

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПРЕДПОСЕВНОЙ ОБРАБОТКИ КАРТОФЕЛЯ НАНОБИОПРЕПАРАТАМИ НА КАЧЕСТВО УРОЖАЯ

© 2023 г. В. Н. Зейрук<sup>1</sup>, С. В. Васильева<sup>1</sup>, Г. Л. Белов<sup>1</sup>, М. К. Деревягина<sup>1</sup>, О. А. Богословская<sup>2,\*</sup>,  
И. П. Ольховская<sup>2</sup>, Н. Н. Глущенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт картофельного хозяйства им. А.Г. Лорха, Люберцы, Россия

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва, Россия

\*E-mail: obogo@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 25.08.2022 г.

Недостаток минерального питания, в том числе микроэлементов, и болезни растений могут являться причинами низкой урожайности и качества картофеля, приводя к потерям урожая до 30–50%. Для решения этих проблем приготовлены нанобиопрепараты, содержащие в полимерной пленке, сформированной из смеси Na-карбоксиметилцеллюлозы и полиэтиленгликоля-400, наночастицы (НЧ) меди, железа, молибдена и магния. В ходе лабораторных испытаний препараты с НЧ металлов-микроэлементов в различных концентрациях протестированы по следующим параметрам: количество побегов на клубне, длина и масса ростков. С учетом этих показателей приготовлены комплексные препараты для полевых испытаний полимер + НЧ Cu 10<sup>-9</sup>% + НЧ В 10<sup>-5</sup>% + НЧ Мо 10<sup>-6</sup>% + Mg НЧ 10<sup>-5</sup>% и полимер + НЧ Cu 10<sup>-9</sup>%. Полевые испытания в 2021 г. показали, что предпосадочная обработка клубней этими препаратами увеличила валовую урожайность клубней на 3.3 и 3.6%, количество стандартных клубней на 1.5 и 2.9%, а выход здорового картофеля – на 5.4 и 6.2% по сравнению с контролем соответственно. При этом снизилась распространенность альтернариоза в 1.4–1.5 раза, степень поражения – в 2.9 раза (при обработке композицией НЧ) и в 1.7 раза (после НЧ Cu) по сравнению с контролем. Распространение ризоктониоза уменьшилось в 2 и 3 раза по сравнению с контролем соответственно. Потребительские свойства клубней картофеля нового урожая оценивались общим индексом качества  $\geq 4$ .

DOI: 10.56304/S1992722323010211

### ВВЕДЕНИЕ

На долю России приходится ~15% мирового валового производства картофеля. При этом урожайность картофеля (по данным Росстата, 2021 г.) составляет в среднем 19.2 т/га, что в 2.0–2.5 раза ниже урожайности культуры в Нидерландах, Германии, США [1]. Главной причиной невысокой урожайности картофеля является низкая культура производства: недостаточное применение органических и минеральных удобрений, средств защиты растений, нарушение сроков проведения работ, слабое внедрение прогрессивных технологий. Одним из направлений повышения продуктивности картофеля (культуры с повышенным требованием к элементам питания) является обеспечение сбалансированных норм макро- и микроэлементов. Для получения хороших урожаев с высокими характеристиками качества питательные вещества должны быть доступны растениям в необходимом количестве и в нужной форме [2, 3].

В этом отношении применение микроэлементов в виде наночастиц (НЧ) имеет ряд преимуществ по сравнению с солями: токсичность НЧ в 7–50 раз ниже, чем солей; НЧ проявляют пролонгированное и полифункциональное действие, стимулируют обменные процессы и легко проникают в ткани; НЧ меди обнаруживают синергидный эффект с природными полисахаридами. Биологическое действие НЧ связано с их структурными особенностями и физико-химическими характеристиками. В настоящее время накоплен положительный опыт по использованию наноструктурных материалов в сельском хозяйстве: показано, что НЧ эффективно защищают растения от болезней и способствуют повышению урожайности и качества продукции [4–7].

