

ОСОБЕННОСТЬ ДЕЙСТВИЯ НАНОЧАСТИЦ КОБАЛЬТА И БОРА
НА БАКТЕРИАЛЬНУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ И МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ
ПОКАЗАТЕЛИ ПРОРОСТКОВ ЯРОВЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР И ПРОСА© 2024 г. А. А. Новикова^{1,*}, Е. Ю. Подласова¹, Н. Н. Глущенко²¹Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий РАН, Оренбург, Россия²Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

*E-mail: tony-novikova@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.04.2024 г.

После доработки 26.05.2024 г.

Принята к публикации 26.05.2024 г.

Представлены данные по изменению бактериальной люминесценции и морфометрических показателей проростков пшеницы (*Triticum durum* Desf.), ярового ячменя (*Hordeum sativum* L.) и проса (*Panicum miliaceum* L.) после предпосевной обработки их семян наночастицами (НЧ) бора и кобальта в полимерной матрице. Результаты токсичности НЧ В и Со на тест-системе бактериальной люминесценции штамма *Escherichia coli* K12 TG1 показали, что полумаксимальная (вызывающая гибель 50% бактерий) концентрация НЧ В равна 2.4×10^{-2} мг/мл, НЧ Со – 3×10^{-3} мг/мл, тогда как выбранный диапазон концентраций для предпосевной обработки семян составляет от 10^{-9} до 10^{-7} %. Установлено, что энергия прорастания семян увеличилась на 10.9–25%, а всхожесть – на 2.9–10.7%. Изучение морфометрических параметров проростков после обработки НЧ показало, что кобальт интенсивнее влияет на рост надземных частей растений, а бор лучше стимулирует рост корневой системы. При использовании НЧ В отмечено увеличение длины побегов на 4.8–31.3%, длины корневой системы на 14.9–32%, сухой массы побега на 14.3–26.1% и сухой массы корневой системы на 17.9–29% по сравнению с контролем. Предпосевная обработка зерновых культур НЧ Со также показала увеличение длины побегов на 29–49%, длины корневой системы на 12–17%, массы ростков на 18–36% и массы корней на 10–20% относительно контрольных образцов. НЧ бора в составе полимерного покрытия в концентрации 10^{-8} % и кобальта в концентрации 10^{-9} % могут быть рекомендованы для дальнейших производственных испытаний в полевых условиях.

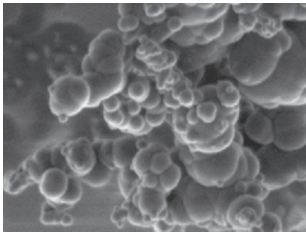
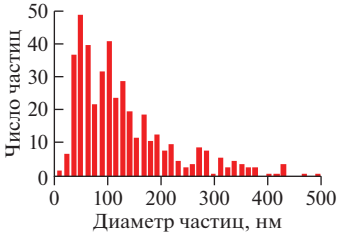
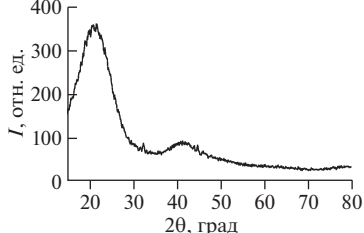
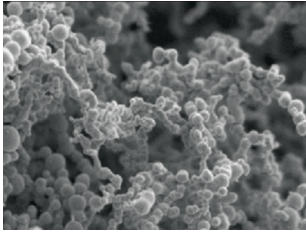
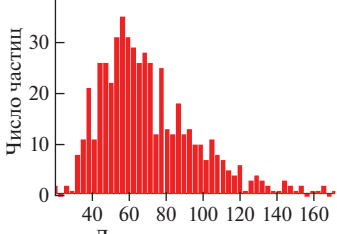
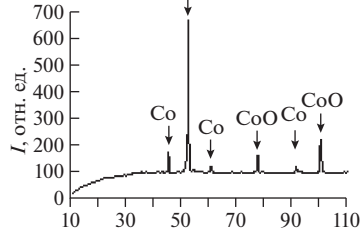
DOI: 10.56304/S1992722324601642

ВВЕДЕНИЕ

В условиях быстрого роста населения, активного изменения климата, ухудшения состояния окружающей среды традиционное сельское хозяйство сталкивается с беспрецедентными проблемами, разрешение которых возможно только с помощью инновационных решений, современных технологий, в том числе достижений нанотехнологий [1, 2]. Химические удобрения незаменимы для существующих сельскохозяйственных систем. Однако эффективность их снижается на протяжении десятилетий и сопровождается загрязнением воды, почвы и выбросами парниковых газов [3]. Применение наноудобрений имеет большие перспективы и приведет в дальнейшем к устойчивому развитию сельского хозяйства [1, 2]. Это связано прежде всего с уникальными свойствами наночастиц (НЧ): домикронный размер, высокая удельная площадь поверхности, стабильность, отличная биосовместимость, благодаря которым НЧ обеспечивают повышенную эф-

