

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ПОДГОТОВКИ СЕМЯН РИСА С ПОМОЩЬЮ ОБРАБОТКИ НАНОЧАСТИЦАМИ Fe, В, Мо И Mn

© 2024 г. А. В. Браславский¹, И. И. Крохмаль², О. А. Богословская³,
И. П. Ольховская³, Н. Н. Глушенко^{3,*}

¹Land Green and Technology Co., Ltd, Тайбэй, Тайвань

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

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

*E-mail: nnglu@mail.ru

Поступила в редакцию 26.02.2024 г.

После доработки 15.04.2024 г.

Принята к публикации 15.04.2024 г.

Для удовлетворения растущего спроса на продовольствие требуются разработки новых подходов в предпосевной обработке семян, в том числе с использованием современных нанотехнологий. Представлены данные по влиянию предпосевной обработки семян риса наночастицами индивидуальных микроэлементов и их композицией. Установлено, что предпосевная обработка семян риса наночастицами Fe в концентрации $10^{-7}\%$ и их композицией (смесь наночастиц В $10^{-5}\%$, Мо $10^{-7}\%$, Mn $10^{-6}\%$ и Fe $10^{-7}\%$) увеличивает энергию прорастания семян и их всхожесть на 9.4 и 11.8% соответственно по сравнению с контролем. Наночастицы Fe $10^{-7}\%$ способствуют увеличению длины корня проростков в 3 раза и индекса жизнеспособности семян/проростков на 110.9% по сравнению с контролем. Количественные анатомические показатели листьев проростков риса свидетельствуют об увеличении площади водоносной и хлорофиллсодержащей ткани на 72.2 и 22.9% соответственно, площади проводящих пучков – на 66.5%, а толщины листа – на 21.9% при предпосевной обработке семян нанопрепаратами с композицией наночастиц микроэлементов по сравнению с контролем.

DOI: 10.56304/S1992722324601460

ВВЕДЕНИЕ

Минеральное питание растений имеет важное значение для повышения урожайности сельскохозяйственных культур. Удовлетворение потребностей растущего мирового населения в сельскохозяйственной продукции может быть осуществлено за счет использования современных методов агротехники, достижений генетики и селекции, а также благодаря современным нанотехнологиям и наноматериалам [1–5]. Предполагается, что наноматериалы могут заменить или дополнить традиционные удобрения, способствуя решению проблем биодоступности минералов, увеличению урожайности и качества продукции, снижению негативных последствий внесения минеральных удобрений в почву, защите окружающей среды и повышению эффективности борьбы с сельскохозяйственными вредителями [2, 6]. Спектр используемых в растениеводстве наноматериалов включает в себя наночастицы (НЧ) как жизненно необходимых, так и редкоземельных элементов, а также углеродсодержащие структу-

Преимущественно в практике сельского хозяйства используют НЧ на основе Zn, Cu, Fe, Mn или их оксидов. НЧ оксида цинка (ZnO) и оксида меди (CuO) применяют во многих коммерческих продуктах, включая антимикробные препараты. Недавние исследования подтверждают их действие в качестве фунгицидов как в сельском хозяйстве, так и в пищевой промышленности, поскольку они способны ингибировать рост грибковых патогенов растений, таких как *Botrytis cinerea*, *Penicillium expansum*, *Fusarium graminearum* и *Phytophthora infestans*. Применение НЧ для усиления роста растений и борьбы с их болезнями является передовой практикой [9–12].

Интерес к использованию НЧ в растениеводстве и сельском хозяйстве связан с их уникальными свойствами. Многолетние исследования дисперсных систем и, в частности, НЧ позволили выявить некоторые особенности их биологического действия. Так, НЧ металлов имеют низкую токсичность, которая в 7–50 раз меньше токсичности металлов в ионной форме. Металлические НЧ обладают пролонгированным и полифункциональным действием, стимулируют обменные процессы, легко проникают во все органы и тка-

ни, их биологическая активность связана с особенностями строения частиц и их физико-химическими характеристиками. Кроме того, НЧ металлов проявляют синергетический эффект с природными полисахаридами [13–16].

Перечисленные выше особенности действия НЧ металлов на биосистемы позволяют использовать их в различных областях, в том числе в биотехнологии высших растений, причем концентрация НЧ в составе питательных сред на 2 порядка ниже концентрации металлов в виде солей. При этом посадочный материал, выращенный на таких питательных средах, является оздоровленным с улучшенными морфометрическими показателями [17, 18]. Особое место занимают исследования, связанные с предпосевной обработкой семян НЧ, что позволяет повысить урожайность сельскохозяйственных растений вплоть до 15–40% [19, 20].