Для изучения влияния НЧ на рост и развитие растений картофеля и его продуктивность в настоящей работе выбраны эссенциальные элементы: медь, бор, молибден и магний. Выбор этих элементов обусловлен их исключительной ролью в формировании урожая. Известно, что медь

ускоряет образование клубней картофеля и повышает устойчивость к фитопатогенам. При дефиците меди растения теряют тургор и верхние листья, снижается количество продуктивных стеблей и замедляется рост. Бор обеспечивает боковой рост корней, улучшает синтез крахмала и усвоение кальция, повышает качество и товарность урожая. Дефицит молибдена проявляется в плохом усвоении азота и, как следствие, снижении темпа роста растений. Клубни, выращенные на фоне дефицита молибдена, характеризуются низкими вкусовыми качествами, имея горьковатый вкус [8, 9]. Магний играет основную роль в процессах фотосинтеза, на ключевых этапах синтеза сахара и белка, при транспорте сахарозы от листьев к клубням. Характерным признаком недостатка магния является межжилковый хлороз, который при значительном дефиците приводит к закручиванию и хрупкости листовых пластинок [2, 10].

Особое значение в системе выращивания картофеля имеет комплекс мер по подготовке клубней к посадке, направленный на ускорение их прорастания, повышение всхожести, сокращение сроков развития растений, на защиту их от болезней и вредителей и в конечном счете на получение более высоких урожаев.

Целью данной работы было исследование влияния нанобиопрепаратов с наночастицами Cu, B, Mo, Mg на рост растений картофеля, урожайность и качество клубней, распространение фитопатогенов.

## МЕТОДЫ

Исследования проводили на картофеле (*Solanum tuberosum* L.) сорта Санте – среднераннем сорте высокой продуктивности. Посадочным материалом служили клубни с глазками, которые прогревали при температуре 27°C в течение шести дней и отсортировывали. Прогревание использовали для получения всходов на неделю раньше и для повышения засухоустойчивости картофеля. Масса клубней составляла 70–80 г.

*Методы характеристики наночастиц.* НЧ меди, бора, молибдена, магния были приготовлены методом высокотемпературной конденсации [11]. Форму и размер НЧ визуализировали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе Joel JSM 7401F при напряжении 1 кВ. Для оценки среднего диаметра НЧ микрофотографии обрабатывали с помощью программного обеспечения Micran 25. Распределение металлических НЧ по размерам рассчитывали путем измерения диаметров не менее 1000 частиц. Рентгенофазовый анализ металлических НЧ проводили на рентгеновском анализаторе ADP-1 (RU) с  $CoH_{\alpha}$ -излучением с шагом сканирования 0.05°

при времени накопления сигнала 8–10 с. Для выявления фазового состава металлических НЧ проводили обработку интерференционных пиков с помощью программы Match 3.8.0.137 [11].

*Приготовление нанобиопрепарата.* Для предпосадочной обработки клубней картофеля готовили смесь полимеров: Na-карбоксиметилцеллюлозы и полиэтиленгликоля-400, в которую добавляли Na-ЭДТА, родамин 6G (для окрашивания пленки на клубне) и водную суспензию НЧ (в необходимой концентрации), которую получали диспергированием навески порошков с помощью ультразвукового дезинтегратора Scientz JY 92-ПН (Китай) в режиме 0.5 А, при частоте 44 кГц в течение 30 с, с перерывами в 30 с (повтор 3 раза) при 0°C. Полученным раствором проводили предпосадочную обработку клубней картофеля из расчета 10 л/1 т.

*Условия проведения лабораторного опыта.* Для оценки влияния нанобиопрепаратов, содержащих НЧ меди, бора, молибдена и магния, на прорастание клубней проведены лабораторные эксперименты. В ходе испытаний были приготовлены нанобиопрепараты, содержащие НЧ индивидуальных элементов Cu, B, Mo и Mg в различных концентрациях или их композиции. Клубни картофеля обрабатывали полученными нанопрепаратами и проращивали при температуре 20°C в темном месте в течение 30 дней. Каждые два дня клубни опрыскивали водой. Через 30 дней оценивали количество появившихся на клубнях проростков, их высоту и массу.

