — перспективное направление, которое позволит снизить зависимость величины и качества урожая от внешних факторов. Особое место занимают исследования, связанные с предпосевной обработкой семян наночастицами (НЧ) металлов. В настоящей работе впервые показано, что предпосевная обработка семян озимой пшеницы сорта Стан наночастицами металлов с заданными физико-химическими свойствами оказывает влияние на морфометрические показатели роста озимой пшеницы на всех стадиях ее развития, а также на устойчивость растений к действию фитопатогенов, качество зерна, степень его поражения фузариозом и элементный состав почвы после уборки урожая. При этом эффекты зависят от вида используемого металла. Нашей целью было изучение влияния предпосевной обработки семян наночастицами железа, цинка, меди на показатели роста озимой пшеницы на всех стадиях ее развития, а также качества зерна и элементного состава почвы после уборки урожая. Наночастицы железа (НЧ), цинка, меди были получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 (Институт энергетических проблем химической физики РАН, Россия). Форму и размер НЧ оценивали методом электронной микроскопии на растровом электронном микроскопе JSM-7401F («JEOL Ltd.», Япония). Рентгенофазный анализ НЧ осуществляли на рентгеновском анализаторе АДП-1 (НПО «Современные технологии неразрушающего контроля», Россия). Полевой опыт проводили в хозяйственных условиях на базе валидационного полигона Новокубанского филиала ФГБНУ Росинформагротех (Краснодарский край). Преобладающий тип почв хозяйства — чернозем типичный, среднегумусный, тяжелосуглинистый. Производственный посев озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан проводили 4 октября 2016 года с установочной нормой высева семян 240 кг/га. Было заложено пять вариантов опыта: контроль (семена без обработки), обработка семян НЧ Fe (5×10^{-4} %), НЧ Zn (1×10^{-4} %), НЧ Cu (5×10^{-7} %), НЧ Fe + НЧ Zn + НЧ Cu (5×10^{-4} % + 1×10^{-4} % + 5×10^{-7} %). Отбирали почвенные образцы для анализа на содержание химических элементов. Густоту стояния, высоту, длину корня, глубину залегания узла кушения и кустистость определяли в фазу 3-4-го листа осенью, а также весной при возобновлении вегетации (6-8 листьев) и в фазу кушения (главный побег и 2-3 побега кушения). За 2 нед до уборки оценивали высоту растений, длину корня, толщину главного стебля у основания, длину колоса, число зерен в колосе, число продуктивных и непродуктивных стеблей. НЧ железа, цинка, меди представляли собой монокристаллические структуры круглой формы, покрытые полупрозрачной оксидной пленкой. Средний диаметр НЧ Fe составлял $27,0 \pm 0,51$ нм, НЧ Zn — $54,0 \pm 2,8$ нм, НЧ Cu — $79,0 \pm 1,24$ нм. Результаты рентгенофазового анализа показали, что в НЧ железа кристаллическая металлическая фаза составляла 53,6 %, фаза Fe₂O₃ — 46,4 %, толщина оксидной пленки — 3,5 нм. НЧ Cu и Zn содержали только кристаллическую металлическую фазу с одинаковой толщиной оксидной пленки — от 0,5 до 1,0 нм. Предпосевная обработка семян НЧ Fe влияла на высоту всходов, способствовала формированию развитой корневой системы с длиной корней, превышающей значения в контроле на 4,50 % ($p \leq 0,05$), и увеличивала густоту всходов на 9,96 % ($p \leq 0,05$). Предуборочный мониторинг посевов выявил повышение урожайности растительной массы пшеницы при обработке семян НЧ Fe и Cu. Длина растений была больше показателя в контроле ($81,3 \pm 1,2$ см) соответственно на 3,8 и 8 см, средняя толщина главного стебля у основания растений — на 6 и 5 мм в сравнении с контролем ($44 \pm 1,0$ мм). Отмечали увеличение продуктивности стеблестоя в вариантах с НЧ Fe и Zn, повышение устойчивости к воздействию патогенов при обработке НЧ Fe (процент больных колосов в сноповом материале в 3,85 раза меньше по сравнению с контролем), тенденцию к увеличению средней массы 1000 зерен при использовании НЧ Fe, Zn и Cu. Показатели качества урожая имели более высокие значения по сравнению с контролем: по содержанию сырой клейковины — на 6,12 % при обработке посевного материала НЧ Zn, Cu, композицией НЧ, по массовой доле белка — на 5,1 % при обработке НЧ Cu и композицией НЧ. Предпосевная обработка НЧ Fe и Zn снижала зараженность фузариозом зерна соответственно в 1,24 и 2,25 раза по сравнению с контролем. Элементный анализ почвы после уборки урожая показал снижение содержания подвижных форм фосфора на 27 % и цинка на 48 % в варианте с НЧ Zn, а также уменьшение количества подвижных форм фосфора на 23 % и серы на 7 % при обработке семян НЧ Cu по сравнению с контролем. Полученные данные свидетельствуют об активном влиянии предпосевной обработки семян НЧ металлов на показатели роста, развития и качества зерна пшеницы.

Ключевые слова: наночастицы, железо, цинк, медь, структура урожая, качество зерна, микроэлементный состав почвы.

Пшеница — важнейшая продовольственная культура в странах умеренного климата, которую использует в пищу свыше половины населения Земного шара. До 2050 года спрос на пшеницу увеличится вдвое в связи с растущими пищевыми потребностями (1). В то же время проблемы при производстве пшеницы постоянно усугубляются угрозами новых болезней, появлением более агрессивных вредителей, сокращением водных ресурсов, ограниченностью доступной пахотной земли, изменениями климата и нестабильностью погодных условий (2).

