



ИСПЫТАНИЕ НАНОЧАСТИЦ МАКРО- И МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУРАХ

✉ Тимофеев В.Н., Вьюшина О.А.

*Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья –
филиал Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук
Тюмень, Россия*

✉ e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

Исследования проведены в северной лесостепи Тюменской области. В лабораторных и полевых условиях испытаны различные формы и дозировки наночастиц макро- и микроэлементов и сопутствующих веществ при обработке семян и растений яровой тритикале и пшеницы. Препараты имели положительное влияние на прорастание семян, более высокие нормы снижали показатели энергии и всхожести. Энергия прорастания и всхожесть семян тритикале повышались на 4–10% при применении препаратов с содержанием наночастиц меди, марганца, молибдена, биогенного железа, Титана М. Обработка суточных проростков препаратами марганца, кальция, молибдена, Титана М, биогенного железа, бора, калия способствовала увеличению длины ростка на 7-е сутки на 7,8–25%, массы ростка на 6–8%. На применение калия реагировали только уже развивающиеся ростки. Отмечено, что применение биогенного железа вызывает снижение лабораторной всхожести семян на 4–10%, но способствует развитию главного корня. Его увеличение составило 9–12% по сравнению с контролем. Включение биогенного железа и кремния в смесь к химическому протравителю снижало эффективность против корневых гнилей от 18% в начале вегетации до 30% к периоду уборки. Применение биогенного железа способствовало повышению урожайности на 0,5–0,6 т/га, или 23%, в системе комплексной защиты культуры по сравнению с контролем и на 0,16–0,23 т/га – со стандартной схемой защиты культуры. Отмечено положительное влияние биогенного железа при обработке растений в фазу колошения как отдельного элемента технологии, так и в баковой смеси с фунгицидами.

Ключевые слова: наночастицы, макроэлементы, микроэлементы, зерновые культуры, урожайность, эффективность, болезни растений

TESTING OF MACRO- AND MICRONUTRIENT NANOPARTICLES ON GRAIN CROPS

✉ Timofeev V.N., Vyushina O.A.

*Research Institute of Agriculture of the Northern Trans-Urals – Branch of the Tyumen Scientific
Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Tyumen, Russia*

✉ e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

The studies were conducted in the northern forest-steppe of the Tyumen region. Under laboratory and field conditions, different forms and dosages of macro- and micronutrient nanoparticles and associated substances were tested in the treatment of seeds and plants of spring triticale and wheat. The preparations had a positive effect on seed germination, while higher rates reduced energy and germination. The germination energy and germination of triticale seeds increased by 4–10% with the application of preparations containing nanoparticles of copper, manganese, molybdenum,

biogenic iron, Titan M. Treatment of daily seedlings with manganese, calcium, molybdenum, Titan M, biogenic iron, boron, potassium increased sprout length by 7.8-25% and sprout weight by 6-8% by day 7. Only already developing sprouts responded to the application of potassium. It was noted that the application of biogenic iron causes a 4-10% decrease in laboratory germination of seeds, but promotes the development of the main root. Its increase was 9-12% compared to the control. The inclusion of biogenic iron and silicon in the mixture to the chemical dressing reduced the effectiveness against root rot from 18% at the beginning of the growing season to 30% by the harvesting period. The application of biogenic iron increased the yield by 0,5-0,6 t/ha or 23% in the system of complex crop protection compared to the control and by 0,16-0,23 t/ha with the standard scheme of crop protection. A positive effect of biogenic iron in the treatment of plants during the earing phase as a separate element of the technology and in a tank mixture with fungicides was noted.

Keywords: nanoparticles, macroelements, microelements, grain crops, yield, efficiency, plant diseases.

Для цитирования: Тимофеев В.Н., Вьюшина О.А. Испытание наночастиц макро- и микроэлементов на зерновых культурах // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2022. Т. 52. № 1. С. 37–47. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-1-4>

For citation: Timofeev V.N., Vyushina O.A. Testing of macro- and micronutrient nanoparticles on grain crops. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki* = *Siberian Herald of Agricultural Science*, 2021, vol. 52, no. 1, pp. 37–47. <https://doi.org/10.26898/0370-8799-2022-1-4>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Благодарность

Работа выполнена в рамках раздела государственного задания № 121041600036-6.

Acknowledgements

The work is performed within the section of the state task No. 121041600036-6

ВВЕДЕНИЕ

В системе возделывания сельскохозяйственных культур протравливание семян является наиболее простым способом повышения качества посевного материала [1, 2]. Применение химических средств защиты растений имеет регуляторное влияние как на вредные объекты, так и на саму культуру, ее рост и развитие. Негативное влияние их возможно скорректировать применением в комплексе препаратов для активации роста и снижения стресса. Использование микроудобрений способствует повышению прорастания семян и росту вегетативной части растений в первые фазы онтогенеза¹ [3, 4]. Стимуляция ростовых процессов может выражаться в изменении влияния на органы растений, что показывает различия в на-

правленности действия препаратов [5–7]. Использование некорневых подкормок хелатными соединениями железа способствовало увеличению показателей структуры урожая [8, 9], применение микроудобрений по вегетации в смеси с азотом повлияло на динамику роста яровой пшеницы [10], подкормки хелатами цинка, меди и серы – на качество зерна [11]. Пролонгированное использование хелатированных форм микроэлементов приводит к угнетению ростовых процессов по сравнению только с обработкой семян² [12, 13].