*Условия проведения полевого опыта.* Полевой опыт проводили в условиях почвенно-климатической зоны подзолистых и дерново-подзолистых почв таежно-лесной области РФ, на экспериментальном поле ВНИИКХ (п. Красково, г.о. Люберцы, Московская область). Размещение делянок – рандомизированное, по четыре контрольных и четыре опытных участка. Количество учетных растений – 100 штук в каждой повторности. Площадь каждого участка составляла 25 м<sup>2</sup>. Клубни картофеля были высажены с междурядьем 75 см, расстоянием между растениями 30 см, плотность посадки 400 растений на 100 м<sup>2</sup>. Общая схема эксперимента представлена на рис. 1.

Оценку роста картофеля и его зараженности проводили в соответствии со стандартными методиками [12–15].

*Определение потребительских качеств картофеля.* Оценку качества картофеля проводили органолептическим методом, который позволяет оценить продукт при помощи анализа сенсорных восприятий – зрения, запаха и вкуса [16].

Для оценки качества картофеля, в том числе потемнения клубней после варки, было отобрано 10 клубней, свободных от болезней, неповрежденных и чистых. Клубни опускали в кипящую

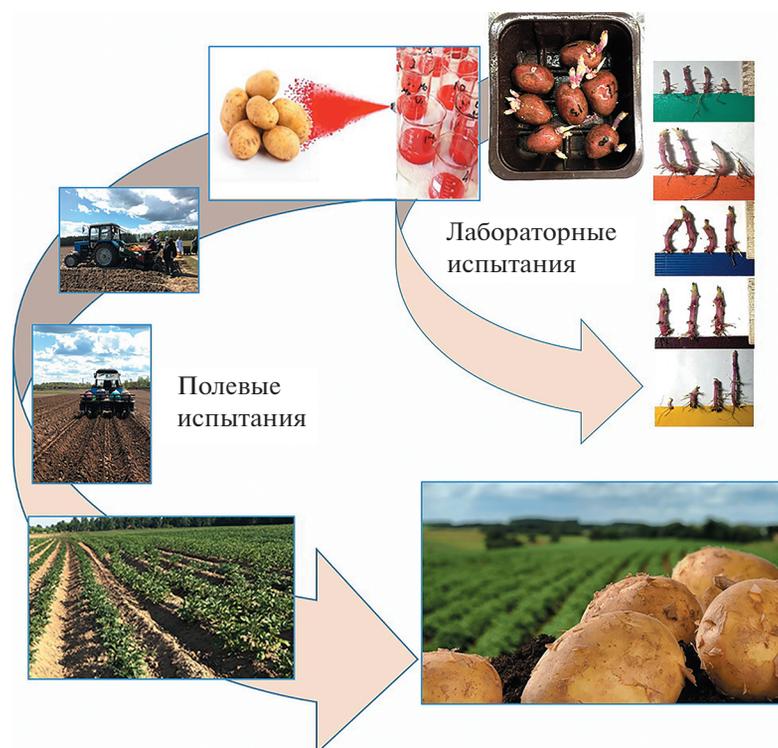


Рис. 1. Схема эксперимента.

воду и варили до готовности. Сваренные клубни разрезали пополам, выкладывали на белую бумагу, оставляли на 10–12 ч и определяли цвет при дневном свете по шкале 1 (интенсивное потемнение), 3 (умеренное потемнение) и 5 (отсутствие потемнения). Вкус картофеля оценивался четырьмя дегустаторами по балльной системе: идеальный вкус = 5 баллов, очень хороший = 4, хороший = 3, плохой = 2 и очень плохой = 1. Вкус картофеля определяли при температуре 20–30°C. Запах определялся в проветриваемом помещении при температуре 20°C и оценивался по той же системе баллов (1–5 баллов). Все расчеты проводили в соответствии со стандартными процедурами (Руководство ЕЭК ООН 2014, 2015, 2018).

**Оценка заболеваемости картофеля.** Распространенность заболевания оценивали по формуле

$$P = (n \times 100) / N,$$

где  $P$  – распространенность болезни (%),  $n$  – количество растений или клубней, пораженных болезнью,  $N$  – количество растений или клубней в группе.

Степень развития болезни рассчитывали по формуле

$$R = (\Sigma(A \times B)) / (KN \times 100),$$

где  $R$  – степень развития болезни (%),  $A$  – количество больных растений,  $B$  – степень поражения каждого растения,  $N$  – общее количество расте-

ний, как больных, так и здоровых,  $K$  – наивысший балл по шкале повреждений (максимальное повреждение (90–100%) растения).