Для увеличения производства пшеницы, помимо современных методов агротехники, широко используют достижения генетики и селекции, а также нанотехнологии и наноматериалы (2-4). Рост урожайности и улучшение состояния посевов за счет оптимизации питания и защиты растений с помощью нанотехнологий и наноматериалов позволяют решить не только гуманитарные (повышение урожайности и качества продукции), но и экологические проблемы (4, 5). Наиболее часто в практике сельского хозяйства используют наночастицы (НЧ) на основе Zn, Cu, Fe, Mn или их оксидов. Наночастицы оксида цинка (ZnO) и оксида меди (CuO) применяют во многих коммерческих продуктах, включая антимикробные препараты. Недавние исследования подтверждают их эффективность как фунгицидов, поскольку они способны ингибировать рост грибных патогенов растений. Не случайно применение наночастиц для усиления роста растений и борьбы с их болезнями становится передовой практикой (6-10).

Интерес к использованию НЧ в растениеводстве связан с их уникальными свойствами. Наши многолетние исследования дисперсных систем и наночастиц позволили выявить следующие особенности биологического действия НЧ. Наночастицы металлов имеют низкую токсичность, в 7-50 раз меньшую, чем токсичность металлов в ионной форме. Они обладают пролонгированным и полифункциональным действием, стимулируют обменные процессы, легко проникают во все органы и ткани. Их биологическая активность связана с особенностями строения и физико-химическими характеристиками. При совместном применении НЧ металлов увеличивают эффективность природных полисахаридов (11-14). Благодаря своим размерам, НЧ активно проникают и распределяются по всем тканям, способствуя более активному протеканию физиологических, биохимических, молекулярных процессов при прорастании, росте и развитии растений. Попадая в биожидкости, НЧ выполняют роль депо, из которого за счет медленного процесса окисления частиц растение получает необходимые элементы для питания и роста. Такие особенности биологического действия наночастиц позволяют применять их в практике растениеводства, причем эффективные концентрации НЧ на два порядка ниже концентраций солей металлов (15). Особое место занимают исследования, связанные с предпосевной обработкой семян наночастицами, что позволяет добиться повышения урожайности на 30-40 % (16).

В настоящей работе впервые показано, что предпосевная обработка семян наночастицами металлов с определенными физико-химическими свойствами влияет на морфометрические показатели роста озимой пшеницы на всех стадиях ее развития, а также на устойчивость растений к действию фитопатогенов, качество зерна, степень его поражения фузариозом и элементный состав почвы после уборки урожая. При этом эффекты зависят от вида используемого металла.

Нашей целью было изучение влияния предпосевной обработки семян наночастицами железа, цинка, меди (по отдельности и в сочетании) на показатели роста озимой пшеницы на всех стадиях ее развития, а также

на качество зерна и элементный состав почвы после уборки урожая.

Методика. Наночастицы железа, цинка, меди были получены методом высокотемпературной конденсации (17) на установке Миген-3 (Институт энергетических проблем химической физики РАН, Россия) (18). Навески НЧ диспергировали в дистиллированной воде на ультразвуковом дезинтеграторе Scientz JY 92-IIN («Ningbo Scientz Biotechnology Co., Ltd», Китай) при 0,5 А и 44 кГц (время 30 с, перерыв 30 с, 3 повторные обработки), диспергируемую смесь охлаждали в ледяной бане.

Форму и размер наночастиц оценивали методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на растровом электронном микроскопе JSM-7401F («JEOL Ltd.», Япония) при напряжении 1 кВ. Для определения среднего диаметра НЧ микрофотографии обрабатывали с помощью компьютерной программы Micran 25 (<https://www.micran.ru/>), измеряя в поперечнике как минимум 1000 частиц. На основании полученных данных строили кривые распределения НЧ по размерам и оценивали средний диаметр наночастиц.

Рентгенофазный анализ наночастиц металлов проводили на рентгеновском анализаторе АДП-1 (НПО «Современные технологии неразрушающего контроля», Россия). В качестве источника излучения использовали кобальтовую трубку. Съемку осуществляли в режиме: шаг 0,05°, время накопления сигнала 8–10 мин. Для установления фазового состава НЧ полученные интерференционные пики обрабатывали с помощью компьютерной программы Match 3.8.0.137 (<http://www.crystalimpact.com/>).

Исследования выполняли на озимой пшенице (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан (Краснодарский НИИ сельского хозяйства), который выбрали из сортов, допущенных для использования в Северо-Кавказском регионе на высоком или среднем агрофоне. Сорт сильный, короткостебельный, устойчив к полеганию и осыпанию, скороспелый, характеризуется высокими хлебопекарными качествами зерна. Высота растений около 95 см. При искусственном заражении проявляет иммунность к пыльной головне. Устойчив к бурой, желтой и стеблевой ржавчине, обладает полевой устойчивостью к мучнистой росе, среднеустойчив к твердой головне, средневосприимчив к септориозу, восприимчив к фузариозу колоса. Морозостойкость средняя, жаростойкость высокая.