Уменьшение объема вещества или частицы до наночастиц для улучшения условий проникновения и доставки в растения необходимых веществ должно способствовать прорастанию семян, ускорять рост растений, повышать урожайность и защищать

¹Аникина Л.М., Удалова О.Р., Панова Г.Г. Влияние предпосевной обработки семян яровой пшеницы кремнийсодержащими хелатными микроудобрениями на рост и развитие ее проростков // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы V междунар. науч.-практ. конф. Симферополь: ИТ «Ариал», 2020. С. 13–15.

²Чирко Е.М., Тимошенко В.Г. Влияние регуляторов роста и микроудобрений на прорастание семян яровой пшеницы // Сельское хозяйство – проблемы и перспективы: сб. науч. тр. Гродно: ГТАУ, 2019. Т. 45: Агрономия. С. 193–201.

растения от воздействия окружающей среды [14, 15].

В исследованиях иранских ученых добавление питательной среды с содержанием частиц селена рассматривалось как многообещающий подход к изменению роста, морфологии, метаболизма и анатомии растений, однако при этом возникло понимание фитотоксичности такого использования, при котором определенно вносятся существенные эпигенетические вариации в ДНК. Такие результаты и по другим наноматериалам: проявляются генетическое повреждение пшеницы, токсическое воздействие на первичное развитие растений, подчеркивается их нестабильность в окружающей среде и цитотоксическое воздействие на растения. Это обуславливает четкую проработку безопасных норм применения наноматериалов на биологических объектах³ [16, 17]. Готовые макро- и микроэлементные составы предлагаются для применения в основные фазы онтогенеза растений в комплексе с пестицидами, а также как отдельный элемент технологии, направленный на повышение качественных характеристик или продуктивности сельскохозяйственных растений за счет накопления биомассы и увеличения ассимиляционной поверхности⁴.

Цель исследования – определить влияние препаративных форм с содержанием наночастиц макро- и микроэлементов для обработки семян и вегетирующих растений зерновых культур.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследования проведены в лабораторных и полевых условиях Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья – филиала Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, зона северной лесостепи. Учеты и наблюдения выполняли

по стандартным методическим указаниям, принятым в Госсортсети, растениеводстве и защите растений. В лабораторных условиях проводили сравнительную оценку и выбор наиболее положительно влияющих на энергию, всхожесть и ростовые функции растворов макро- и микроэлементов (азот, фосфор, калий, кальций, марганец, магний, молибден, бор, цинк, медь, биогенное железо, Титан М и их смесей). Содержание основного действующего вещества составляло 10–40 мг/мл, сопутствующие вещества в виде серебра – 1 мг/мл, стабилизаторы нанодисперсности поливинилпирролидон – 20%, гидролизат коллагена – 15%. Вариаций по каждому элементу не менее шести. Из них выбраны варианты с наиболее положительным влиянием и изучены во втором этапе исследований.

Обработку семян перед посевом проводили с часовой экспозицией. Приготовление рабочего раствора рассчитывали на 100 г семян, нормы применения препаратов от 1 до 100 мл/г или на 1 га в зависимости от типа опыта. Определение влияния воздействия препаратов при обработке семян и суточных проростков проводили в чашках Петри и во влажных рулонах. Фитоэкспертизу семян, оценку пораженности посевного материала различными патогенами осуществляли на 7-е сутки. Затем проводили посев семян с суточным прорастанием после обработки препаратами по 20 шт. на чашку в пяти повторениях. При закладке образцов руководствовались ГОСТ 12038–84⁵. Учитывали длину ростка, корня, массу вегетативных органов, снижение количества грибов на семенах. В опыте использованы семена яровой тритикале. В полевых условиях проведена оценка биогенного гидроксида железа (ферригидрита) производства Красноярского научного центра в системе защиты яровой пшеницы.

³Наноциды могут стать альтернативой обычным инсектицидам: [Электронный ресурс] URL: <https://glavagronom.ru/news/nanopesticidy-mogut-stat-alternativoy-obychnym-insektitsidam>, <https://www.azonano.com>.

⁴Попова В.В., Гоман Н.В., Киреева М.А. Влияние некорневой подкормки хелатами цинка и меди на качество зерна яровой пшеницы при возделывании на лугово-черноземной почве // Экологические чтения – 2020: материалы XI Национальной науч.-практ. конф. с международным участием. Омск, 2020. С. 459–464.

⁵ГОСТ 12038–84 Семена сельскохозяйственных культур. Методы анализа. М.: Изд-во стандартов, 2004. 47 с.