**Статистика.** Результаты экспериментов рассчитывали как отношение тестовых значений к контролю (О/К, %) с помощью программы Statistica-20. Статистически значимым считается  $p \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Физико-химические характеристики наночастиц.** Необходимым условием успешного использования НЧ для разработки биопрепаратов является контроль заданных в процессе синтеза физико-химических характеристик НЧ. Это обусловлено тем, что размер частиц, их форма, фазовое состояние влияют на проявление биологической активности [17].

Согласно изображениям, полученным на просвечивающем и сканирующем электронных микроскопах (ПЭМ и СЭМ), НЧ имеют сферическую форму (рис. 2). Кривые распределения по размеру лежат в области: НЧ Cu 5–250 нм, НЧ Mo – 5–150 нм, НЧ В – 10–600 нм, НЧ Mg – 5–600 нм. Средний диаметр НЧ Cu –  $65 \pm 1.2$  нм, НЧ Mo –  $70 \pm 2.1$  нм, НЧ В –  $134 \pm 5.4$  нм, НЧ Mg –  $193 \pm 12$  нм. Фазовый состав НЧ следующий: НЧ Cu имели только кристаллическую фазу; НЧ Mo включали в себя металлическую фазу ( $64.0 \pm 4.2\%$ ) и карбид димолибдена ( $36.0 \pm 2.9\%$ ); НЧ аморф-