фективность высвобождения жизненно необходимых элементов, пролонгированное действие, легкое проникновение в органы растений [4]. Нанотехнологии могут быть использованы для решения различных сельскохозяйственных проблем, таких как чрезмерное внесение удобрений и пестицидов, формирование стрессоустойчивости растений при действии биотических и/или абиотических факторов среды, при экстремальном изменении климата [5–7]. Кроме того, наноматериалы способствуют росту растений, прорастанию семян, повышению урожайности сельскохозяйственных культур и качества продукции [3, 8]. Благодаря структурно-функциональным особенностям концентрации НЧ, оказывающие эффективное воздействие на рост и развитие растений, могут быть на 2 порядка ниже концентраций солей металлов и в разы выше по эффективности [9, 10]. Особое внимание исследователей обращено на влияние НЧ на прорастание семян. Естественный процесс прорастания занимает много

Таблица 1. Физико-химические характеристики наночастиц бора и кобальта

Наночастицы	СЭМ-изображение наночастиц*	Кривая распределения наночастиц по размеру	Дифрактограмма наночастиц
В			
Со			

времени, в то время как обработка семян НЧ позволяет достигать высоких показателей всхожести. Реакция семян варьируется в зависимости от разных типов НЧ, их физико-химических характеристик и функциональной активности, концентрации, вида семян растений. О возможных механизмах действия НЧ подробно изложено в обзоре [11].

Показано, что макроэлементы (Na, K, P, Ca), микроэлементы (Fe, Cu, Zn, Mo, а также их оксиды) в виде НЧ активно влияют на всхожесть, физиологические процессы, включая фотосинтез, активность антиоксидантных ферментов, метаболизм пролина, белков, углеводов, что способствует увеличению биомассы, длины побегов и корней растений [12, 13]. В меньшей степени изучено воздействие на прорастание семян и морфометрические показатели проростков таких элементов, как бор и кобальт, которые активно участвуют в физиологических процессах растений на протяжении всего онтогенеза. Известно положительное влияние бора на всхожесть риса, кобальта — на рост побегов и корней пшеницы [14, 15].

Несмотря на многочисленные данные о положительном влиянии НЧ и их преимуществе по сравнению с традиционными методами, применяемыми в сельском хозяйстве, НЧ требуют дальнейшего изучения. Это связано с их возможной фитотоксичностью и нанозагрязнениями продукции и окружающей среды [16].

Цель настоящей работы — изучение влияния НЧ бора и кобальта на бактериальную люминесценцию и морфометрические показатели про-

ростков яровой пшеницы, ярового ячменя и проса посевного при предпосевной обработке их семян данными НЧ в составе полимеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наночастицы получены методом высокотемпературной конденсации на установке Миген-3 [18]. Исследование физико-химических характеристик проведено сотрудниками Лаборатории нано- и микроструктурного материаловедения Института энергетических проблем химической физики им. В.Л. Тальрозе РАН (зав. лаб. А.Н. Жигач). НЧ имели следующие характеристики. Средний диаметр НЧ Со — 63.6 ± 0.6 нм, НЧ В — 134 ± 12 нм. В НЧ кобальта кристаллическая металлическая фаза составляла 95%, оксидная фаза — не менее 5%. НЧ бора имели аморфное строение с содержанием бора 92.5% (табл. 1).

Объектами исследования являлись яровая твердая пшеница *Triticum durum* Desf. сорта Целинная, яровой ячмень *Hordeum sativum* J. сорта Натали и просо посевное *Panicum miliaceum* L. сорта Оренбургское 20. Семена урожая 2023 г. были взяты в Селекционно-семеноводческом центре биологических систем и агротехнологий РАН г. Оренбурга.

Перед началом эксперимента семена подвергали поверхностной стерилизации в 2%-ном растворе хлора в течение 5 мин, затем их несколько раз промывали дистиллированной водой до полного удаления следов дезинфицирующего рас-