Биогенное железо применяли в соответствующие фазы развития для определения его влияния на развитие растений пшеницы, болезни, урожайность. Почва опытного участка темно-серая лесная тяжелосуглинистая. Закладка полевого опыта выполнена при стандартных агротехнических условиях в мелкоделяночном опыте с площадью деланки 20 м² с четырехкратным повторением. В период вегетации определяли пораженность корневыми гнилями и листостебельными болезнями.

Урожайность учитывали путем отбора снопового материала, механическим обмолотом деланок. Анализ семян на параметры качества проводили по соответствующим ГОСТам⁶. Обработка статистических данных осуществлена с использованием программы Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В лабораторных исследованиях получены результаты различного влияния применения препаратов с содержанием наночастиц макро- и микроэлементов. С более 20 препаратами с разными нормами применения провели сравнительную оценку. Отмечены положительный эффект действия препаратов или его отсутствие. Смеси, состоящие из 3–5 веществ, показывали нейтральное или отрицательное влияние при увеличении элементов и норм применения.

Препараты с содержанием меди, цинка, бора, кальция и готовые смеси Р + К со стабилизатором ПВП (поливинилпирролидон) + модификатор Ag-C, N + Р + ПВП + Ag-C при норме раствора 5 мл/т оказывали положительное влияние на прорастание. Более высокие нормы снижали показатели энергии и всхожести.

Энергия прорастания семян тритикале повышалась при применении препаратов с содержанием меди, марганца, молибдена, биогенного железа, Титана М. Увеличение энергии роста составило 4–10%. Превосходство было по препаратам Титан М в норме 500 мл/т (+7%), молибден – 10–50 мл/т (+10,

+7%). В итоге из 58 вариаций положительное влияние выявлено у пяти препаратов с определенными нормами (см. табл. 1).

Всхожесть семян по некоторым вариантам была на уровне изначальной энергии прорастания или имела увеличение в зависимости от применяемого элемента. Значительное увеличение всхожести отмечено по препаратам кальция, марганца в норме 5 мл/т (+4, +5%), Титана М – 500 и молибдена – 10–50 мл/т (+6, +10%).

Изучение наночастиц марганца (сульфат моногидрат) в большинстве вариаций оказывало стимулирующее действие на ростовые процессы яровой тритикале, но применение в качестве стабилизатора нанодисперсности гидролизата коллагена (ГК) снижало положительное действие препарата при обработке семян. Марганец в норме до 20 мг/т в изучаемых комбинациях в комплексе со стабилизатором (ПВП) способствовал повышению энергии, всхожести, роста вегетативных органов, что предполагает его использование в качестве стимулирующего агента при обработке семян.

В вариантах с магнием определены вариации с положительным влиянием на всхожесть: Mg 10–20 мг + ПВП при норме 1–5 мл/т, Mg 10 мг + ГК с нормой 1 мл/т. Большее воздействие на развитие корня отмечено при применении Mg 10 мг + Ag (серебро) 1 мл + ПВП при норме 1 мл/т. Все вариации магния имели положительное влияние (при норме от 1 мл/т) на развитие ростка с увеличением его длины на 1,1–2,1 см и ограничением роста coleoptile на 0,5–1,2 см. Обработка суточных ростков в норме 5 мл препаратами Mg 20 мг + ПВП; Mg 10 мг + Ag 1 мл + ГК способствовала увеличению длины ростка на 2,7–2,9 см, массы – на 1,0–1,3 г.

Применение одного и того же препарата при обработке семян и уже развивающихся растений может по-разному влиять на их начальный рост. Сравнивали два критерия: общую длину всех ростков (в среднем 9–15 см) и длину ростков с нормальным здоровым развитием (13,0–15,0 см). Отмечено,

⁶ГОСТ 1386.5-93, ГОСТ 30483-97, ГОСТ 12042-80, ГОСТ 10840-64, ГОСТ 13586.1-68.