Одной из наиболее значимых сельскохозяйственных культур в питании одной трети населения Земли является рис. По площади посева и урожайности он занимает второе место в мировом земледелии. По данным Росстата посевные площади риса в России в 2018 г. в хозяйствах всех категорий составили 181.5 тыс. га. Среднегодовая урожайность риса в России постоянно растет: в 1991–2000 гг. она составляла 28.7 ц/га, в 2001–2010 гг. возросла до 42.3 ц/га, в 2011–2018 гг. достигла 53.6 ц/га. Анализ среднегодовых показателей за длительный период позволяет в значительной степени исключить влияние природно-климатических факторов и определить вклад использования передовых технологий в изменение урожайности риса в России [21].

Включение микроэлементов в систему удобрения риса — обязательный элемент современных технологий его выращивания. Микроэлементы имеют важное значение в культивировании риса. Так, бор оказывает влияние на метаболизм растений риса: участвует в азотном и фосфорном обмене, увеличивает количество и размер хлоропластов, содержание хлорофиллов и каротиноидов. При низком содержании в почве водорастворимого бора количество сахаров в растениях риса увеличивается, азота и аскорбиновой кислоты снижается, на листьях появляются бурые пятна, кончики корней уплотняются [22].

Марганец входит в состав окислительно-восстановительных ферментов, участвует в процессах дыхания, фотосинтеза, углеводного и азотного обмена растений. При недостатке марганца в почве на листьях риса появляются мелкие удлиненные хлоротичные пятна, растения становятся низкорослыми. Имеется прямая зависимость между содержанием марганца в почве и степенью поражения риса болезнями, например пирикуляриозом [22].

Молибдену принадлежит исключительная роль в азотном питании растений. Он участвует в процессах фиксации молекулярного азота и восстановления нитратов в растениях. Изменяя свою валентность, Мо участвует в окислительно-восстановительных реакциях и является важным звеном в цепи переноса электронов. Под влиянием молибдена повышается устойчивость хлорофилл-белково-липоидного комплекса пластид, тем самым усиливается интенсивность фотосинтеза. При недостатке молибдена в листьях накапливается большое количество нитратов и снижается содержание в них хлорофиллов. Визуальными признаками молибденового голодания у риса служат бледно-зеленая окраска листьев и резкое торможение роста растений [22].

Внесение микроудобрений бора, марганца и молибдена увеличивает количество фосфора и азота в зерне, способствует снижению пленчатости зерновок и повышению их стекловидности. Внесение бора и молибдена повышает содержание белка в зерне, а марганца и бора — крахмала. Применение бора увеличивает массу зерна с главной метелки и количество колосков у растений риса. Применение марганцевых и молибденовых удобрений повышает кустистость растений риса, массу 1000 зерен и количество колосков [22].

Железо является незаменимым элементом для нормального роста и развития растений риса, оно необходимо для функционирования железосодержащих дыхательных ферментов, образования хлорофилла и процессов фотосинтеза. Улучшение обеспеченности растений риса железом способствует увеличению в зерне риса содержания белка, крахмала, стекловидности и сокращению трещиноватости по сравнению с зерном, полученным при выращивании на естественных запасах этого элемента [23].

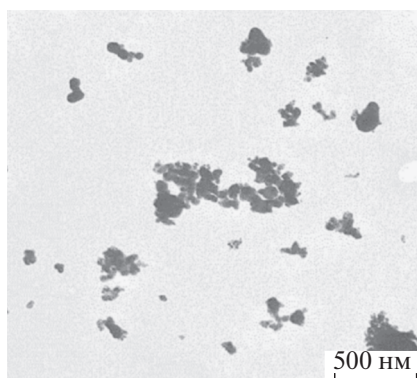
Показано, что применение микроудобрений бора и марганца способствует увеличению урожая риса на 3.6–3.8 ц/га, а молибдена — на 4.6–4.9 ц/га. Внесение железосодержащих удобрений под рис обеспечивает увеличение урожайности на 3.8–4.8 ц/га [22, 23].

В связи с этим цель данного исследования — изучение влияния предпосевной обработки семян риса НЧ металлов на всхожесть, биометрические показатели проростков риса и анатомические изменения листьев растений.