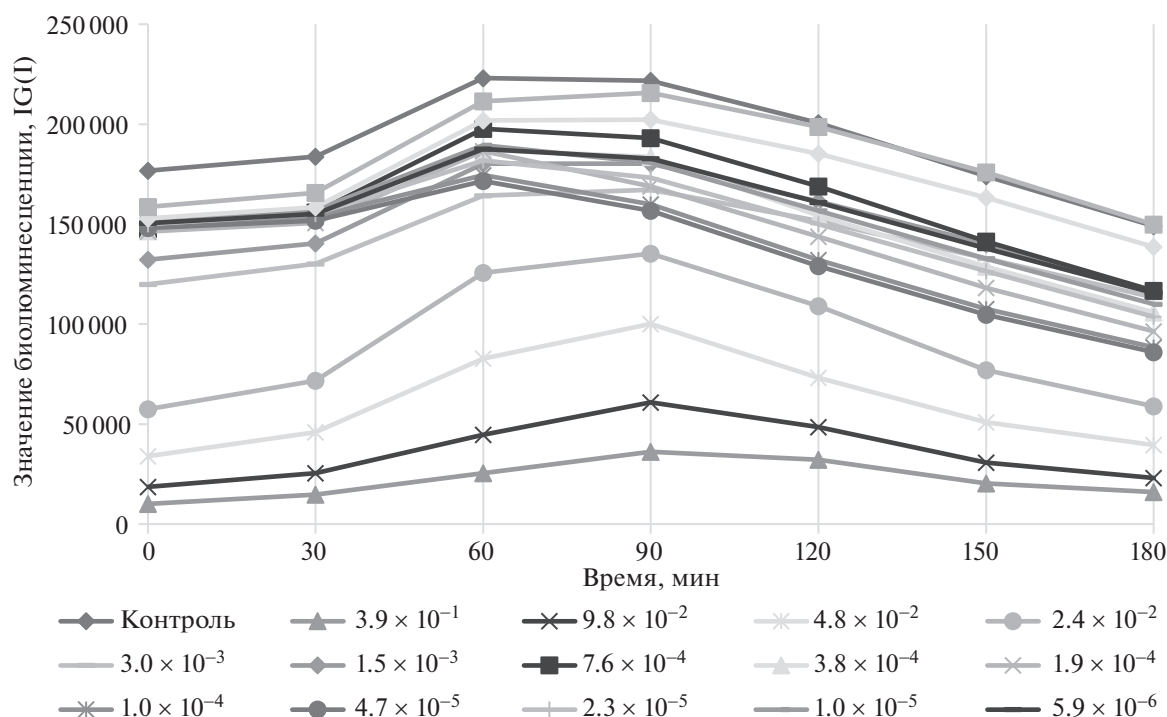


Рис. 2. Уровень интенсивности биолюминесценции штамма бактерии *Escherichia coli* K12 TG1 при взаимодействии с НЧ бора в динамике наблюдений.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Оценка токсичности НЧ бора и кобальта на бактериальной тест-модели. Интенсивность свечения в первые минуты взаимодействия клеток *Escherichia coli* K12 TG1 с НЧ Со независимо от концентраций и с НЧ В в диапазоне концентраций 6×10^{-3} – 10^{-9} мг/мл снижается по сравнению с контролем (рис. 2, 3). Далее наблюдается увеличение биолюминесценции, а с 90-й минуты происходит ее медленное снижение. Полное ингибирование активности бактерий наблюдается при взаимодействии с НЧ Со и В в концентрациях 2.4×10^{-2} и 0.78 мг/мл соответственно. Пороговые значения EC_{50} и EC_{20} НЧ В на 180-й минуте находились на уровне 2.4×10^{-2} и 3×10^{-3} мг/мл соответственно. Для НЧ Со антибактериальный эффект был ниже, и к 180-й минуте исследования величина EC_{50} составила 3×10^{-3} мг/мл, а EC_{20} — 4.8×10^{-5} мг/мл. Концентрации, не оказавшие влияния на интенсивность биолюминесценции *Escherichia coli* K12 TG1 и оцененные как нетоксичные, для НЧ В находятся в диапазоне от 6×10^{-6} мг/мл и ниже, для НЧ Со — в диапазоне от 1.5×10^{-6} мг/мл и ниже. Основываясь на полученных данных по биолюминесценции на бактериальной тест-модели, дальнейшие исследования

по оценке эффективности воздействия НЧ В и Со на растения проводили в диапазоне концентраций ниже 1.5×10^{-6} мг/мл.

Оценка изменений ростовых показателей сельскохозяйственных культур при предпосевной обработке семян НЧ В. Как видно на рис. 4, 5, влияние НЧ В на показатели всхожести семян и энергию прорастания зависит от вида культуры и концентрации НЧ в составе полимерного покрытия. Наибольшие значения энергии прорастания, превышавшие контроль на 13.7, 17.9 и 14.8% ($p \leq 0.05$), были получены на семенах проса посевного при концентрации НЧ В $10^{-9}\%$, яровой пшеницы и ярового ячменя — при концентрации НЧ В $10^{-8}\%$. При концентрации НЧ В $10^{-7}\%$ всхожесть семян пшеницы и ячменя увеличилась на 12%. НЧ В в концентрации $10^{-9}\%$ стимулировали всхожесть культур на 16.2% (просо, ячмень) и 18.4% (пшеница) по сравнению с контролем.

Средняя длина ростка пшеницы варьировалась от 8.8 ± 0.19 см (концентрация НЧ В $10^{-7}\%$) до 9.0 ± 0.16 см (концентрация НЧ В $10^{-9}\%$), а сухая масса проростков — от 4.6 ± 0.21 до 5.8 ± 0.22 мг при концентрации НЧ В 10^{-7} и $10^{-8}\%$ соответственно (табл. 2).