Табл. 1. Энергия и всхожесть семян при обработке препаратами, %

Tabl. 1. Energy and germination of seeds when treated with preparations, %

№ п/п	Вариант	Энергия	Всхожесть
1	К, 10 мл + N, 5 мл + SiO ₂ , 1 мл + Ca, 5 мл/т	86–88 (+1)	88–91 (+2)
2	Cu 2, 5 мл (> снижает энергию и всхожесть)	89–91 (+4)	89–91 (+3)
3	Mn 3, 5 мл/т (> на уровне контроля))	89–91 (+4)	91–92 (+4)
4	Ca 5, 5 мл/т (> снижает энергию и всхожесть)	86–91 (+2)	90–94 (+5)
5	Биогенное железо, 5 мл/т	88–91 (+4)	87–92 (+3)
6	Титан М, 50 мл/т	88–92 (+4)	87–93 (+3)
7	Титан М, 500 мл/т	92–94 (+7)	91–95 (+6)
8	Mo 2, 5 мл/т	87–90 (+3)	89–91 (+3)
9	Mo 2, 10 мл/т	95–97 (+10)	96–98 (+10)
10	Mo 2, 50 мл/т	91–94 (+7)	92–94 (+6)
11	Zn 2000 ppm, 10 мл/т	82–85 (–2)	82–87 (–2)
12	Mg, 20 мг/мл + ПВП частицы < 10 нм, 1–5 мл/т	84–88 (–)	87–91 (+2)
13	4 В 5 мг/г + ГК (10 %), 1 мл/т	83–87 (–1)	84–88 (–1)
14	P + K 10–12 мг/г + ПВП 15% + Ag-C 0,5 мг/г, 500 мл/т	83–88 (–)	83–88 (–1)
15	P + K 10–12 мг/г + ПВП 15% + Ag-C 0,5 мг/г, 1000 мл/т	85–87 (–)	87–89 (+1)
16	N + P 4–9 мг/г + ПВП 15% + Ag-C 0,5 мг/г, 10 мл/т	79–83 (–5)	82–86 (–3)
17	5 К, 10 мл/т	78–80 (–7)	88–90 (+2)
18	5 К, 50 мл/т	85–90 (+2)	88–90 (+2)
19	5 К, 100 мл/т	86–90 (+2)	87–91 (+2)
20	7 N, 100 мл/т (от 5–50 мл/т влияет положительно)	81–85 (–3)	88–92 (+3)
21	Контроль (вода)	84–88 (– 2,95)	86–88 (–)
	НСР ₀₅		2,99

Примечание. 1, 11–15, 18, 19 – нейтральное влияние; 16, 17, 20 – отрицательное; 3, 7, 9, 10 – положительное.

что по некоторым вариантам развитие ростков нормальное, без отставаний, по другим установлено влияние препарата по сдерживанию роста. Увеличение длины ростка наблюдали по препаратам Mn (10 мл/т), Ca (10), Mo (50), Титан М (50), биогенное Fe (5 мл/т), В (5 мг/г + ГК (10%), 1 мл/т), К (1000 мл/т). Из них значительное влияние оказали варианты: В 5 мг/г + ГК (10%), 1 мл/т, К 1000 мл/т. Увеличение длины ростка составило 1,0–3,2 см, или 7,8–25%, сырой массы ростка 0,5–1,4 г, или 6–8%. Обработка семян калием не оказала влияния на активность их прорастания, однако обработка прорастающего семени положительно повлияла на ростовые функции молодого растения. Угнетение роста растений тритикале наблюдали по следующим вариантам: Fe₃O₄, 5 + SiO₂, 2 + N, 5 + K, 10 мл/т; Fe₃O₄, 100 мл/т; Zn 2000 ppm, 10 мл/т; N + P

4–9 мг/г + ПВП 15 % + Ag-C, 10 мл/т. Отставание длины побега составило 1–3,5 см, массы – до 4 г. Нейтральное влияние (дозировка препарата недостаточная или само действие препарата имеет слабое влияние) имели варианты: Cu (2, 50 мл/т); Mn (3, 10 мл/т); Mo (2, 10 мл/т); Mg, (20 мг/мл) + ПВП < 10 нм, 1 мл/т); К (500 мл/т); N (10 мл/т). Влияние некоторых препаратов при сравнении общей длины ростка показывало отставание или было на уровне контроля, но при сравнении нормально развитых ростков их показатели увеличивались, что также подтверждается и сырой массой растений (см. табл. 2).

В полевом исследовании биогенного железа проводили обработку семян и растений по вегетации в основные фазы применения средств защиты. Всхожесть семян после обработки испытываемыми средствами в

Табл. 2. Рост растений яровой тритикале при обработке суточных проростков**Tabl. 2.** The growth of spring triticale plants when processing day old seedlings

№ п/п	Вариант	Нормально развитых растений, %	Длина ростка общая / нормально развитых растений, см	Масса ростка в пересчете на 100 растений, г
1	Fe ₃ O ₄ , 5 + SiO ₂ , 2 + N, 5 + K, 10 мл/т	85	11,71/12,61	9,05
2	Cu 2, 50 мл/т	85	12,70	9,47
3	Fe ₃ O ₄ , 100 мл/т	90	11,65/12,64	9,10
4	Mn 3, 10 мл/т	90	12,27/13,31	9,73
5	Ca 5, 10 мл/т	80	13,59	10,43
6	Ca 5, 50 мл/т	80	13,00	9,81
7	Биогенное Fe, 5 мл/т	90	13,58	9,88
8	Титан М, 50 мл/т	95	12,5/13,38	9,63
9	Mo 2, 10 мл/т	95	12,81	9,15
10	Mo 2, 50 мл/т	95	13,00/13,64	9,00
11	Zn 2000 ppm, 10 мл/т	90	9,25/9,88	5,85
12	Mg, 20 мг/мл + ПВП <10 нм, 1 мл/т	90	12,60	8,94
13	B 5 мг/г + ГК (10%), 1 мл/т	90	13,74–14,11	9,55
14	P + K 10–12 мг/г + ПВП15% + Ag-C, 10 мл/т	90	13,11	9,00
15	N + P 4–9 мг/г + ПВП15% + Ag-C, 10 мл/т	95	11,42	7,52
16	K, 500 мл/т	100	12,9	8,8
17	K, 1000 мл/т	95	14,33/15,96	9,62
18	N, 10 мл/т	90	12,69	8,61
19	Контроль (вода)	95	12,74	9,0
	HCP ₀₅	4,5	0,62	0,49