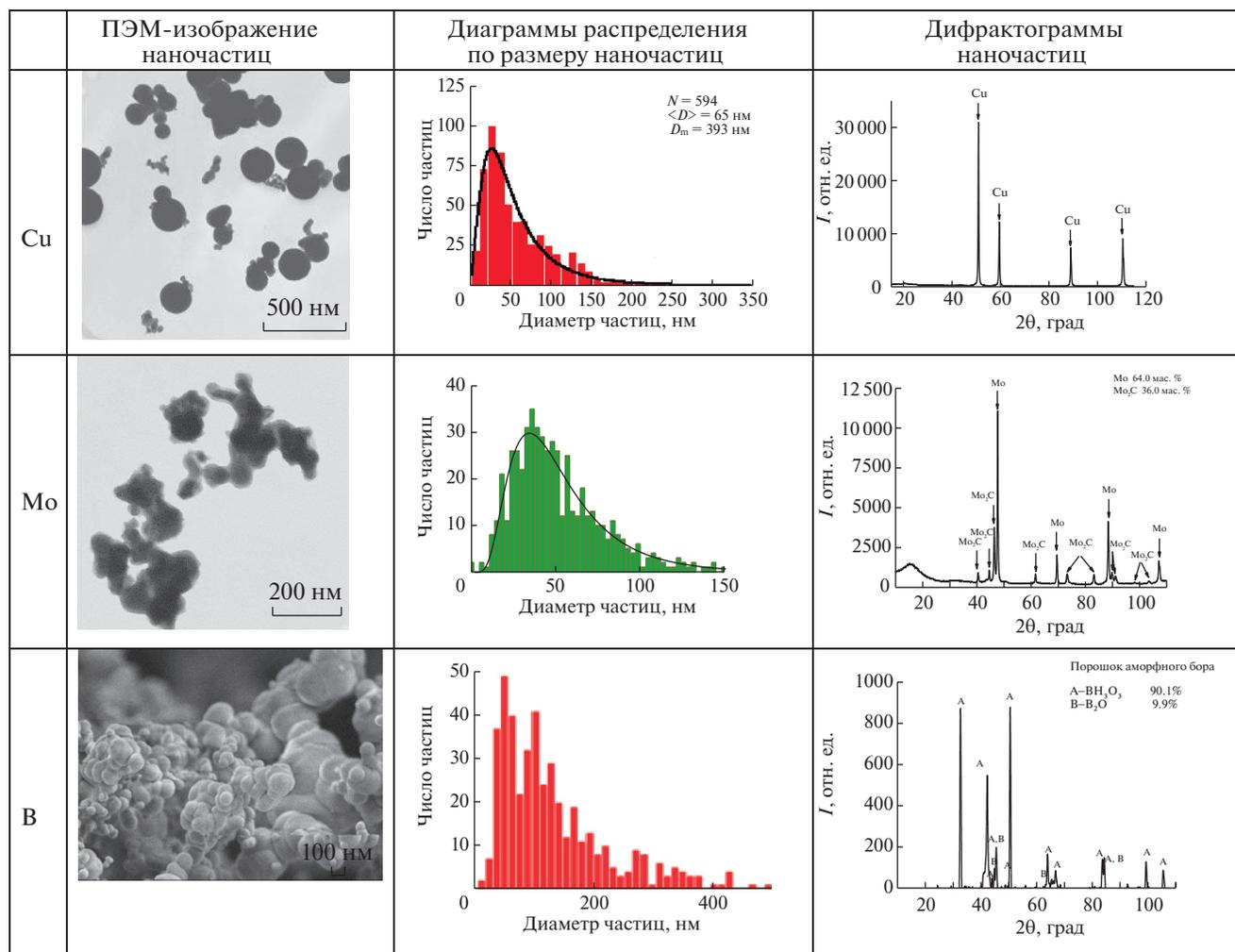


Рис. 2. Изображения наночастиц, диаграммы распределения по размеру и фазовый состав наночастиц.

ного бора содержали  $\text{BH}_3\text{O}_3$  (90.1%) и  $\text{B}_2\text{O}$  (9.9%); НЧ Mg включали в себя металлическую фазу ( $79.0 \pm 5.4\%$ ) и магния оксид ( $21.0 \pm 1.3\%$ ).

Исследования эффективности обработки клубней картофеля наночастицами в составе полимеров. В ходе лабораторных испытаний обработку клубней проводили биопрепаратами на основе полимеров, содержащих НЧ индивидуальных элементов и их композиции в различных концентрациях. Для определения однородности полимерного покрытия использовали световую микроскопию. На рис. 3 показаны срезы клубней из контрольной и экспериментальной групп. В контрольной группе клубни обрабатывали водой. Видно, что полимерное покрытие равномерно распределено по поверхности клубней с образованием пленки толщиной  $\sim 10$  мкм (табл. 1). Обработка клубней полимерами без НЧ положительно влияет на прорастание (на 18% выше контроля), на среднюю длину проростков (на 45% выше контроля). Наночастицы B, Mg, Mo, Cu в

составе полимеров улучшают прорастание картофеля и морфометрические показатели проростков. Так, наибольшее число проростков наблюдали при обработке полимерами с НЧ Cu в концентрации  $10^{-7}\%$  и НЧ Mo в концентрации  $10^{-6}\%$  (на 42.9% выше контроля). Длина проростков картофеля увеличивается при действии НЧ B  $10^{-4}\%$  на 56.4%, НЧ Mg  $10^{-6}\%$  – на 48.8%, НЧ Mo  $10^{-7}\%$  – на 38.4%, композиции НЧ Cu  $10^{-9}\%$  + НЧ B  $10^{-6}\%$  + НЧ Mo  $10^{-7}\%$  + НЧ Mg  $10^{-6}\%$  – на 31.8% по сравнению с контролем. Наибольшую массу проростков наблюдали при обработке клубней НЧ Cu в концентрации  $10^{-9}\%$  – на 95.4% выше контроля.

Испытания эффективности предпосадочной обработки клубней картофеля наночастицами микроэлементов в составе полимеров. Для исследования в полевых условиях были приготовлены нанобиопрепараты следующего состава: полимер + НЧ Cu  $10^{-9}\%$  + НЧ B  $10^{-6}\%$  + НЧ Mo  $10^{-7}\%$  + НЧ