Развитие надземной части ярового ячменя и проса посевного при предпосевной обработке семян НЧ бора в концентрации $10^{-7}\%$ оказалось идентичным. При этом отмечалось снижение по

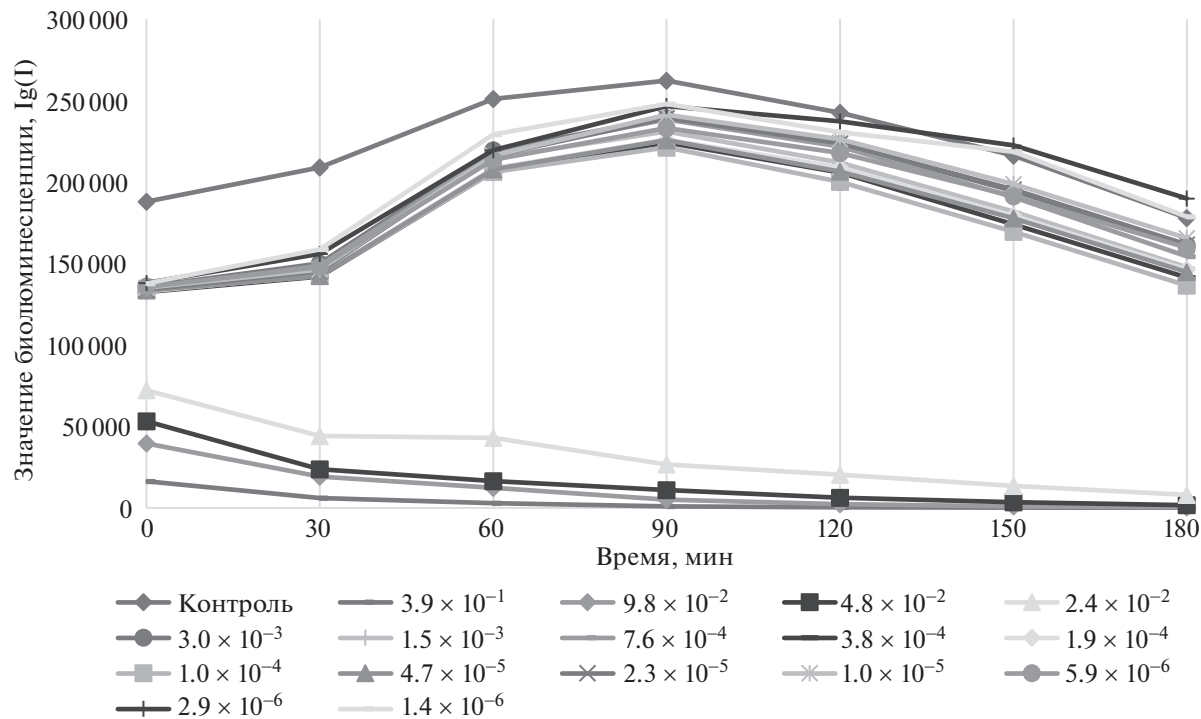


Рис. 3. Уровень интенсивности биолуминесценции штамма бактерии *Escherichia coli* K12 TGI при взаимодействии с НЧ кобальта в динамике наблюдений.