сравнении с контролем колебалась в пределах 60–79%. Отмечено влияние биогенного железа на снижение всхожести или торможение процессов прорастания семян. По мнению некоторых авторов, окислительный стресс, снижение прорастания семян могут вызвать наночастицы многих металлов (серебра, золота, железа), ферритов, а также оксидов цинка, никеля, меди, железа, титана, кремния [18–20]. Всхожесть семян при обработке биогенным железом снижалась на 4–10%. Применение железа, вероятно, необходимо ограничить для их обработки, так как это тормозит появление ростков и рост в первые фазы развития растений. Положительное влияние биогенное железо оказывало при обработке растений в период вегетации, особенно во время активного роста зеленых частей растения. Такое же влияние

обработка им оказывала на развитие корневой системы: рост главного корня увеличился на 1,2–1,8 см, или 9–12%, на 0,6–0,9 г его масса (см. табл. 3).

Применение химического протравливания снижало длину coleoptile, и ни один из препаратов не имел положительного влияния на его реакцию. Длина ростка имела достоверное увеличение на 1,7 см только в варианте, где применяли жидкое удобрение, в варианте с биогенным железом отмечено снижение длины на 2,2 см и массы ростка на 0,9 г.

Эффективность снижения инфекции на семенах при зараженности грибами рода *Alternaria* – 10–12%, *Fusarium* – 2–7, *Bipolaris sorokiniana* – 0–2% при обработке химическим протравителем составила 100%, при включении в смесь биогенного железа и кремния снижение равнялось 90–95%.

Табл. 3. Всхожесть и развитие зародышевых органов на 7-е сутки после обработки

Tabl. 3. Germination and development of germinal organs on the 7th day after treatment

Вариант обработки	Всхожесть, %	Длина корня, см	Масса корней, г	Длина колеоп- тите, см	Длина ростка, см	Масса ростков, г
Протравитель + инсектицид + удобрение	(72–82) 77	12,99	1,84	4,75	11,37	3,62
		+0,49	+0,13	–2,0	+1,72	–0,08
Контроль (без обработки)	(73–86) 78	12,5	1,71	6,75	9,65	3,70
		–	–	–	–	–
Протравитель + биогенное Fe, 1 мл	(66–76) 61	14,1	2,67	4,1	7,4	2,73
		+1,6	+0,96	–2,65	–2,25	–0,97
Протравитель + SiO ₂ , 1 мл	(74–84) 79	14,3	2,54	4,75	9,3	3,39
		+1,8	+0,83	–2,0	–0,35	–0,31
Протравитель + SiO ₂ , 1 мл + биогенное Fe, 1 мл	(72–84) 78	13,7	2,34	5,0	9,7	3,56
		+1,2	+0,63	–1,75	+0,05	–0,14
НСР ₀₅		1,08	0,54	1,72	1,6	0,36

Проявление корневых гнилей в начальный период вегетации имеет большое влияние на дальнейший рост, развитие и урожайность культуры. В фазу кущения развитие болезни без обработки химическим протравителем составило 1,4%, распространение – 5,6%. В течение вегетации поражение увеличилось в 3 раза. Химическое протравливание на 100% защищало растения от корневых гнилей до фазы начала трубкования. В процессе вегетации снижение защитной функции против развития болезни происходило до 78–84 и 71–79% против ее распространения. Включение биогенного железа и кремния в

смесь к химическому протравителю снижало эффективность против корневых гнилей на 18–22% в начальный период вегетации, к периоду уборки культуры – на 30–40%. При обработке стандартной смесью (протравитель фунгицидный + инсектицидный протравитель + удобрение) эффективность была выше на 8–17% по отношению к применению протравителя в смеси с железом, кремнием (см. табл. 4).

Урожайность культуры в условиях средней засоренности перед обработкой гербицидами и слабым проявлением листостебельных заболеваний в период вегетации

Табл. 4. Эффективность обработки против корневых гнилей, %

Tabl. 4. Treatment efficacy against root rot, %

Вариант обработки	Фаза кущения			Перед уборкой		
	Развитие	Распро- странение	Эффектив- ность	Развитие	Распро- странение	Эффектив- ность
Протравитель + инсектицид + удобрение	0	0	100	0,72–1,01	2,90–4,05	84,42–78,2
Контроль (без обработки)	1,4	5,62	–	4,65	13,95	–
Протравитель + биогенное Fe, 1 мл	0,25	0,99	82,38	1,35	4,59	70,96
Протравитель + SiO ₂ , 1 мл	0,25	1,01	82,02	1,76	5,04	62,15
Протравитель + SiO ₂ , 1 мл + биогенное Fe, 1 мл	0,3	0,96	78,5	1,42	4,66	69,46
НСР ₀₅	0,22	0,92	6	0,32	1,2	8