Полевой опыт проводили в хозяйственных условиях на базе валидационного полигона Новокубанского филиала ФГБНУ Росинформагротех в зоне неустойчивого увлажнения Краснодарского края. Преобладающий тип почв хозяйства — чернозем типичный, среднегумусный, тяжело-суглинистый. Отбор почвенных образцов для анализа содержания химических элементов проводили согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 «Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа» (М., 2018). Каждый средний образец был составлен из 10 индивидуальных проб, отобранных на одной пробной площадке методом конверта на глубину пахотного слоя (30 см). Почвы хозяйства имели повышенное содержание гумуса, повышенную и высокую нитрификационную способность, низкое, среднее и повышенное содержание фосфора, среднее и повышенное содержание калия, обменную кислотность, близкую к нейтральной и нейтральную. Обеспеченность серой низкая и средняя; марганцем, цинком и медью — низкая. В среднем по хозяйству в 1 кг почвы содержалось 37,1 мг нитратного азота, 20,0 — фосфора, 297 — калия, 5 — серы, 3,14 — марганца, 0,37 — цинка, 0,08 мг меди, 4,56 % гумуса; рН 6,16.

Производственный посев озимой пшеницы сорта Стан (РС-1) про-

водили в оптимальный для Центральной агроклиматической зоны срок — 4 октября 2016 года с установочной нормой высева семян 240 кг/га. Средняя дневная температура по месяцам составляла +18,1 °С (сентябрь 2016 года), +10,7 °С (октябрь 2016 года), +6 °С (ноябрь 2016 года), –2,6 °С (декабрь 2016 года), –1,3 °С (январь 2017 года), +0,1 °С (февраль 2017 года), +8,3 °С (март 2017 года), +13,1 °С (апрель 2017 года), +17,6 °С (май 2017 года), +22,6 °С (июнь 2017 года), +26,6 °С (июль 2017 года).

Было заложено пять вариантов опыта: контроль (семена без обработки), обработка семян НЧ Fe (5×10^{-4} %), НЧ Zn (1×10^{-4} %), НЧ Cu (5×10^{-7} %), НЧ Fe + НЧ Zn + НЧ Cu (5×10^{-4} % + 1×10^{-4} % + 5×10^{-7} %). Все технологические операции при возделывании пшеницы на опытном и контрольных участках проводили в один день и единым технологическим агрегатным составом.

Содержание подвижных соединений фосфора и калия в почве определяли по ГОСТ 26204-91 «Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО» (М., 1992). Степень поражения зерна фузариозом оценивали согласно ГОСТ 31646-2012 «Зерновые культуры. Метод определения содержания фузариозных зерен» (М., 2019).

Для проведения фенологических и биометрических наблюдений брали растения с трех площадок размером 1 м² для каждого участка опытных и контрольных образцов. Густоту стояния, высоту, длину корня, глубину залегания узла кушения и кустистость определяли в фазу 3-4-го листа осенью, а также весной при возобновлении вегетации (6-8 листьев) и в фазу кушения (главный побег и 2-3 побега кушения). Кустистость рассчитывали, как число всех стеблевых побегов на одно растение.

За 2 нед до уборки оценивали высоту растений, длину корня, толщину главного стебля у основания, длину колоса, число зерен в колосе, число продуктивных и непродуктивных стеблей. Для этого на учетных площадях закладывали рамки размером 50×50 см, в границах которых выкапывали все растения, полностью разбирали их по элементам структуры урожая, проводили подсчет и обмер (в 3 повторностях по каждому варианту опыта).

Качество зерна оценивали по следующим показателям: массовая доля сырой клейковины (ГОСТ Р 54478-2011 «Зерно. Методы определения количества и качества клейковины в пшенице». М., 2012), массовая доля белка (ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». М., 2009), стекловидность (ГОСТ 10987-76 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения стекловидности». М., 2009), натура (ГОСТ 10840-2017 «Зерно. Методы определения натуры». М., 2019) и массовая доля влаги (ГОСТ 13586.5-2015 «Зерно. Метод определения влажности». М., 2019).

Статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 20 («StatSoft, Inc.», США). Определяли средние значения изучаемых показателей (*M*) и стандартные ошибки среднего ($\pm$ SEM). Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (*t*-критерий Стьюдента) и непараметрической (*W*-критерий парных сравнений Вилкоксона) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты. Требования, предъявляемые к нанопорошкам в зависимости от области их применения и свойств, различны, чем объясняется существование большого числа методов синтеза наночастиц и многообразие самих частиц. Оптимальная биологическая активность НЧ проявляется

в зависимости от их физико-химических характеристик, включая такие показатели, как размер, фазовый и элементный состав, толщина оксидной пленки на поверхности (13, 14). Кроме того, эффективность действия наночастиц металлов зависит от концентрации наночастиц и способа их использования (15).

Согласно ПЭМ-изображениям, НЧ металлов, которые были изучены в настоящей работе, представляли собой монокристаллические структуры округлой правильной формы, покрытые полупрозрачной оксидной пленкой (рис. 1). НЧ Fe имели размер 5-80 нм, со средним диаметром частиц $27,0 \pm 0,51$ нм, средний диаметр НЧ Zn — $54,0 \pm 2,8$ нм, размер НЧ Cu — $79,0 \pm 1,24$ нм. По результатам рентгенофазового анализа в НЧ Fe кристаллическая металлическая фаза составляла $53,6 \pm 4,2$ %, фаза оксида железа Fe_3O_4 — 46,4 %, толщина оксидной пленки — 3,5 нм. НЧ Cu и Zn состояли только из кристаллической металлической фазы с одинаковой толщиной оксидной пленки — от 0,5 до 1,0 нм.

Рис. 1. Наночастицы меди (А), железа (Б) и цинка (В) (слева; изображения получены методом просвечивающей электронной микроскопии, JSM-7401F, «Jeol Ltd.», Япония) и распределение наночастиц металлов по размерам (справа).