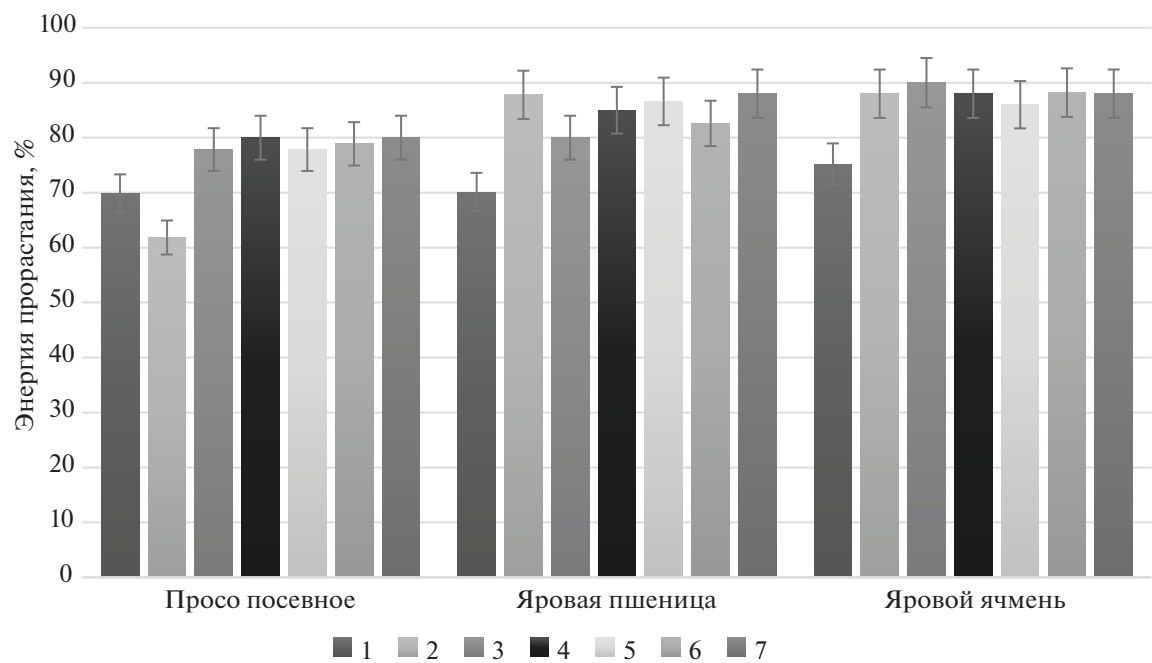


Рис. 4. Показатели энергии прорастания пшеницы, ячменя и проса без обработки (1), при использовании НЧ бора в концентрации $10^{-7}\%$ (2), $10^{-8}\%$ (3), $10^{-9}\%$ (4) и НЧ кобальта в концентрации $10^{-7}\%$ (5), $10^{-8}\%$ (6), $10^{-9}\%$ (7).

сравнению с контролем длины проростка на 14.3 и 67.6%, сухой массы побега на 10.8 и 37.7% и корневой системы на 56.6 и на 16.6% для проса и яровой пшеницы соответственно. Предпосевная обработка семян пшеницы, ячменя и проса НЧ В в концентрации $10^{-8}\%$ увеличивала массу корней в

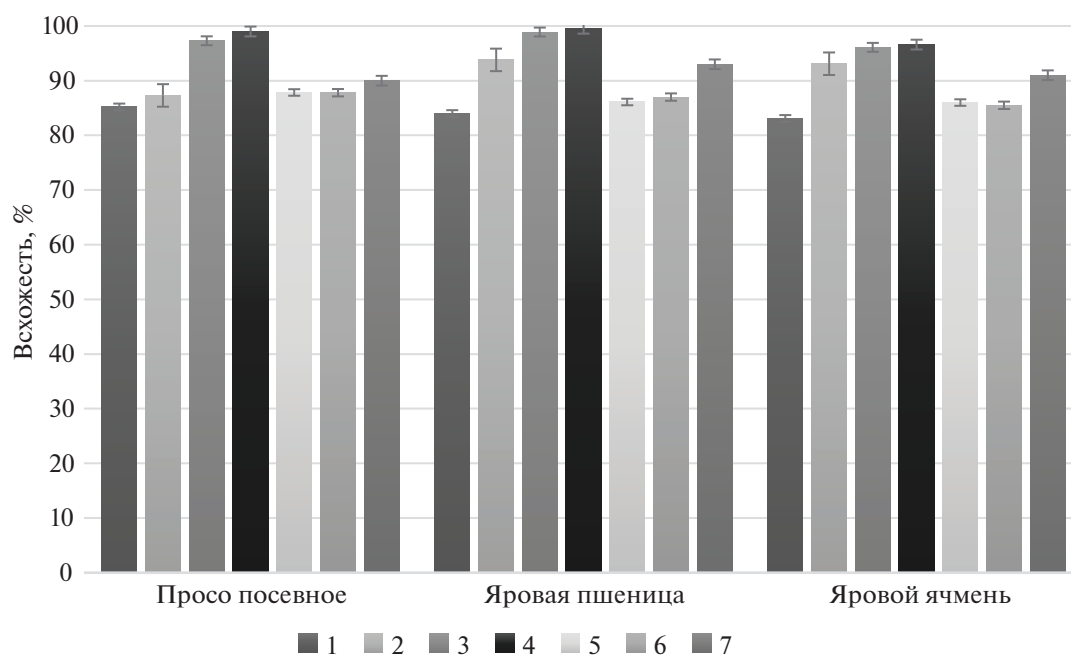


Рис. 5. Показатели всхожести пшеницы, ячменя и проса без обработки (1), при использовании НЧ бора в концентрации $10^{-7}\%$ (2), $10^{-8}\%$ (3), $10^{-9}\%$ (4) и НЧ кобальта в концентрации $10^{-7}\%$ (5), $10^{-8}\%$ (6), $10^{-9}\%$ (7).

1.2, 1.5 и 1.3 раза ($p \leq 0.05$) по сравнению с контролем соответственно.

Оценка изменений ростовых показателей сельскохозяйственных культур при предпосевной обработке семян НЧ Со. Предпосевная обработка семян НЧ Со увеличивала энергию их прорастания для всех изучаемых культур, приводила к росту всхожести семян ячменя и проса, но слабо влияла на всхожесть семян яровой пшеницы. При обработке НЧ Со в концентрации $10^{-8}\%$ наблюдается увеличение энергии прорастания семян ячменя и проса на 17.3 и 16.7%, а всхожести на 2.9 и 3.1% соответственно по сравнению с контролем. Предпосевная обработка семян НЧ Со в концентрации $10^{-9}\%$ приводила к росту длины побегов яровой пшеницы и ярового ячменя на 33.3 и 25.7%, массы проростков на 28.3 и 15.1% по сравнению с контролем соответственно.