составила от 2,4 т/га в контроле. При применении комплекса средств защиты растений произошло увеличение на 0,4 т/га, при двукратном применении биогенного железа при протравливании семян и в фазу колошения – на 0,56 т/га, при применении биогенного железа в фазы кущения и колошения в комплексе с кремнием – на 0,63 т/га. НСР₀₅ составила 0,2, что достоверно превышает значение стандартной схемы защиты (протравитель фунгицидный + инсектицидный протравитель + удобрение). Применение только кремния было на уровне стандартной защиты. При оценке применения биогенного железа его положительное влияние отмечено при обработке в фазы кущения и колошения и с большей эффективностью в фазу начала колошения в комплексе с фунгицидами или без них.

ВЫВОДЫ

1. Положительное влияние на энергию прорастания (на 4–10%) и всхожесть семян яровой тритикале оказало применение препаратов с содержанием меди, марганца, молибдена, биогенного железа, Титана М. Из них явное преимущество было у препаратов Титана М и молибдена (+7, +10%).

2. Эффективность применения наночастиц микроэлементов усиливается при включении стабилизаторов, которые повышают или снижают воздействие элементов.

3. Воздействие микроэлементов при обработке суточных проростков на длину ростка отмечено у препаратов марганца, кальция, молибдена, Титана М, биогенного железа, бора, калия; увеличение длины ростка составило 7,8–25%, его массы – 6–8%.

4. Применение биогенного железа при предпосевной обработке семян совместно с химическим протравителем способствовало росту корней на 12%; всхожесть семян при обработке биогенным железом снижалась на 4–10%.

5. Применение макро- и микроэлементов в смеси с химическим протравливанием снижало эффективность против корневых гнилей в течение вегетации на 16–30%.

6. Применение биогенного железа спо-

собствовало повышению урожайности на 0,5–0,6 т/га, или 23%, в системе комплексной защиты культуры по сравнению с контролем и 0,16–0,23 т/га – со стандартной схемой защиты культуры. Отмечено положительное влияние биогенного железа при обработке растений в фазу колошения как отдельного элемента технологии, так и в баковой смеси с фунгицидами.

7. Применение наночастиц макро- и микроэлементов, описанных в данном исследовании, возможно как для предпосевной обработки семян, так и в период вегетации для стимулирования роста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сорока Т.А., Щукин В.Б., Ильясова Н.Я.* Влияние предпосевной обработки семян регуляторами роста, микроэлементами и препаратом Росток на урожайность и качество зерна озимой пшеницы на черноземе южном // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2017. № 2 (64). С. 21–24.
2. *Achhari G.A., Kowshik M.* Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2018. Vol. 66 (33). P. 8647–8661. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b00691.
3. *Колмыкова О.Ю., Черкасов О.В.* Сравнительная оценка безопасного влияния нанопорошков железа, кобальта и меди на физиологические и биометрические показатели огурца в условиях нечерноземной зоны // Вестник Рязанского государственного агро-технологического университета им. П.А. Костычева. 2018. № 1 (37). С. 31–36.
4. *Долгополова Н.В.* Эффективность действия микроэлемента молибдена на продуктивность озимой пшеницы в структуре севооборота // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 1. С. 48–52.
5. *Гоман Н.В., Попова В.В., Бобренко И.А., Гайдар А.А.* Влияние предпосевной обработки семян хелатами цинка и меди на урожайность и качество зерна яровой пшеницы при возделывании в условиях лесостепи Западной Сибири // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2019. № 4 (36). С. 6–12.