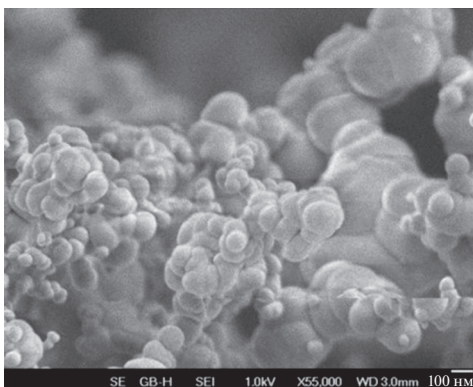
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

НЧ железа, молибдена, марганца получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 [24]. Частицы бора предоставлены ГКС ИХФ РАН. Исследование физико-химических характеристик НЧ проведено сотрудниками Лаборатории нано- и микроструктурного

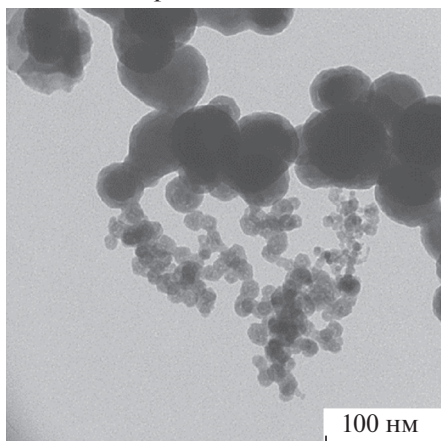
ПЭМ-изображение наночастиц Мо



СЭМ-изображение наночастиц В



ПЭМ-изображение наночастиц Мп



СЭМ-изображение наночастиц Fe

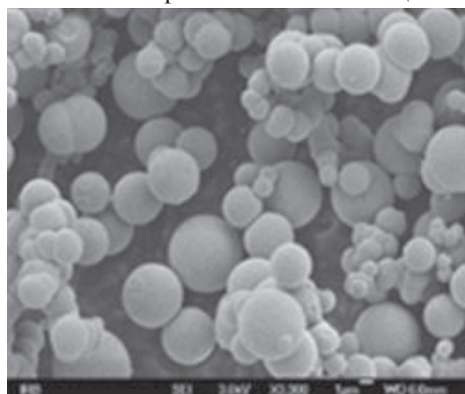


Рис. 1. Электронные фотографии наночастиц.

материаловедения Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН (зав. лаб. А.Н. Жигач). НЧ представляют собой монокристаллические структуры круглой правильной формы, покрытые полупрозрачной оксидной пленкой. Размер НЧ Fe составил 56.0 ± 0.9 нм, НЧ Mn – 25.0 ± 0.8 нм, НЧ В – 134 ± 12 нм и НЧ Мо – 51.0 ± 2.1 нм. НЧ Mn и Fe имеют оксидные фазы: НЧ Fe содержат 72% Fe_3O_4 , тогда как НЧ Mn – 4.0–8.0% MnO . НЧ Мо состоят из кристаллического металла и 36% карбида димolibдена. НЧ В имеют аморфное строение и содержат 92.5% бора, 7.2% углерода и 0.3% кислорода (рис. 1)

Синтезированные нанопорошки металлов вводили в состав нанобиопрепаратов для предпосевной обработки риса.

При приготовлении препаратов НЧ металлов определенной навески диспергировали в воде на ультразвуковом дезинтеграторе “Scientz JY 92-IIN” (Китай) в режиме 0.5 А, 44 кГц, время – 30 с, перерыв 30 с (повтор – 3 раза) при охлаждении диспергируемой смеси льдом. Полученные суспен-

зии НЧ металлов в воде добавляли в раствор 0.1%-ной натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (Na-КМЦ) и натриевой соли диэтилдiamинотетрауксусной кислоты (Na_2 -ЭДТА) (0.00000375%). Прибавляли фунгицид (беномил) и краситель Родамин 6G. Полученный раствор озвучивали, семена риса замачивали в нем на 24 ч. Семена контрольной группы замачивали в дистиллированной воде с добавлением фунгицида (беномил) и красителя Родамина 6G.

В качестве объекта исследования выбрано растение риса *Oryza sativa* L. сорта Taichug (тайваньский сорт).

Для проращивания семян риса использовали рулонный способ (ГОСТ 12038-84, РФ) при температуре $32 \pm 1^\circ\text{C}$, первые четверо суток без света, с пятых по седьмые сутки в условиях освещения. Опыты проводили дважды с использованием 50 семян в каждом варианте предпосевной обработки.