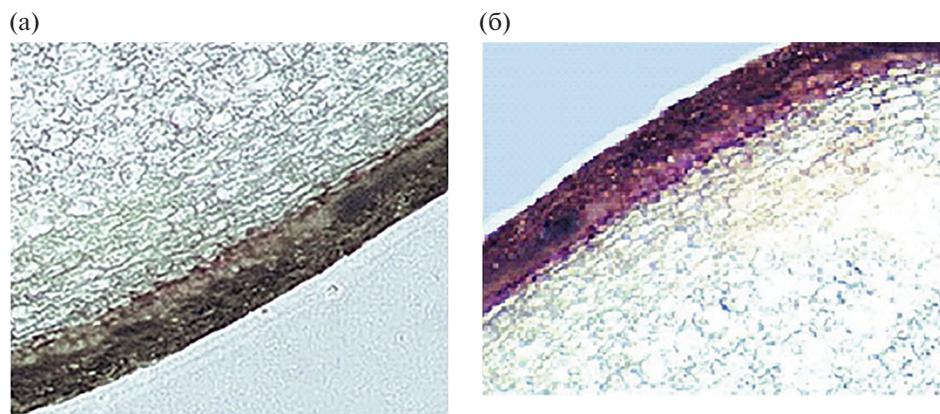


Рис. 3. Фотографии срезов клубней картофеля: а – без покрытия полимером, б – с полимерным покрытием (увеличение  $\times 70$ ).

Mg  $10^{-6}\%$ ; полимер + НЧ Cu  $10^{-9}\%$ . В качестве контроля использовали клубни, обработанные водой. Обработка клубней препаратами, содержащими композицию НЧ или НЧ Cu, привела к

увеличению валовой урожайности на 3.6 и 3.3% соответственно, а доли стандартных клубней – на 1.5 и 2.9%. Результаты анализа фракционного состава клубней в полученном урожае 2021 г. не вы-

Таблица 1. Показатели прорастания клубней картофеля в лабораторных испытаниях биопрепаратов с наночастицами микроэлементов

Варианты обработки клубней	Число проростков опыт/конт., %	Средняя длина проростков, опыт/конт., %	Средняя масса проростков, опыт/конт., %
Контроль (без обработки)	100	100	100
Полимеры (0.5% Na–КМЦ + 1.25% ПЭГ)	118.3 $\pm$ 5.3	145.0 $\pm$ 7.2*	97.4 $\pm$ 3.9
Полимеры + НЧ В $10^{-4}\%$	109.4 $\pm$ 4.2	156.4 $\pm$ 7.8*	141.4 $\pm$ 6.7
Полимеры + НЧ В $10^{-5}\%$	93.7 $\pm$ 3.5	138.4 $\pm$ 6.2*	88.2 $\pm$ 3.5
Полимеры + НЧ В $10^{-6}\%$	135.1 $\pm$ 7.2*	96.7 $\pm$ 2.4	127.6 $\pm$ 4.8
Полимеры+ НЧ Mg $10^{-4}\%$	118.9 $\pm$ 2.3	126.1 $\pm$ 4.7	149.3 $\pm$ 7.2*
Полимеры + НЧ Mg $10^{-5}\%$	134.6 $\pm$ 6.3*	129.9 $\pm$ 3.9	127.6 $\pm$ 4.4
Полимеры + НЧ Mg $10^{-6}\%$	110.0 $\pm$ 3.8	148.8 $\pm$ 6.7*	147.4 $\pm$ 7.2*
Полимеры + НЧ Mo $10^{-5}\%$	126.3 $\pm$ 3.2	129.9 $\pm$ 4.2	128.3 $\pm$ 4.6
Полимеры + НЧ Mo $10^{-6}\%$	142.9 $\pm$ 6.8*	110.0 $\pm$ 5.3	119.7 $\pm$ 3.4
Полимеры+ НЧ Mo $10^{-7}\%$	109.4 $\pm$ 4.6	138.4 $\pm$ 6.2*	123.7 $\pm$ 3.8
Полимеры + НЧ Cu $10^{-7}\%$	142.9 $\pm$ 6.5*	131.3 $\pm$ 7.1*	131.6 $\pm$ 6.5*
Полимеры + НЧ Cu $10^{-8}\%$	128.6 $\pm$ 3.4	118.5 $\pm$ 3.8	148.0 $\pm$ 6.9*
Полимеры + НЧ Cu $10^{-9}\%$	122.9 $\pm$ 3.5	117.5 $\pm$ 3.3	195.4 $\pm$ 8.3*
Полимеры + НЧ Cu $10^{-7}\%$ + НЧ В $10^{-4}\%$ + + НЧ Mo $10^{-5}\%$ + НЧ Mg $10^{-4}\%$	106.0 $\pm$ 3.8	124.6 $\pm$ 4.2	150.7 $\pm$ 7.2*
Полимеры + НЧ Cu $10^{-8}\%$ + НЧ В $10^{-5}\%$ + + НЧ Mo $10^{-6}\%$ + НЧ Mg $10^{-5}\%$	110.0 $\pm$ 2.5	111.4 $\pm$ 3.9	124.3 $\pm$ 4.7
Полимеры+ НЧ Cu $10^{-9}\%$ + НЧ В $10^{-6}\%$ + + НЧ Mo $10^{-7}\%$ + НЧ Mg $10^{-6}\%$	118.3 $\pm$ 5.2	131.8 $\pm$ 5.9*	186.8 $\pm$ 7.8*