6. Prażak R., Świącilo A., Krzepilko A., Michalek S., Rczewska M. Impact of ag nanoparticles on seed germination and seedling growth of green beans in normal and chill temperatures // *Ariculture*. 2020. Vol. 8. N 10. P. 1–16. DOI: 10.3390/agriculture10080312.
7. Кушникаткина А.Н., Русяев И.Г. Агроэкологические аспекты применения комплексных микроэлементных удобрений и бактериальных препаратов в технологии возделывания яровой мягкой пшеницы // *Нива Поволжья*. 2018. № 1 (46). С. 41–45.
8. Семенов В.В., Золотарева Н.В., Петров Б.И., Лазарев Н.М., Сюбаева А.О., Кодочилова Н.А., Гейгер Е.Ю., Разов Е.Н. Получение водорастворимых хелатных соединений железа (ii) и их использование в качестве микроудобрений. Влияние промоторов растворимости на структуру урожая яровой пшеницы при некорневой подкормке // *Вестник Южно-Уральского государственного университета*. 2019. № 11 (3). С. 5–16. DOI: 10.14529/chem190301.
9. Гармаш Н.Ю., Политыко П.М., Гармаш Г.А., Новиков С.Ю., Соломатин А.В. Листовые обработки в интенсивных технологиях растениеводства // *Агрохимический вестник*. 2020. № 5. С. 38–40. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10066.
10. Вильдфлуш И.Р., Кулешова А.А. Влияние макро-, микроудобрений и регуляторов роста на динамику роста и продуктивность яровой пшеницы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // *Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии*. 2020. № 2. С. 71–76.
11. Хорошилов А.А., Павловская Н.Е., Бородин Д.Б., Яковлева И.В. Фотосинтетическая продуктивность и структура урожая яровой пшеницы под влиянием нанокремния в сравнении с биологическим и химическим препаратами // *Сельскохозяйственная биология*. 2021. Т. 56. № 3. С. 487–499. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.3.487rus.
12. Сыщиков Д.В., Приходько С.А., Удодов И.А., Сыщикова О.В. Влияние комплекса хелатов микроэлементов на ростовые показатели растений на начальном этапе онтогенеза // *Промышленная ботаника*. 2017. № 17. С. 37–43.
13. Власенко Н.Г., Теплякова О.И., Душкин А.В. Применение механокомплексов тебуконазола с полисахаридами растительного происхождения для защиты яровой пшеницы от болезней листьев // *Сибирский вестник сельскохозяйственной науки*. 2019. Т. 49. № 6. С. 5–15. DOI: 10.26898/0370-8799-2019-6-1.
14. Premysl L. Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2020. Vol. 161. P. 12–24. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.01.039.
15. Rai-Kalal P., Jajoo A. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2021. Vol. 160. P. 341–351. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.01.032.
16. Sotoodekhniya-Koran S., Iranbakhsh A., Ebadi M., Majd A., Ardebili Z.O. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annum*; an in vitro study // *Environmental Pollution*. 2020. Vol. 265. (Pt B). DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114727.
17. Короткова А.М., Лебедев С.В., Русакова Е.А. ДНК-повреждающие эффекты наночастиц Ni и NiO в растениях вида *Triticum vulgare* // *Вестник Оренбургского государственного университета*, 2015. № 10 (185). С. 24–26.
18. Короткова А.М., Лебедев С.В., Каюмов Ф.Г., Сизова Е.А. Морфофизиологические изменения у пшеницы (*Triticum vulgare* L.) под влиянием наночастиц металлов (Fe, Cu, Ni) и их оксидов (Fe₃O₄, CuO, NiO) // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 1. С. 172–182. DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.172rus.
19. Короткова А.М., Галактионова Л.В., Кван О.В., Терехова Н.А., Орлова В.А., Петров М.И. Оценка биологической активности комплексов наночастиц магнетита, оксида кремния и молибдена с гуминовыми кислотами в тесте *Triticum aestivum* и *Hordeum vulgare* // *Проблемы региональной экологии*. 2018. № 4. С. 31–35. DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14031.
20. Ручкин С.В., Иванищев В.В. Влияние присутствия сульфата железа в среде на формирование проростков пшеницы // *Известия Тульского государственного университета. Естественные науки*. 2019. № 2. С. 31–38.