В полевых опытах показано, что при предпосевной обработке семян НЧ Fe густота стояния растений осенью составила 320 ± 11 шт/м², что

на 10 % больше показателя в контрольном варианте (291 ± 9 шт/м²) ($p \leq 0,05$). Высота растений при обработке семян НЧ Fe достоверно ($p \leq 0,05$) превышала контроль на $2,0 \pm 0,5$ см. Предпосевная обработка семян НЧ Cu на 17,9 % ($p \leq 0,05$) уменьшала густоту стояния растений и незначительно увеличивала высоту растений по сравнению с контролем. При предпосевной обработке семян НЧ Zn и композицией НЧ (Fe, Zn, Cu) наблюдалась небольшая задержка в росте растений и развитии их корневой системы, густота стояния растений практически не отличалась от контроля.

На начальной стадии осеннего кушения наибольшее число стеблей образовывалось при предпосевной обработке семян НЧ Zn (в 1,5 раза больше значения у контрольных растений; $p \leq 0,05$). Эта тенденция сохранялась и на стадии кушения в весенний период (рис. 2). Предпосевная обработка НЧ Cu и композицией НЧ также способствовала активному кушению пшеницы. Наибольшая глубина залегания узла кушения в осенний период наблюдалась у растений при обработке НЧ Fe (до $4,3 \pm 0,7$ см), наименьшая ($2,35 \pm 0,5$ см) — НЧ Zn, в контроле значения составляли $3,13 \pm 0,6$ см. В весенний период показатель глубины залегания узла кушения во всех группах опыта был одинаковым ($3,6 \pm 0,1$ см).

Рис. 2. Кустистость озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан в осенний (а) и весенний (б) периоды при предпосевной обработке семян наночастицами металлов: 1 — контроль (без обработки), 2 — НЧ Fe (5×10^{-4} %), 3 — НЧ Zn (1×10^{-4} %), 4 — НЧ Cu (5×10^{-7} %), 5 — НЧ Fe + НЧ Zn + НЧ Cu (5×10^{-4} % + 1×10^{-4} % + 5×10^{-7} %) ($n = 290-320$, $M \pm SEM$; Краснодарский край, 2017 год).

* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

соте стеблей (НЧ Fe, НЧ Cu), густота всходов (НЧ Fe, НЧ Zn, композиция НЧ), глубина залегания узла кушения (НЧ Fe, НЧ Cu, композиция НЧ). Причем погодные условия начального периода роста и развития растений характеризовались ранним похолоданием и обильным снежным покровом. После зимнего периода погибших или поврежденных растений в полевом опыте обнаружено не было.

По результатам предуборочного мониторинга (табл. 1), предпосевная обработка семян НЧ металлов способствовала увеличению высоты растений, причем наибольшие значения, превышавшие контроль на 9,1 % ($p \leq 0,05$), были получены в варианте с НЧ Cu (см. табл. 1). Средняя длина корней варьировала от $7,8 \pm 0,9$ см (композиция НЧ) до $8,1 \pm 1,0$ см (НЧ Cu) при значении в контроле $8,04 \pm 0,5$ см. Средняя толщина стебля

Формирование корневой системы растений в осенний и весенний периоды наиболее активно происходило при предпосевной обработке НЧ Fe: длина корней увеличивалась соответственно на 4,5 и 3,8 % ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем. Значительное влияние наночастиц железа на формирование корневой системы и на ее активность отмечали многие авторы (15, 19, 20).

Следовательно, перед началом зимнего периода при предпосевной обработке семян пшеницы НЧ металлов представляла собой хорошо укорененные и раскустившиеся растения, превышавшие контроль по показателям вы-

узла растений у основания при обработке семян НЧ Fe и НЧ Cu превышала контрольное значение ($44,0 \pm 1,0$ см) соответственно на 13,6 % и 11,4 % ($p \leq 0,05$). Наибольшее число стеблей наблюдалось в группе растений с предпосевной обработкой зерна НЧ Zn (на 0,8 % выше контроля) и композицией НЧ (на 2,0 % выше контроля). Причем предпосевная обработка зерна НЧ Zn увеличивала число непродуктивных стеблей на 1,3 % ($p \leq 0,05$), а обработка зерна композицией НЧ снижала число непродуктивных стеблей на 0,4 % ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем. Наименьшее число больных стеблей по сравнению с контролем выявили в вариантах с НЧ Fe, НЧ Zn и НЧ Cu. Обработка НЧ Fe снижала число больных стеблей в 4 раза ($p \leq 0,05$). В этих же группах масса 1000 зерен превышала контрольное значение соответственно на 1,9; 1,3 и 1,1 %.

1. Результаты предуборочного мониторинга посевов пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан при предпосевной обработке семян наночастицами (НЧ) металлов ($n = 110-120$, $M \pm SEM$; Краснодарский край, 2017 год)

Вариант	Высота, см	Длина корня, см	Толщина стебля у основания, мм	Число стеблей			Масса 1000 зерен, г
				всего, шт/м ²	непродуктивных, %	больных, %	
Контроль (без обработки)	87,8 $\pm$ 1,2	8,0 $\pm$ 0,8	44 $\pm$ 1,0	456,0 $\pm$ 11,0	1,5	2,4	44,2 $\pm$ 0,3
НЧ Fe	91,6 $\pm$ 0,9	8,0 $\pm$ 0,9	50 $\pm$ 1,8	446,8 $\pm$ 10,1	1,5	0,6	45,0 $\pm$ 0,2
НЧ Zn	88,3 $\pm$ 1,4	7,9 $\pm$ 0,6	46 $\pm$ 1,4	465,2 $\pm$ 9,6	2,8	1,1	44,8 $\pm$ 0,2
НЧ Cu	95,8 $\pm$ 1,3	8,1 $\pm$ 1,0	49 $\pm$ 1,3	437,2 $\pm$ 10,3	1,2	1,6	44,7 $\pm$ 0,4
Композиция НЧ Fe, Zn, Cu	92,4 $\pm$ 1,0	7,8 $\pm$ 0,9	45 $\pm$ 0,9	460,0 $\pm$ 12,4	1,1	2,4	43,9 $\pm$ 0,3