\* $p \leq 0.05$ .

**Таблица 2.** Влияние предпосадочной обработки клубней наночастицами микроэлементов в составе полимеров на продуктивность картофеля

Вариант	Урожайность клубней				Фракционный состав клубней, т/га		
	всего		в том числе товарных клубней		30–60 мм	>60 мм	<30 мм
	т/га	о/к, %	т/га	о/к, %			
Контроль	15.0 ± 0.4	100 ± 3.7	13.6 ± 1.2	100 ± 4.7	80.0 ± 1.3	10.4 ± 1.2	9.6 ± 1.4
Cu НЧ 10 <sup>-9</sup> % + В НЧ 10 <sup>-6</sup> % + + Mo НЧ 10 <sup>-7</sup> % + Mg НЧ 10 <sup>-6</sup> %	15.6 ± 0.5	103.6 ± 11.2	13.8 ± 0.8	101.5 ± 5.4	80.7 ± 15	7.9 ± 2.3	11.4 ± 0.9
Cu НЧ 10 <sup>-9</sup> %	15.6 ± 0.8	103.3 ± 5.8	14.0 ± 1.1	102.9 ± 5.1	79.7 ± 1.3	10.6 ± 1.9	9.7 ± 1.4

**Таблица 3.** Влияние предпосадочной обработки клубней наночастицами микроэлементов в составе полимеров на качество урожая

Варианты экспериментов	Количество пораженных клубней, %				Урожайность стандартного картофеля товарной фракции	
	всего	сухой гнилью	паршой обыкновенной	ризиктониозом	т/га	о/к, %
Контроль	5.2	3.5	1.3	0.3	12.9	100.0
НЧ Cu 10 <sup>-9</sup> % + НЧ В 10 <sup>-6</sup> % + + НЧ Mo 10 <sup>-7</sup> % + НЧ Mg 10 <sup>-6</sup> %	1.2	1.2	0.0	0.0	13.6	105.4
НЧ Cu 10 <sup>-9</sup> %	2.0	2.0	0.0	0.0	13.7	106.2

явили значительных различий в опытных и контрольной группах (табл. 2).

Через 1.5 мес после уборки урожая провели анализ клубней, который показал, что препараты с НЧ снизили количество пораженных патогенами клубней по сравнению с контролем. Количество больных клубней сухой гнилью при использовании для обработки комбинации НЧ Cu 10<sup>-9</sup>% + НЧ В 10<sup>-6</sup>% + НЧ Mo 10<sup>-7</sup>% + Mg НЧ 10<sup>-6</sup>% составляло 1.2%, что ниже контроля на 4.0%, при этом клубней, пораженных паршой обыкновенной и ризиктониозом, не обнаружено. При обработке картофеля НЧ Cu 10<sup>-9</sup>% также не обнаружено клубней, пораженных паршой обыкновенной и ризиктониозом, а поражение сухой гнилью составляло 2%. Анализ товарной фракции картофеля показал, что применение композиции НЧ и НЧ Cu позволило увеличить выход здорового картофеля на 5.4 и 6.2% по сравнению с контролем соответственно (табл. 3).