Энергию прорастания определяли на четвертые сутки. Всхожесть семян оценивали на седьмые сутки (ГОСТ 12038-84, РФ), а также измеряли высоту побега, длину главного корня, свежую

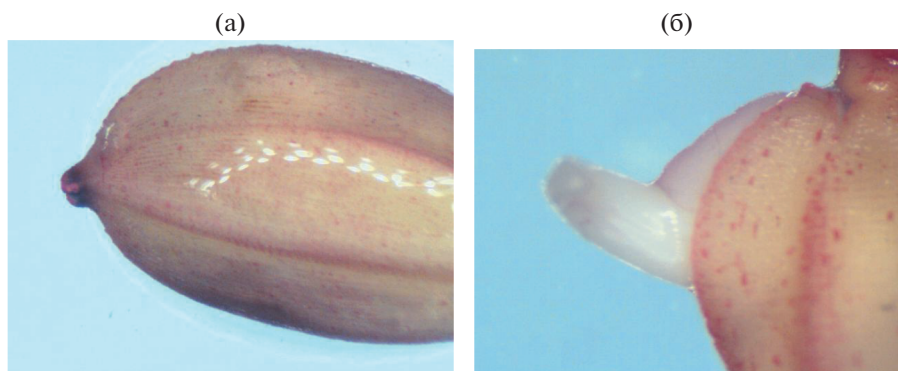


Рис. 2. Фото зерновки риса, покрытой полимерной пленкой до (а) и после прорастания (б).

и сухую массы надземной части и корневой системы растений. Рассчитывали индекс энергии прорастания и индекс жизнеспособности семян/проростков [25].

Морфолого-анатомические исследования листа проростка выполнены на микроскопе Primo Star (“Zeiss”, Германия). Оценивали толщину листа, мезофилла, площадь третьего проводящего пучка от центральной жилки, площадь водоносной ткани между третьим и вторым проводящим пучком. Измерения проводили с помощью программы AxioVision.

Статистическую обработку данных осуществляли в программах Microsoft Excel 2010 и Statistica 20 (“StatSoft, Inc.”, США). Определяли средние значения изучаемых показателей и стандартные ошибки среднего. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (*t*-критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали статистически значимыми при $p \leq 0.05$ и $p \leq 0.01$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При разработке препарата для предпосевной обработки рисовых семян учитывали особенности культивирования риса, поэтому в его состав входят фунгицид, микроэлементы пролонгированного действия в виде НЧ, полимеры. Ровным слоем препарата покрывается поверхность зерновки. На рис. 2 представлены фото семян риса, полученные на оптическом микроскопе. Видно, что при предпосевной обработке семян формируется полимерная гидрофильная пленка толщиной не более 10 мкм (рис. 2а), которая не нарушает процесс прорастания семян (рис. 2б).

На рис. 3 приведены фото сеянцев риса контрольной группы и сеянцев, полученных после предпосевной обработки семян НЧ Мо в концентрации $10^{-7}\%$ в составе препарата. Видно, что сеянцы после предпосевной обработки семян

НЧ Мо имеют более развитый росток и корневую систему по сравнению с контролем.

В табл. 1 представлены изменения показателей всхожести семян риса после предпосевной обработки нанобиопрепаратами различного состава. Видно, что наилучшие показатели энергии прорастания и всхожести семян получены при использовании НЧ Fe в концентрации $10^{-7}\%$ и композиции НЧ, содержащей $10^{-5}\%$ НЧ В, $10^{-7}\%$ НЧ Мо, $10^{-6}\%$ НЧ Mn и $10^{-7}\%$ НЧ Fe в составе препарата для предпосевной обработки семян. При этом показатели энергии прорастания и всхожести семян на 8 и 10% выше контроля соответственно. Наибольший индекс прорастания семян обнаружили при использовании НЧ Fe в концентрации $10^{-7}\%$, далее по эффективности воздействия следует обработка НЧ В ($10^{-5}\%$) и Mn ($10^{-6}\%$).

В табл. 2 представлены данные по изменению морфометрических показателей проростков риса. Видно, что наилучшие морфометрические показатели характерны для ростков риса, выращенных при предпосевной обработке НЧ Fe в концентрации $10^{-7}\%$: их высота на 31.5% превышает высоту ростков контрольных растений, длина корня увеличилась в 3 раза по сравнению с контролем. Предпосевная обработка семян риса нанобиопрепаратом, содержащим НЧ Мо в концентрации $10^{-7}\%$, увеличивает высоту ростка и длину корня на 5.21 и 26.7% соответственно по сравнению с контрольной группой. Обработка семян композицией НЧ способствует увеличению высоты ростка на 1.4%, длины корня — на 36.4%.