Рис. 3. Количество зараженных фузариозом зерен озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан при предпосевной обработке семян наночастицами металлов: 1 — контроль (без обработки), 2 — НЧ Fe (5×10^{-4} %), 3 — НЧ Zn (1×10^{-4} %), 4 — НЧ Cu (5×10^{-7} %), 5 — НЧ Fe + НЧ Zn + НЧ Cu (5×10^{-4} % + 1×10^{-4} % + 5×10^{-7} %) ($n = 1000$, $M \pm SEM$; Краснодарский край, 2017 год).

* Различия с контролем статистически значимы при $p \leq 0,05$.

($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем (см. рис. 3). У НЧ Zn способность с высокой эффективностью тормозить развитие патогенов, в том числе возбудителя фузариоза, отмечали и другие авторы, причем не только на пшенице, но и на бобовых культурах (22, 23).

В соответствии с техническими требованиями собранное зерно для всех вариантов опыта по показателям качества относилось к IV классу мягкой пшеницы (табл. 2). Показатели качества зерна у растений после

В 2017 году отмечались обильные атмосферные осадки, а высокая влажность благоприятствует развитию грибных болезней, в том числе фузариоза. Известно, что жизнедеятельность грибов существенно снижает урожайность и качество зерна злаковых культур, возможно заражение пищевого сырья, продуктов питания и кормов и их контаминация грибными токсинами (21). Учитывая актуальность проблемы, немаловажным показателем оценки качества зерна служит наличие в нем зараженных зерен. Использование НЧ Fe для обработки посевного материала снижало зараженность зерна фузариозом в 1,24 раза ($p \leq 0,05$), НЧ Zn — в 2,25 раза ($p \leq 0,05$), НЧ Cu и композиции наночастиц — в 1,33 раза

предпосевной обработки семян НЧ металлов имели более высокие значения по сравнению с контролем. Так, массовая доля сырой клейковины превышала контрольное значение после обработки НЧ Fe на 2,6 %, НЧ цинка Zn и композицией НЧ — на 5,1 %, НЧ Cu — на 6,1 %. Массовая доля белка в зерне после обработки НЧ железа была выше, чем в контроле, на 1,6 %, НЧ Zn — на 2,5 %, НЧ Cu — на 3,4 %, композицией НЧ — на 5,1 %. Значения стекловидности и натуры зерна увеличивались в пределах 1 % по сравнению с контролем.

2. Показатели качества зерна озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Стан при предпосевной обработке семян наночастицами (НЧ) металлов ($n = 1000$, $M \pm SEM$; Краснодарский край, 2017 год)

Показатель	Вариант				
	контроль (без обработки)	НЧ Fe	НЧ Zn	НЧ Cu	композиция НЧ Fe, Zn, Cu
Массовая доля сырой клейковины, %	19,6 $\pm$ 1,2	20,1 $\pm$ 1,4	20,6 $\pm$ 1,3	20,8 $\pm$ 1,4	20,6 $\pm$ 1,2
Массовая доля белка (на сухое вещество), %	11,8 $\pm$ 0,5	12,0 $\pm$ 0,3	12,1 $\pm$ 0,2	12,2 $\pm$ 0,2	12,4 $\pm$ 0,3
Стекловидность, %	45,7 $\pm$ 5,4	46,1 $\pm$ 4,3	45,9 $\pm$ 4,6	46,2 $\pm$ 4,3	45,7 $\pm$ 3,2
Натура, г/л	767 $\pm$ 21	770 $\pm$ 30	772 $\pm$ 28	767 $\pm$ 30	774 $\pm$ 31
Массовая доля влаги, %	13,4 $\pm$ 2,4	13,5 $\pm$ 1,8	13,2 $\pm$ 2,1	13,2 $\pm$ 2,2	12,8 $\pm$ 1,8

Следовательно, предпосевная обработка семян НЧ Fe (5×10^{-4} %), Zn (1×10^{-4} %) и Cu (5×10^{-7} %) (по отдельности или в композиции) существенно влияет на прорастание семян, биологическую урожайность растительной массы, продуктивность стеблестоя, устойчивость к воздействию болезнетворных патогенов и показатели качества зерна. Это происходит благодаря изменению структурной организации листьев, регуляции развития сосудистых пучков листьев, стеблей, корней, что приводит к усилению фотосинтеза в листьях и увеличению сосущей силы корней (15). Изучение механизма регуляции этих процессов на молекулярном уровне активно проводится с помощью транскриптомного, протеомного, метаболомного анализов (24, 25).

При исследовании элементного состава почвы после уборки урожая зерна, обработанного наночастицами металлов, мы установили, что реакция почв по вариантам опыта (рН) была нейтральной, содержание тяжелых металлов не превышало установленных ПДК. Так, количество свинца (Pb) составляло от 0,19 до 0,22 мг/кг почвы (при ПДК не более 6,0 мг/кг), кадмия (Cd) — от 0,023 до 0,028 мг/кг почвы (при ПДК не более 0,10 мг/кг). Обеспеченность почвы нитратным азотом (N-NO₃), подвижным фосфором (P₂O₅), обменным калием (K₂O), подвижной серой (S), марганцем (Mn), цинком (Zn), медью (Cu) в основном соответствовала составу почвы контрольного варианта. Однако были выявлены и некоторые изменения. Так, при обработке семян НЧ Zn в почве уменьшилось содержание P₂O₅ на 27 % и Zn на 48 %, что соответствует «низкой» группе обеспеченности. При обработке семян НЧ Cu после уборки урожая наблюдалось снижение обеспеченности почвы P₂O₅ на 23 % и S на 7 % по сравнению с контролем. Результаты анализа свидетельствуют о том, что, несмотря на низкие концентрации НЧ металлов, они могут влиять на элементный состав почвы. Дальнейшие исследования позволят выявить закономерности воздействия НЧ металлов на микроэлементный состав почвы и ее биоту. Несомненно, возможность изменения микроэлементного состава почвы необходимо учитывать в технологии предпосевной обработки семян наночастицами цинка и меди.