На морфометрические показатели проса посевного НЧ Со в концентрации $10^{-7}\%$ действовали угнетающе, вызывая уменьшение длины и массы ростка на 12.7 и 19.4%, длины и массы корня на 3.4 и 14.3% в сравнении с контролем соответственно. Обработка семян НЧ Со в концентрации $10^{-8}\%$, напротив, приводила к увеличению показателей роста проса: длины проростков на 12.2%, массы побегов на 14.3%, массы корневой системы на 2% по сравнению с контролем. Формирование первичной корневой системы растений яровой пшеницы наиболее активно происходило при предпосевной обработке НЧ Со

в концентрации $10^{-9}\%$. Общая длина корней увеличивалась на 17% ($p \leq 0.05$) по сравнению с контролем, а сухая масса — на 20.5%. Длина и масса корневой системы ярового ячменя при обработке НЧ Со в концентрации $10^{-7}\%$ увеличивались на 10.4 и 10.1% соответственно по сравнению с контролем (табл. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эффективное управление питанием растений имеет решающее значение для повышения урожайности и качества сельскохозяйственной продукции. Нанотехнологии предлагают ряд инновационных решений для создания наноудобрений, пестицидов, препаратов для борьбы с фитопатологиями, для селекции новых сортов, что в целом позволит повысить как стрессоустойчивость растений в условиях изменяющегося климата и действия неблагоприятных факторов, так и их урожайность. Более детальные знания о НЧ, их влиянии на прорастание, рост и развитие растений позволят эффективно использовать их потенциал [1, 2]. В силу структурно-поверхностной особенности НЧ их реакционная активность зависит, с одной стороны, от физико-химических характеристик самих частиц, с другой стороны, от их концентрации в рабочих растворах, равномерности распределения в препаратах, оболочки на поверхности частиц [9, 10, 19, 20]. В настоящей работе использовали кобальт — металл, который способствует фиксации азота и образованию хло-

Таблица 2. Изменение морфометрических показателей проростков яровой пшеницы, ярового ячменя и проса после предпосевной обработки семян НЧ бора и кобальта в разных концентрациях*

Концен-трация НЧ, мг/мл	Длина проростка		Общая длина корневой системы		Сухая масса проростка		Сухая масса корневой системы	
	см	опыт/кон-троль, %	см	опыт/кон-троль, %	10 ⁻³ г	опыт/кон-троль, %	10 ⁻³ г	опыт/кон-троль, %
Яровая пшеница								
В 10 ⁻⁷	8.5 ± 0.19	101.2	28.4 ± 2.11	83.4	4.6 ± 0.21	100.0	4.3 ± 0.18	110.2
В 10 ⁻⁸	8.8 ± 0.16	104.8	42.5 ± 2.10	124.6	5.8 ± 0.22	126.1	4.6 ± 0.20	117.9
			<i>p</i> ≤ 0.05		<i>p</i> ≤ 0.05			
В 10 ⁻⁹	9.0 ± 0.16	107.1	39.0 ± 2.31	114.4	5.7 ± 0.23	123.9	4.3 ± 0.20	110.2
					<i>p</i> ≤ 0.05			
Co 10 ⁻⁷	8.4 ± 0.18	133.3	35.7 ± 2.31	104.6	5.9 ± 0.24	128.3	4.0 ± 0.22	102.6
	<i>p</i> ≤ 0.05				<i>p</i> ≤ 0.05			
Co 10 ⁻⁸	8.7 ± 0.19	138.1	38.8 ± 2.12	110.6	5.8 ± 0.25	126.1	4.6 ± 0.31	117.9
	<i>p</i> ≤ 0.05				<i>p</i> ≤ 0.05			
Co 10 ⁻⁹	9.4 ± 0.15	149.2	39.9 ± 2.24	117.0	6.3 ± 0.27	136.9	4.7 ± 0.24	120.5
	<i>p</i> ≤ 0.05				<i>p</i> ≤ 0.05	<i>p</i> ≤ 0.05		
Яровой ячмень								
В 10 ⁻⁷	8.9 ± 0.15	85.7	31.8 ± 0.27	120.9	14.8 ± 1.1	89.2	5.5 ± 0.8	121.0
В 10 ⁻⁸	13.7 ± 0.14	131.3	34.7 ± 0.27	132.0	19.4 ± 0.8	117.4	5.9 ± 0.5	129.0
	<i>p</i> ≤ 0.05		<i>p</i> ≤ 0.05				<i>p</i> ≤ 0.05	
В 10 ⁻⁹	11.1 ± 0.22	105.0	34.1 ± 0.16	129.6	18.4 ± 0.9	111.3	5.5 ± 0.4	121.0
Co 10 ⁻⁷	13.1 ± 0.8	125.1	29.0 ± 1.4	110.4	18.9 ± 1.1	115.1	5.0 ± 0.12	109.9
Co 10 ⁻⁸	13.8 ± 0.6	132.4	29.9 ± 0.3	113.8	19.7 ± 1.5	119.4	5.1 ± 0.09	110.4
	<i>p</i> ≤ 0.05							
Co 10 ⁻⁹	13.5 ± 0.9	129.3	29.5 ± 1.8	112.5	19.6 ± 1.3	118.9	5.1 ± 0.14	110.2
Просо посевное								
В 10 ⁻⁷	2.4 ± 0.27	32.4	3.7 ± 0.23	43.4	0.9 ± 0.02	64.3	0.2 ± 0.016	28.6
							<i>p</i> ≤ 0.05	
В 10 ⁻⁸	8.7 ± 0.24	118.5	10.0 ± 0.39	114.9	1.6 ± 0.02	114.3	0.9 ± 0.026	128.6
							<i>p</i> ≤ 0.05	
В 10 ⁻⁹	7.7 ± 0.26	97.3	9.8 ± 0.34	112.6	1.6 ± 0.03	114.3	0.9 ± 0.014	128.6
							<i>p</i> ≤ 0.05	
Co 10 ⁻⁷	7.7 ± 0.22	97.3	8.4 ± 0.28	96.6	1.2 ± 0.02	86.3	0.6 ± 0.014	85.7
Co 10 ⁻⁸	8.3 ± 0.23	112.2	8.7 ± 0.39	100.0	1.6 ± 0.02	114.3	0.7 ± 0.006	102.0
	<i>p</i> ≤ 0.05							
Co 10 ⁻⁹	7.4 ± 0.21	100.0	8.7 ± 0.34	100.0	1.5 ± 0.02	107.1	0.7 ± 0.016	102.0