Индекс жизнеспособности семян/проростков (произведение длины проростка (суммы высоты ростка и общей длины корня) и всхожести семян) показал, что наибольший эффект наблюдается при обработке семян риса НЧ Fe в концентрации $10^{-7}\%$ в составе препарата. Активность по этому показателю убывает в следующем ряду: НЧ Fe ($10^{-7}\%$) > ком-

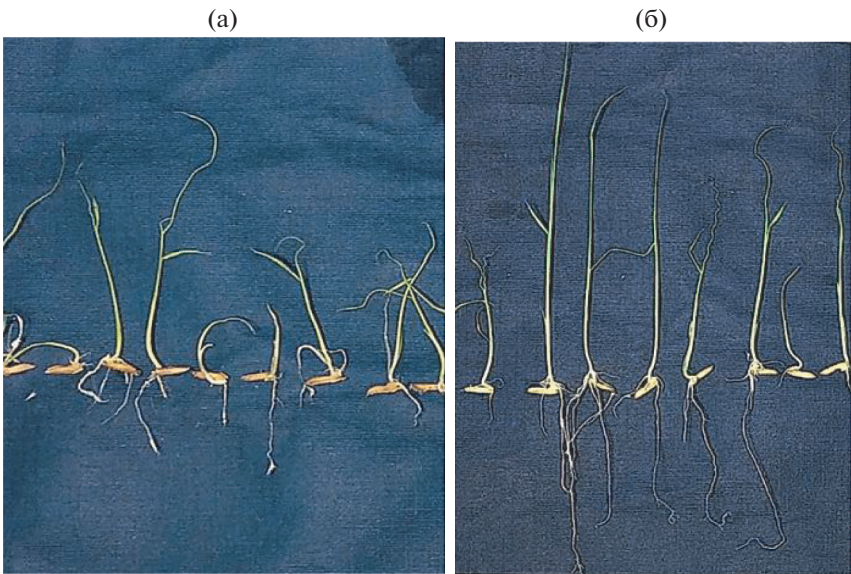


Рис. 3. Фото сеянцев контрольной группы (а) и сеянцев после предпосевной обработки семян НЧ Мо в концентрации $10^{-7}\%$ через 7 сут выращивания (б).

позиция НЧ (НЧ В ($10^{-5}\%$), Мо ($10^{-7}\%$), Мн ($10^{-6}\%$) и Fe ($10^{-7}\%$)) > НЧ Мо ($10^{-7}\%$) > контроль.

В табл. 3 представлены данные количественного анализа изменений анатомии листа сеянцев риса при предпосевной обработке семян НЧ.

При обработке семян риса НЧ отдельных элементов: Мо ($10^{-8}\%$), Fe ($10^{-7}\%$), Мн ($10^{-5}\%$) и В ($10^{-4}\%$), наблюдается достоверное увеличение площади водоносной ткани на 74.3, 53.5, 46.5 и 45.8% соответственно, при воздействии композиции НЧ – на 72.2% по сравнению с контролем. Предпосевная обработка семян риса НЧ В ($10^{-4}\%$), НЧ Мо ($10^{-8}\%$), НЧ Мн ($10^{-5}\%$) и их комбинацией приводит к увеличению толщины листьев сеянцев на 15.5, 6.2, 6.8 и 21.9% соответственно по сравнению с контролем. Толщина мезофилла широкой части листа при предпосевной обработ-

ке семян композицией НЧ (В ($10^{-4}\%$), Мо ($10^{-8}\%$), Мн ($10^{-5}\%$) и Fe ($10^{-7}\%$)) достоверно увеличивается на 22.9% в сравнении с контролем. Кроме того, наблюдается рост площади проводящего пучка листа на 66.5% по сравнению с контрольным растением. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии индивидуальных НЧ и их композиции (В $10^{-5}\%$ + Мо $10^{-8}\%$ + Мн $10^{-5}\%$ + Fe $10^{-7}\%$) при предпосевной обработке семян на анатомические показатели листьев.

ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что одной из главных проблем при возделывании риса является его низкая полевая всхожесть, в большинстве случаев не превышаю-

Таблица 1. Влияние предпосевной обработки семян риса нанобиопрепаратами различного состава на энергию их прорастания и всхожесть

Состав нанобиопрепарата, %	Энергия прорастания, %	Всхожесть, %	Индекс энергии прорастания, отн. ед.
В (10^{-5})	55.0 ± 2.5	67.0 ± 2.1	0.17
Мо (10^{-7})	90.0 ± 3.1	82.0 ± 1.2	0.11
Мн (10^{-6})	58.0 ± 2.8	58.0 ± 1.9	0.17
Fe (10^{-7})	93.0 ± 3.6	93.0 ± 0.6	0.19*
В (10^{-5}) + Мо (10^{-7}) + Мн (10^{-6}) + Fe (10^{-7})	93.0 ± 3.4	95.0 ± 0.4	0.10
Контроль	85.0 ± 3.2	85.0 ± 1.3	0.11

*Данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартная ошибка. Результаты статистически значимы при $p \leq 0.05$.

Таблица 2. Влияние предпосевной обработки семян риса нанобиопрепаратами различного состава на морфометрические показатели проростков

Состав нанобиопрепарата, %	Высота ростка, см	Длина корня, см	Индекс жизнеспособности семян/проростка
B (10^{-5})	5.09 ± 2.29	3.24 ± 2.06	558.11
Mo (10^{-7})	6.05 ± 2.78	4.18 ± 2.08	838.26
Mn (10^{-6})	6.23 ± 1.85	2.21 ± 1.98	489.52
Fe (10^{-7})	7.52 ± 1.78	$9.93 \pm 2.76^*$	1622.85*
B(10^{-5}) + Mo(10^{-7}) + + Mn(10^{-6}) + Fe(10^{-7})	5.83 ± 2.77	4.50 ± 4.05	981.35
Контроль	5.75 ± 2.43	3.30 ± 2.07	769.25

*Данные представлены в виде среднего значения $\pm$ стандартная ошибка. Результаты статистически значимы при $p \leq 0.05$.

Таблица 3. Количественные изменения анатомических показателей листа проростков риса при предпосевной обработке нанопрепаратами различного состава

Состав нанобиопрепарата, %	Лист	Мезофилл		Проводящий пучок	Водоносная ткань
	Толщина, мкм	Толщина в широкой части, мкм	Толщина в узкой части, мкм	Площадь, мкм ²	Площадь, мкм ²
Контроль	81.45 ± 7.20	62.35 ± 5.81	29.95 ± 1.83	2097.22 ± 21.00	661.03 ± 6.20
B (10^{-4})	94.10 ± 8.32	66.22 ± 6.50	34.05 ± 2.85	1256.97 ± 10.98	964.12 ± 8.74
Mo (10^{-8})	86.48 ± 7.37	66.28 ± 5.91	31.16 ± 1.96	2728.14 ± 21.54	$1152.74 \pm 10.82^{**}$
Mn (10^{-5})	87.00 ± 7.96	69.30 ± 6.25	28.63 ± 2.54	2407.96 ± 22.03	$969.10 \pm 7.45^*$
Fe (10^{-7})	78.13 ± 6.30	58.69 ± 5.13	27.94 ± 2.32	1460.59 ± 10.44	$1015.65 \pm 11.25^*$
B (10^{-4}) + Mo (10^{-8}) + + Mn (10^{-5}) + Fe (10^{-7})	$99.35 \pm 8.34^*$	$76.64 \pm 6.95^*$	29.19 ± 2.90	$3493.72 \pm 27.90^*$	$1138.79 \pm 10.82^{**}$

Примечание. Данные представлены в виде среднего ($\bar{x}$) $\pm$ стандартная ошибка (SE) при $n = 100$. Результаты статистически значимы при $p \leq 0.05^*$ и $p \leq 0.01^{**}$.

шая 20–35% [21]. Для повышения всхожести используют различные методы и подходы, позволяющие увеличить энергию прорастания семян, повысить иммунитет и защитить от возбудителей болезней. Для этого семена риса после очистки, сортировки, протравливания подвергают воздушно-тепловому нагреву за двое–трое суток до посева. Для сокращения сроков набухания семян проводят процедуры, влияющие на их водную фазу, используя такие физико-химические воздействия, как омагничивание, озонирование, электрохимическую активацию, изменение кислотности, холодовой стресс, обработку микроэлементами и др. [21]. Обычно используемые микроэлементы вводят в виде ионов в составе солей. В проведенном исследовании были взяты НЧ микроэлементов, обладающие уникальными свойствами (низкой токсичностью по сравнению с солями, пролонгированным действием, стимуляцией обменных процессов при использовании