Таким образом, установлено, что предпосевная обработка семян озимой пшеницы сорта Стан наночастицами железа, цинка и меди и их

композицией положительно влияет на морфологические показатели растений на всех стадиях роста и качество урожая, а также предотвращает развитие фитофтороза. Наилучшие морфометрические показатели на начальной стадии роста и развития наблюдались при применении НЧ Fe (достоверное увеличение высоты всходов на 12 %, длины корней на 4,5 %, густоты стояния растений на 9,96 %, глубины залегания узла кущения на 9,3 % по сравнению с контролем). В предуборочный период опытные посе- вы характеризовались высоким стеблестоем, превышающим контрольный показатель при предпосевной обработке НЧ Fe на 4,3 %, НЧ Cu — на 9,1 %. Средняя толщина главного стебля у основания в этих вариантах превышала контроль соответственно на 13,6 и 10,4 %. Наименьшее число больших стеблей отмечали в вариантах с НЧ Fe, НЧ Zn, НЧ Cu. Масса 1000 зерен при предпосевной обработке НЧ Fe, НЧ Zn, НЧ Cu увеличивалась на 1,9; 1,3 и 1,1 % по сравнению с контролем. Во всех опытных вариантах возрастала массовая доля сырой клейковины (на 2,5-6,1 %) и белка (на 1,6-5,1 %) в зерне. Увеличивались значения стекловидности и натуре зерна. Поражение зерна фузариозом при обработке семян НЧ Zn снижалось в 2,25 раза по сравнению с контролем, при обработке другими НЧ металлов и их композицией — на 20-30 %. После уборки урожая озимой пшеницы в почве отмечали уменьшение содержания подвижных форм фосфора и цинка на 27 и 48 % при использовании НЧ Zn, а также снижение обеспеченности почвы P_2O_5 и S на 23 и 7 % в варианте с НЧ Cu.

Авторы благодарят Министерство образования и науки РФ и сотрудников лаборатории ИНЭП ХФ РАН им. В.Л. Тальрозе ФИЦ ХФ РАН под руководством А.Н. Жигача за поддержку в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ray D.K., Mueller N.D., West P.C., Foley J.A. Yield trends are insufficient to double global crop production by 2050. *PLoS ONE*, 2013, 8(6): e66428 (doi: 10.1371/journal.pone.0066428).
2. Tigchelaar M., Battisti D.S., Naylor R.L., Ray D.K. Future warming increases probability of globally synchronized maize production shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(26): 6644-6649 (doi: 10.1073/pnas.1718031115).
3. Полищук С.Д., Голубева Н.И. Изменение лабораторной всхожести семян яровой пшеницы под воздействием обработки их ультрадисперсными материалами. *Вестник Рязанского агротехнологического университета*, 2010, 3: 38-39.
4. Голубева Н.И. Воздействие нанокристаллического порошка меди на полевую всхожесть, рост и развитие пшеницы. *Вестник Рязанского агротехнологического университета*, 2012, 1: 8-10.
5. Duhan J.S., Kumar R., Kumar N., Kaur P., Nehra K., Duhan S. Nanotechnology: The new perspective in precision agriculture. *Biotechnology Reports*, 2017, 15: 11-23 (doi: 10.1016/j.btre.2017.03.002).
6. Pradhan S., Mailapalli D.R. Interaction of engineered nanoparticles with the agri-environment. *J. Agric. Food Chem.*, 2017, 65(38): 8279-8294 (doi: 10.1021/acs.jafc.7b02528).
7. Elsharkawy M.M., Derbalah A. Antiviral activity of titanium dioxide nanostructures as a control strategy for broad bean strain virus in fababean. *Pest. Manag. Sci.*, 2019, 75(3): 828-834 (doi: 10.1002/ps.5185).
8. Alghuthaymi M.A., Almoammar H., Rai M., Said-Galiev E., Abd-Elsalam K.A. Myconanoparticles: synthesis and their role in phytopathogens management. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2015, 29(2): 221-236 (doi: 10.1080/13102818.2015.1008194).
9. El-Temsah Y.S., Joner E.J. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil. *Environ. Toxicol.*, 2012, 27(1): 42-49 (doi: 10.1002/tox.20610).
10. Feng Y., Cui X., He S., Dong G., Chen M., Wang J., Lin X. The role of metal nanoparticles in influencing arbuscular mycorrhizal fungi effects on plant growth. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, 47(16): 9496-9504 (doi: 10.1021/es402109n).
11. Глушенко Н.Н., Богословская О.А., Ольховская И.П. Физико-химические закономерности биологического действия высокодисперсных порошков металлов. *Химическая физика*, 2002, 21(4): 79-85.
12. Rakhmetova A.A., Alekseeva T.P., Bogoslovskaya O.A., Leipunskii I.O., Ol'khovskaya I.P.,