*Данные представлены как средние значения и стандартные ошибки среднего. Различия между вариантами считали статисти-чески значимыми при *p* ≤ 0.05.

рофилла, в то же время обладающий потенциальными мутагенными и канцерогенными свойствами [14, 15]. Бор в молодых растениях отвечает за активизацию роста, его дефицит приводит к замедлению роста и прорастанию пыльцы. Показано, что внекорневая подкормка салата НЧ бората кальция ($\text{CaO}_2\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) способствует лучшему накоплению бора в побегах и корнях (эффективность накопления превышает контроль в 2.56 раза) [13].

Для выбора оптимальных концентраций для обработки семян проведена оценка токсичности НЧ В и Со на тест-модели биOLUMИнесценции штамма *Escherichia coli K12 TG1* [18]. Установлено, что гибель 50 и 20% бактерий вызывают НЧ В в концентрациях 2.4×10^{-2} и 3×10^{-3} мг/мл и НЧ Со в концентрациях 3×10^{-3} и 4.8×10^{-5} мг/мл соответственно. При этом видно, что токсичность НЧ В выше токсичности НЧ Со по значению EC_{50} в 8 раз. В связи с этим для предпосевной обработки семян разных культур были приготовлены препараты, содержащие НЧ В и Со в диапазоне концентраций от 10^{-9} до $10^{-7}\%$.

Оценка энергии прорастания и всхожести семян изученных культур свидетельствует о положительном влиянии предпосевной обработки семян НЧ В и Со в составе полимеров (на 10–25% выше контроля), за исключением обработки семян проса посевного НЧ бора в концентрации $10^{-7}\%$. В обзоре [21] приведены многочисленные примеры положительного влияния разнообразных НЧ (Se, Ag, Si, TiO_2 , ZnO, SnO_2 , CeO_2 и др.) на процессы прорастания семян. Эффекты зависят от вида НЧ, их концентрации и вида культур. С точки зрения внутренних процессов в семенах через несколько цепочек последовательных событий происходит накопление активных форм кислорода (АФК), что характеризует окончание периода покоя. Присутствие АФК также может стимулировать выработку фитогормонов, которые участвуют в дальнейшем развитии проростков и защитных реакциях растений [21]. Согласно [22] кобальт способствует репродукции листьев растений, влияет на увеличение мезофилла, столбчатой и губчатой ткани. Благодаря переменной валентности кобальт участвует в окислительно-восстановительных реакциях, регулирует цикл Кребса, дыхание, энергетический обмен, биосинтез белка и полинуклеотидов.

Проведенные исследования демонстрируют различия ответной реакции на предпосевную обработку семян НЧ. Самые высокие показатели до 149.2% (длина проростков) характерны для яровой пшеницы при обработке НЧ Со в концентрации $10^{-9}\%$. Наиболее выраженные изменения длины проростков (131.3%) и корневой системы (132.4%) наблюдаются при обработке семян ярового ячменя НЧ В и Со в концентрации $10^{-8}\%$.

Измеряемые показатели проса посевного при обработке НЧ В и Со в концентрациях 10^{-8} и $10^{-9}\%$ соответственно увеличиваются до 118.5%. В то же время наблюдается выраженное снижение показателей, особенно для сухой массы корня до 28.6% при действии НЧ В в концентрации $10^{-7}\%$.