REFERENCES

1. Soroka T.A., Shchukin V.B., Il'yasova N.YA. Effect of presowing treatment of seeds with growth regulators, trace elements and Rostok preparation on the yield and quality of grain of winter wheat cultivated on south chernozem soils. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2017, no. 2 (64), pp. 21–24. (In Russian).
2. Achari G.A., Kowshik M. Recent Developments on Nanotechnology in Agriculture: Plant Mineral Nutrition, Health, and Interactions with Soil Microflora. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2018, vol. 66 (33), pp. 8647–8661. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b00691.
3. Kolmykova O.YU., Cherkasov O.V. Comparative evaluation of safe effects of iron, cobalt and copper nanopowders on physiological and biometric parameters of cucumber in the non-chernozem zone. *Vestnik ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta imeni P.A. Kostycheva = Herald of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*, 2018, no. 1 (37), pp. 31–36. (In Russian).
4. Dolgoplova N.V. Efficiency of action of molybdene microelement on productivity of winter wheat in the structure of crop rotation. *Vestnik Kurskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy*, 2019, no. 1, pp. 48–52. (In Russian).
5. Goman N.V., Popova V.V., Bobrenko I.A., Gaidar A.A. Influence of pre-sowing treatment of seeds with zinc and copper chelates on yield and grain quality of spring wheat cultivated in the forest-steppe of Western Siberia. *Vestnik Omskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Omsk State Agrarian University*, 2019, no. 4 (36), pp. 6–12. (In Russian).
6. Prażak R., Świącilo A., Krzepińko A., Michałek S., Rczewska M. Impact of ag nanoparticles on seed germination and seedling growth of green beans in normal and chill temperatures. *Agriculture*, 2020, vol. 8, no. 10, pp. 1–16. DOI: 10.3390/agriculture10080312.
7. Kshnikatkina A.N., Rusyaev I.G. Agroecological aspects of application of complex microelement fertilizers and bacterial preparations in the technology of cultivation of spring soft wheat. *Niva Povolzh'ya = Volga Region Farmland*, 2018, no. 1 (46), pp. 41–45. (In Russian).
8. Semenov V.V., Zolotareva N.V., Petrov B.I., Lazarev N.M., Syubaeva A.O., Kodochilova N.A., Geiger E.YU., Razov E.N. Preparation of water-soluble chelate compounds of iron(ii) and their use as microfertilizers. Influence of solubility promoters on the structure of spring wheat harvest under foliar treatment. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta = Bulletin of the South Ural State University*, 2019, no. 11 (3), pp. 5–16. (In Russian). DOI: 10.14529/chem190301.
9. Garmash N.YU., Polityko P.M., Garmash G.A., Novikov S.YU., Solomatin A.V. Leaf treatment in intensive technologies of crop production. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemical Bulletin*, 2020, no. 5, pp. 38–40. (In Russian). DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10066.
10. Vildflush I.R., Kuleshova A.A. Influence of macro-, microfertilizers and growth regulators on growth dynamics and productivity of spring wheat on sod-podzolic light loamy soil. *Vestnik Belorusskoi gosudarstvennoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = Bulletin of Belarusian State Agricultural Academy*, 2020, no. 2, pp. 71–76. (In Belarus).
11. Khoroshilov A.A., Pavlovskaya N.E., Borodin D.B., Yakovleva I.V. Photosynthetic productivity and yield structure of spring wheat under the influence of nanosilicon in comparison with biological and chemical preparations. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*, 2021, vol. 56, no. 3, pp. 487–499. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2021.3.487rus.
12. Syshchikov D.V., Prikhodko S.A., Udodov I.A., Syshchikova O.V. Influence of complex chelate trace elements on the growth performance of plants at the initial stage of ontogenesis. *Pro-myshlennaya botanika = Industrial Botany*, 2017, no. 17, pp. 37–43. (In Russian).
13. Vlasenko N.G., Teplyakova O.I., Dushkin A.V. Application of mechanocomplexes of tebukonazole with vegetable organic polysaccharides for protection of spring wheat from leaf diseases. *Sibirskii vestnik sel'skokhozyaistvennoi nauki = Siberian Herald of Agricultural Science*, 2019, vol. 49, no. 6, pp. 5–15. (In Russian). DOI: 10.26898/0370-8799-2019-6-1.
14. Premysl L. Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2020, vol. 161, pp. 12–24. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.01.039.

15. Rai-Kalal P., Jajoo A. Priming with zinc oxide nanoparticles improve germination and photosynthetic performance in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, vol. 160, pp. 341–351. DOI: 10.1016/j.plaphy.2021.01.032.
16. Sotoodekhniya-Koran, S., Iranbakhsh A., Ebadi M., Majd A., Ardebili Z.O. Selenium nanoparticles induced variations in growth, morphology, anatomy, biochemistry, gene expression, and epigenetic DNA methylation in *Capsicum annuum*; an in vitro study. *Environmental Pollution*, 2020, vol. 265 (Pt B). DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114727.
17. Korotkova A.M., Lebedev S.V., Rusakova E.A. DNA-damaging effects of Ni and NiO nanoparticles in plants *Triticum vulgare*. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Orenburg State University*, 2015, no. 10 (185), pp. 24–26. (In Russian).
18. Korotkova A.M., Lebedev S.V., Kayumov F.G., Sizova E.A. Biological effects of wheat (*Triticum vulgare* L.) under the influence of nanoparticles of metals (Fe, Cu, Ni) and their oxides (Fe₃O₄, CuO, NiO). *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya = Agricultural Biology*. 2017, vol. 52. no. 1, pp. 172–182. (In Russian). DOI: 10.15389/agrobiology.2017.1.172rus.
19. Korotkova A.M., Galaktionova L.V., Kvan O.V., Terekhova N.A., Orlova B.A., Petrov M.I. Evaluation of the biological activity of complexes of magnetite, silicon oxide and molybdenum nanoparticles with humic acids in *Triticum aestivum* and *Hordeum vulgare* test. *Problemy regional'noi ehkologii = Problems of Regional Ecology*, 2018, no. 4. pp. 31–35. (In Russian). DOI: 10.24411/1728-323X-2018-14031.
20. Ruchkin S.V., Ivanishchev V.V. Effect of the presence of ferrous sulfate on the formation of wheat seedlings. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki = Proceedings of Tula State University. Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 31–38. (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

✉ **Тимофеев В.Н.**, кандидат сельскохозяйственных наук, научный сотрудник; **адрес для переписки:** Россия, 625501, Тюмень, пос. Московский, ул. Бурлаки, 2; e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

Вьюшина О.А., научный сотрудник; e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

AUTHOR INFORMATION

✉ **Vyacheslav N. Timofeev**, Candidate of Science in Agriculture, Researcher; **address:** 2, Burlaki street, Moskovsky settl., Tyumen district, Tyumen region, 625501, Russia; e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

Olga A. Vyushina, Researcher; e-mail: Timofeev_vn2010@mail.ru

Дата поступления статьи / Received by the editors 13.12.2021
Дата принятия к публикации / Accepted for publication 08.02.2022
Дата публикации / Published 25.03.2022