- Zhigach A.N., Glushchenko N.N. Wound-healing properties of copper nanoparticles as a function of physicochemical parameters. *Nanotechnologies in Russia*, 2010, 5(3-4): 271-276 (doi: 10.1134/S199507801003016X).
13. Bogoslovskaja O.A., Rakhmetova A.A., Ovsyannikova M.N., Olkhovskaya I.P., Glushchenko N.N. Antibacterial effect of copper nanoparticles with differing dispersion and phase composition. *Nanotechnologies in Russia*, 2014, 9(1-2): 82-86 (doi: 10.1134/S1995078014010042).
 14. Rakhmetova A.A., Bogoslovskaja O.A., Olkhovskaya I.P., Zhigach A.N., Ilyina A.V., Varlamov V.P., Glushchenko N.N. Concomitant action of organic and inorganic nanoparticles in wound healing and antibacterial resistance: chitosan and copper nanoparticles in an ointment as an example. *Nanotechnologies in Russia*, 2015, 10(1-2): 149-157 (doi: 10.1134/S1995078015010164).
 15. Yuan J., Chen Y., Li H., Lu J., Zhao H., Liu M., Nechitaylo G.S., Glushchenko N.N. New insights into the cellular responses to iron nanoparticles in *Capsicum annuum*. *Sci. Rep.*, 2018, 8(1): 3228-3239 (doi: 10.1038/s41598-017-18055-w).
 16. Shang Y., Hasan K., Ahammed G.J., Li M., Yin H., Zhou J. Applications of nanotechnology in plant growth and crop protection: a review. *Molecules*, 2019, 24(14): 2558 (doi: 10.3390/molecules24142558).
 17. Миллер А.В., Ген М.Я. Способ получения аэрозолей металлов. А.с. 814432 (СССР) ИХФ РАН. № 712949/22-02. Заявл. 19.06.61. Оpubл. 23.03.1981. Бюлл. № 11.
 18. Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L., Berezkina N.G., Afanasenkova E.S., Kudrov B.V., Lopez G.W., Vorobjeva G.A., Naumkin A.V. Synthesis of TiH₂ nanopowder via the Guen-Miller Flow-Levitation method and characterization. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 778: 271-279 (doi: 10.1016/j.jallcom.2018.11.088).
 19. Duran N.M., Medina-Llamas M., Cassanji J.G.B., de Lima R.G., Almeida E., Macedo W.R., Mattia D., de Carvalho H.W.P. Bean seedling growth enhancement using magnetite nanoparticles. *J. Agric. Food Chem.*, 2018, 66(23): 5746-5755 (doi: 10.1021/acs.jafc.8b00557).
 20. Ruttkay-Nedecky B., Krystofova O., Nejdil L., Adam V. Nanoparticles based on essential metals and their phytotoxicity. *J. Nanobiotechnol.*, 2017, 15(1): 33 (doi: 10.1186/s12951-017-0268-3).
 21. Ortega L.M., Romero L., Moure C., Garmendia G., Albuquerque D.R., Pinto V.F., Vero S., Alconada T.M. Effect of moisture on wheat grains lipid patterns and infection with *Fusarium graminearum*. *International Journal of Food Microbiology*, 2019, 306: 108264 (doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2019.108264).
 22. Dimkpa C.O., McLean J.E., Britt D.W., Anderson A.J. Antifungal activity of ZnO nanoparticles and their interactive effect with a biocontrol bacterium on growth antagonism of the plant pathogen *Fusarium graminearum*. *Biometals*, 2013, 26: 913-924 (doi: 10.1007/s10534-013-9667-6).
 23. Savi G.D., Piacentini K.C., de Souza S.R., Costa M.E.B., Santos C.M.R., Scussel V.M. Efficacy of zinc compounds in controlling *Fusarium* head blight and deoxynivalenol formation in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Food Microbiology*, 2015, 205(4): 98-104 (doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2015.04.001).
 24. Yasmeen F., Raja N.I., Razzaq A., Komatsu S. Proteomic and physiological analyses of wheat seeds exposed to copper and iron nanoparticles. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Proteins and Proteomics*, 2017, 1865(1): 28-42 (doi: 10.1016/j.bbapap.2016.10.001).
 25. Mahakham W., Sarmah A.K., Maensiri S., Theerakulpisut P. Nanopriming technology for enhancing germination and starch metabolism of aged rice seeds using phytosynthesized silver nanoparticles. *Sci. Rep.*, 2017, 7(8): 8263 (doi: 10.1038/s41598-017-08669-5).

¹Новокубанский филиал ФГБУН Российского НИИ информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению

агропромышленного комплекса,
352243 Россия, Краснодарский край, г. Новокубанск, ул. Красная, 15,
e-mail: agrolaboratoriya@mail.ru, director@kubniitim.ru;

²Институт энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе ФГБУН ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН,

119334 Россия, г. Москва, Ленинский просп., 38, корп. 2,
e-mail: obogo@mail.ru ✉, nnglu@mail.ru, iolkhv@gmail.com

Поступила в редакцию
7 июня 2020 года

Sel'skokhozyaistvennaya biologiya [Agricultural Biology], 2021, V. 56, № 1, pp. 135-145

STIMULATING EFFECTS OF PRE-SOWING SEED TREATMENT WITH METAL NANOPARTICLES ON WINTER WHEAT GROWTH AND DEVELOPMENT

T.A. Yurina¹, G.V. Drobin¹, O.A. Bogoslovskaya²✉, I.P. Olkhovskaya²,
N.N. Glushchenko²

¹Novokubansk Branch of Russian Research Institute of Information and Feasibility Study on Engineering Support of Agrobusiness, 15, ul. Krasnaya, Novokubansk, Krasnodar Territory, 352243 Russia, e-mail agrolaboratoriya@mail.ru, director@kubniitim.ru;