При предпосевной обработке семян НЧ следует учитывать риски загрязнения почвы и окружающей среды. Поэтому обработка семян проводится НЧ, включенными в полимерное покрытие, защищающее семена от фитопатогенов, предотвращающее проникновение НЧ в почву и снижающее токсическое действие самих частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные демонстрируют возможность использования НЧ кобальта и бора в качестве предпосевной обработки семян при выращивании зерновых и крупяной культур. НЧ Со эффективно влияют на рост длины и массы побегов пшеницы, ячменя и проса. НЧ бора способствуют формированию первичной корневой системы растений этих культур.

НЧ бора в составе полимерного покрытия в концентрации $10^{-8}\%$ и кобальта в концентрации $10^{-9}\%$ могут быть рекомендованы для дальнейших производственных испытаний в полевых условиях.

Работа выполнена в рамках плановой научно-исследовательской работы по теме № FNWZ-2022-0015. В исследовании использовано оборудование Центра коллективного пользования биологических систем и агротехнологий ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu C., Zhou H., Zhou J. // *Molecules*. 2021. V. 26. № 23. P. 7070.
<https://doi.org/10.3390/molecules26237070>
2. Abasi F., Raja N., Mashwani Z. et al. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2024. V. 256. P. 128379.
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128379>
3. Shang Y., Hasan M.K., Ahammed G.J. et al. // *Molecules*. 2019. V. 24. P. 2558.
<https://doi.org/10.3390/molecules24142558>
4. Zulficar F., Navarro M., Ashraf M. et al. // *Plant. Sci.* 2019. V. 289. P. 110270.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110270>
5. Demirer G.S., Silva T.N., Jackson C.T. et al. // *Nat. Nanotechnol.* 2021. V. 16. P. 243.
<https://doi.org/10.1038/s41565-021-00854-y>
6. Kamle M., Mahato D.K., Devi S. et al. // *Biotech.* 2020. V. 10. P. 1.
<https://doi.org/10.1007/s13205-020-2152-3>
7. Kumar S., Nehra M., Dilbaghi N. et al. // *J. Control. Release*. 2019. V. 294. P. 131.
<https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.12.012>

8. *Singh H., Sharma A., Bhardwaj S.K. et al.* // Environ. Sci. Process. Impacts. 2021. V. 23. P. 213.
<https://doi.org/10.1039/D0EM00404A>
9. *Yuan J., Chen Y., Li H. et al.* // Sci. Rep. 2018. V. 8. № 1. P. 3228.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w>
10. *Nechitailo G.S., Bogoslovskaya O.A., Ol'khovskaya I.P. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2018. V. 13. № 3–4. P. 161.
<https://doi.org/10.1134/S1995078018020052>
11. *Nile S.H., Thiruvengadam M., Wang Y. et al.* // J. Nanobiotechnol. 2022. V. 20. № 1. P. 254.
<https://doi.org/10.1186/s12951-022-01423-8>
12. *Saini S., Kumar P., Sharma N.C. et al.* // Sci. Hortic. 2021. V. 282. P. 110016.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110016>
13. *Meier S., Moore F., Morales A. et al.* // Plant. Physiol. Biochem. 2020. V. 151. P. 673.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.025>
14. *Xiu H., Xiangying W., Jie L. et al.* // Front. Plant Sci. 2021. V. 12. P. 768523.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768523>
15. *Soumare A., Diedhiou A.G., Thuita M. et al.* // Plants. 2020. V. 9. № 8. P. 1011.
<https://doi.org/10.3390/plants9081011>
16. *Eevera T., Kumaran S., Djanaguiraman M. et al.* // Environ. Res. 2023. V. 236. P. 116849.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116849>
17. *Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L. et al.* // J. Alloys Compd. 2018. V. 778. P. 271.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
18. *Deryabina D.G., Efremova L.V., Karimov I.F. et al.* // Mikrobiologiya. 2016. V. 85. № 2. P. 177.
<https://doi.org/10.1134/S0026261716020053>
19. *Olkhovskaya I.P., Bogoslovskaya O.A., Yablokov A.G. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2019. V. 14. № 1–2. P. 55.
<https://doi.org/10.1134/S1995078019010087>
20. *Davydova N.V., Zamana S.P., Krokhmal I.I. et al.* // Nanotechnologies in Russia. 2019. V. 14. № 11–12. P. 572.
<https://doi.org/10.1134/S1995078019060041>
21. *Wohlmuth J., Tekielska D., Čechová J., Baránek M.* // Plants. 2022. V. 15. № 11 (18). P. 2405.
<https://doi.org/10.3390/plants11182405>
22. *Обидина И.В., Чурилов Г.И., Полищук С.Д. и др.* // Вестник Нижневартского государственного университета. 2020. № 2. С. 42.
<https://doi.org/10.36906/2311-4444/20-2/06>