биотических концентраций), которые введены в состав полимеров для их равномерного распределения и удобства обработки семян. Фотографии зерновки, полученные на оптическом микроскопе, свидетельствуют о формировании пленки на поверхности семян, которая не нарушает процесс прорастания. Активное влияние на показатели всхожести семян (энергию прорастания, индекс энергии прорастания, жизнеспособность семян/проростков) и морфометрические изменения сеянцев оказывают НЧ Fe ($10^{-7}\%$), далее следуют НЧ Mo ($10^{-7}\%$), НЧ Mn ($10^{-6}\%$) и их композиция. В [7, 8] наблюдали подобные изменения. Следует отметить характерную особенность действия НЧ железа на растения. Независимо от размера частиц, их фазового состояния и вида растений НЧ Fe стимулируют формирование мощной корневой системы благодаря влиянию на содержание фитогормонов и активность антиокси-

дантных ферментов [18, 26–28]. Эффективное воздействие НЧ железа на прорастание семян может быть обусловлено участием ионов металлов, образующихся в воде и биосредах при окислении НЧ, в фентон-реакции, генерирующей ОН-радикалы, которые могут индуцировать разрыхление клеточной стенки семян, что обеспечивает активный транспорт воды, необходимой для приведения в действие цепочки реакций, в результате которых наступает прорастание [26]. Учитывая исключительное значение бора в физиологическом функционировании высших растений [29], для предпосевной обработки семян риса использовали его НЧ. Однако предпосевная обработка семян НЧ В ухудшает показатели всхожести, длины корня и ростка. НЧ Mn при предпосевной обработке риса увеличивают длину ростка, но снижают длину корня, что было показано на примере бобовых [30]. Наблюдая разнонаправленные эффекты НЧ индивидуальных металлов на общие параметры прорастания семян и рост сеянцев риса, проверили ответную реакцию комбинации этих НЧ и установили, что сочетание НЧ оказывает положительное влияние на энергию прорастания и всхожесть семян, но тормозит рост корня и ростка на 18 и 50.7% соответственно по сравнению с контролем. Исследования [18] свидетельствуют не только об изменениях общих показателей роста растений при действии НЧ, но и о структурных перестройках, наиболее выраженных в листьях растений. Площадь листьев, их анатомическое строение выступают важным условием высокой продуктивности растений, обуславливают интенсивный процесс фотосинтеза, высокое нарастание биологической массы, что существенно влияет на урожай. Известно, что рис отличается от других зерновых культур способностью расти и развиваться в воде. Без избытка воды рис не дает высоких результатов. Согласно полученным данным наибольшее влияние на площадь водоупорной ткани листа оказывает обработка семян риса НЧ Mo ($10^{-8}\%$), Fe ($10^{-7}\%$), Mn ($10^{-5}\%$), B ($10^{-4}\%$) и их композицией – наблюдается достоверное увеличение площади водоносной ткани. Предпосевная обработка семян риса индивидуальными НЧ и их комбинацией приводит к увеличению толщины листьев сеянцев. Такое увеличение толщины листа происходит за счет мезофилла, внутренней хлорофиллоносной ткани, выполняющей основную функцию фотосинтеза. Кроме того, при использовании комбинации НЧ наблюдается увеличение площади проводящего пучка листа вплоть до 66.5% по сравнению с контролем, что обеспечивает активный минеральный и водный обмен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предпосевная обработка семян риса НЧ индивидуальных микроэлементов (Fe в концентрации $10^{-7}\%$) и их композицией позволяет повысить показатели всхожести семян на 11.8%, улучшить морфометрические показатели сеянцев: НЧ Fe ($10^{-7}\%$) способствуют увеличению длины корня проростков в 3 раза, а индекса жизнеспособности семян/проростков на 110.9% по сравнению с контролем. Количественные изменения анатомических показателей листа проростков риса при действии НЧ микроэлементов показывают увеличение площади водоносной и хлорофиллсодержащей ткани на 72.2 и 22.9% соответственно, площади проводящих пучков – на 66.5%, а толщины листа – на 21.9% по сравнению с контролем. Полученные данные свидетельствуют о структурных перестройках, максимально обеспечивающих лист полноценным и необходимым питанием. Результаты исследования позволяют предполагать перспективность использования НЧ микроэлементов для предпосевной обработки семян риса.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lijuan Z., Li L., Aodi W. et al. // J. Agric. Food Chem. 2020. V. 68. № 7. P. 1935. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
2. Shang Y., Hasan M.K., Ahammed G.J. et al. // Molecules. 2019. V. 13. P. 2558. <https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
3. Handford C.E., Dean M., Henchion M. et al. // Trends Food Sci. Technol. 2014. V. 40. P. 226. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2014.09.007>
4. Khot L.R., Sankaran S., Maja J.M. et al. // Crop Prot. 2012. V. 35. P. 64. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2012.01.007>
5. Ghormade V., Deshpande M.V., Paknikar K.M. // Biotechnol. Adv. 2011. V. 29. P. 792. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2011.06.007>
6. Pradhan S., Mailapalli D.R. // J. Agric. Food Chem. 2017. V. 65. P. 8279. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02528>
7. Ruttkay-Nedecky B., Krystofova O., Nejdl L., Adam V. // J. Nanobiotechnol. 2017. V. 15. P. 1. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0268-3>
8. Husen A., Siddiqi K.S. // Nanoscale Res. Lett. 2014. V. 229. P. 1. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-9-229>
9. Elsharkaway M.M., Derbalah A. // Pest Manag. Sci. 2018. V. 75. № 3. P. 828. <https://doi.org/10.1002/ps.5185>
10. Alghuthaymi M.A., Almoammar H., Rai M. et al. // Biotechnol. Biotechnol. Equip. 2015. V. 29. P. 221. <https://doi.org/10.1080/13102818.2015.1008194>