²Semenov Federal Research Center for Chemical Physics RAS, the Talrose Institute for Energy Problems of Chemical Physics, 38/2 Leninsky pr., Moscow, 119334 Russia, e-mail obogo@mail.ru (✉ corresponding author), nnglu@mail.ru, iolkhv@gmail.com

ORCID:

Yurina T.A. orcid.org/0000-0002-6158-5714

Olkhovskaya I.P. orcid.org/0000-0003-2322-7868

Drobin G.V. orcid.org/0000-0002-6673-1776

Glushchenko N.N. orcid.org/0000-0002-0227-9282

Bogoslovskaya O.A. orcid.org/0000-0003-1632-4010

The authors declare no conflict of interests

Acknowledgements:

Authors would like to thank the Ministry of Education and Science of the Russian Federation and the staff of the laboratory of INEPCP FRCCP RAS under the leadership of A.N. Zhigach for the support in the experiments.

Received June 7, 2020

doi: 10.15389/agrobiology.2021.1.135eng

Abstract

The use of nanotechnologies in agriculture is an advanced course enabling to reduce the dependence of crop tonnage and quality on external factors. A special section is represented by studies of pre-sowing treatment of seeds with metal nanoparticles (NPs). In this work, it is shown for the first time that pre-sowing treatment of seeds with metal nanoparticles with specific physico-chemical parameters affects morphometric indices of the of winter wheat growth at all stages of its development as well as the plant resistance to pathogens, grain quality, the degree of its damage from fusarium and elemental composition of the soil after harvesting. Effects depend on the type of metal used. Our aims were to study i) effects of pre-sowing seed treatment with iron, zinc, and copper NPs on the growth parameters and grain quality of winter wheat, and ii) whether this treatment affects the soil after harvest. Iron, zinc, and copper NPs were obtained by the method of high temperature condensation at the Migen-3 apparatus (Institute of Energy Problems of Chemical Physics RAS, Russia). The shape and size of NPs were evaluated by JSM-7401F scanning electron microscope (JEOL Ltd., Japan). X-ray phase analysis was carried out using an ADP-1 X-ray analyzer (NPO Modern Technologies of Non-Destructive Control, Russia). Field trials were carried out at the validation test site of the Novokuban Branch of the Rosinformagrotech (Krasnodar Territory). The predominant soil type is typical chernozem, with medium humus content, heavy loamy. The sowing of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Stan was performed on October 4, 2016 with a setting seed rate 240 kg/h. The assigned treatments were as follows: control (seeds without treatment), seed treatment with Fe NPs (5×10^{-4} %), Zn NPs (1×10^{-4} %), Cu NPs (5×10^{-7} %); Fe NPs + Zn NPs + Cu NPs (5×10^{-4} % + 1×10^{-4} % + 5×10^{-7} %). Soil samples were collected for chemical analysis. For phenological and biometric observations, plants were taken from three locations of 1 m² area from each experimental and control plot. Plant height, average root length, thickness of the main stem at the plant bottom, tillering and depth of the tillering node were measured. Iron, zinc, and copper NPs were round single-crystal structures covered with a semitransparent oxide film. Average diameter of Fe NPs was 27.0 ± 0.51 nm, Zn NPs 54.0 ± 2.8 nm, Cu NPs 79.0 ± 1.24 nm. X-ray phase analysis showed that iron NPs consisted of 53.6 % crystalline metal phase, Fe₃O₄ content was 46.4 %, and the oxide film thickness was 3.5 nm. Cu and Zn NPs contained only crystalline metal phases with the similar oxide film thickness, 0.5 to 1.0 nm. Pre-sowing treatment of seeds with Fe NPs affected the height of seedlings, promoted the formation of a developed root system with total root length being 4.5 % more ($p \leq 0.05$) than in the control group, and increased the seedling stand density by 9.96 % ($p \leq 0.05$) vs. control. Pre-harvest monitoring of crops revealed an increase in the yield of wheat plant mass after pre-sowing seed treatment with Fe and Cu NPs. Stem length was larger than that of the control (81.3 ± 1.2 sm) by 3.8 and 8 cm, respectively, the average thickness of the main stem at the plant bottom being larger by 6 mm (when processing with Fe NPs) and 5 mm (when treating with Cu NPs) in comparison with the control (44 mm). Plant stands productivity enhancement after Fe and Zn NPs treatments, higher resistance to pathogens (by 3.85 times vs. control) under Fe NPs, a tendency to an increase in the average 1000-grain weight when using NPs of Fe, Zn, and Cu were observed. The crop quality parameters had higher values as compared to the control: in terms of the content of wet gluten by 6.12 % when seeds were treated with Zn and Cu NPs or with NPs composition; the protein mass fraction was larger under treatment with Cu NPs and the NPs composition by 5.1 % vs. control. Pre-sowing treatment with Fe and Zn NPs reduced the prevalence of Fusarium infection in grain by 1.24 and 2.25 times respectively vs. control. Elemental analysis of the soil after harvesting showed a decrease in the content of mobile forms of phosphorus by 27 % and zinc by 48 % after seed treatment with Zn NPs in comparison with the control, and a decrease in the phosphorus mobile forms by 23 % and sulfur by 7 % after pre-sowing treatment with Cu NPs in comparison with the control. The data obtained demonstrate the effective influence of the pre-sowing treatment of seeds by metal NPs on the growth, development and grain quality of wheat.

Keywords: nanoparticles, iron, zinc, copper, yield components, grain quality, soil trace elements.