11. *El-Temsah Y.S., Joner E.J.* // Environ. Toxicol. 2012. V. 27. P. 42.
<https://doi.org/10.1002/tox.20610>
12. *Feng Y., Cui X., He S. et al.* // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47. P. 9496.
<https://doi.org/10.1021/es402109n>
13. *Глуценко Н.Н., Богословская О.А., Ольховская И.П.* // Химическая физика. 2002. Т. 21. № 4. С. 79.
14. *Rakhmetova A.A., Alekseeva T.P., Bogoslovskaya O.A. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2010. V. 5. P. 271.
<https://doi.org/10.1134/S199507801003016X>
15. *Bogoslovskaja O.A., Rakhmetova A.A., Ovsyannikova M.N. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2014. V. 9. P. 82.
<https://doi.org/10.1134/S1995078014010042>
16. *Rakhmetova A.A., Bogoslovskaja O.A., Olkhovskaya I.P. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2015. V. 10. P. 149.
<https://doi.org/10.1134/S1995078015010164>
17. *Zhao H., Liu M., Chen Y. et al.* // The method for cultivation of plants using metal nanoparticles and the nutrient medium for its implementation. PCT. Patent № CN 108471713 B. 2020.
18. *Yuan J., Chen Y., Li H. et al.* // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 3228.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w>
19. *Mehmood A.* // IET Nanobiotechnol. 2018. V. 12. P. 701.
<https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2017.0273>
20. *Achhari G.A., Kowshik M.* // J. Agric. Food Chem. 2018. V. 66. P. 8647.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00691>
21. Экспертно-Аналитический центр Агробизнеса // www.ab-centre.ru.
22. *Шеуджен А.Х.* // Плодородие. 2016. № 5. С. 22.
23. *Броун М.Н.* Автореферат “Влияние железосодержащих удобрений на посевные качества семян и изменчивость элементов структуры урожая риса”... канд. с.-х. наук. Краснодар. Всероссийский научно-исследовательский институт риса, 2004.
24. *Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L. et al.* // J. Alloys Compds. 2019. V. 778. P. 271.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
25. <https://seednet.gov.in/PDFFILES/Chapter%2015.pdf>
26. *Rui M., Ma C., Hao Y. et al.* // Front Plant Sci. 2016. V. 7. P. 815. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00815.eCollection>
27. *Tombuloglu H., Slimani Y., Tombuloglu G. et al.* // Chemosphere. 2019. V. 226. P. 110.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.075>
28. *Duran N.M., Medina-Llamas M., Cassanji J.G.B. et al.* // J. Agric. Food Chem. 2018. V. 66. P. 5746.
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00557>
29. *Shireen F., Nawaz M.A., Chen C. et al.* // Int. J. Mol. Sci. 2018. V. 19.
<https://doi.org/10.3390/ijms19071856>
30. *Pradhan S., Patra P., Das S. et al.* // Environ. Sci. Technol. 2013. V. 47. P. 13122.
<https://doi.org/10.1021/es402659t>