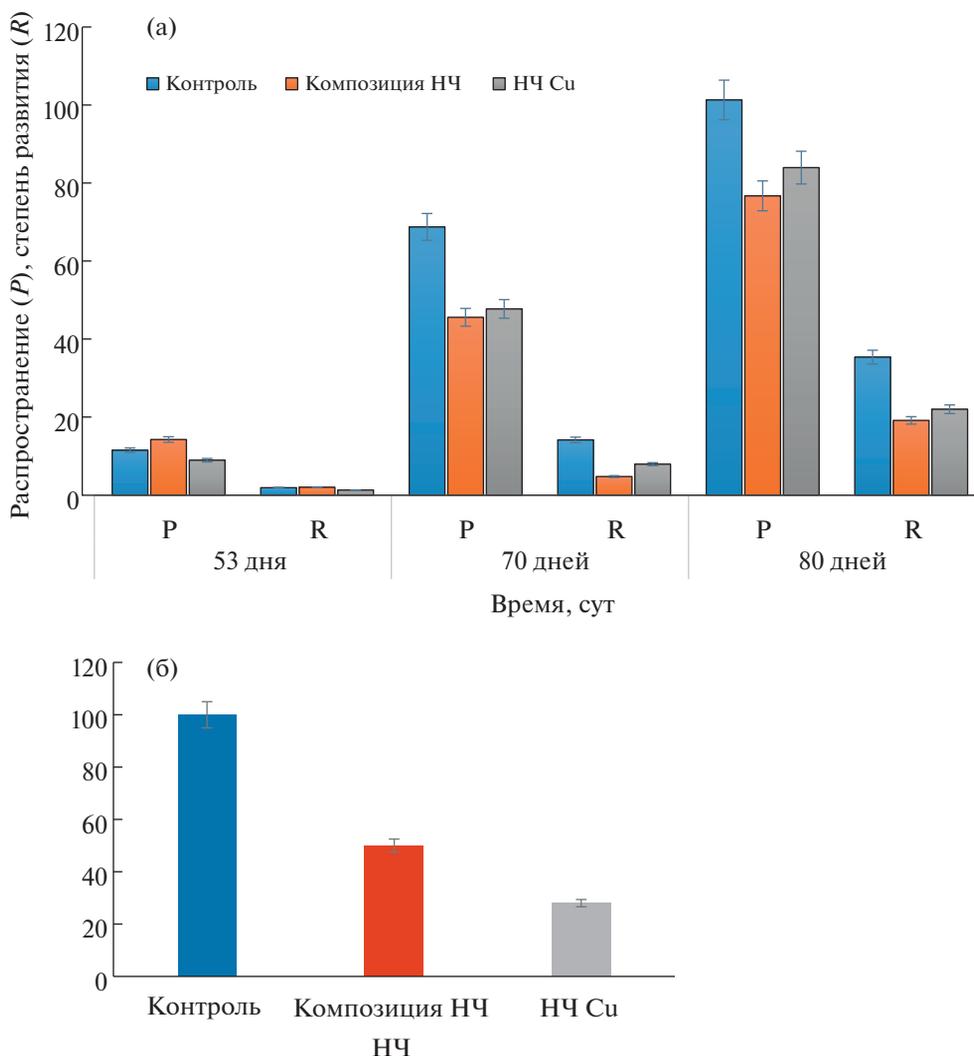
*Распространенность и развитие болезней на растениях картофеля.* На рис. 4 представлены данные по влиянию препаратов с НЧ микроэлементов на показатели распространенности и степени поражения альтернариозом и ризиктониозом растений картофеля. Активное распространение альтернариоза наблюдалось через 70 сут

роста растений, оно достигло 67.4% при степени поражения 13.9% в контрольной группе. Предпосадочная обработка клубней картофеля НЧ микроэлементов в составе полимеров снижала распространенность альтернариоза в 1.4–1.5 раза, степень поражения в 2.9 раза (композиция НЧ) и в 1.7 раза (НЧ Cu) по сравнению с контролем. Распространение ризиктониоза при обработке композицией НЧ и НЧ Cu уменьшалось в 2 и 3 раза соответственно по сравнению с контролем.

*Потребительские качества картофеля.* Проверка потребительских качеств клубней картофеля нового урожая при использовании предпосадочной обработки НЧ микроэлементов не выявила отличий от контроля: сенсорная оценка клубней показала общий индекс качества ≥4. Вкус испытуемой группы был очень хорошим, запах – приятным; потемнения мякоти как сразу после варки, так и через 12 ч не наблюдалось.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения высоких урожаев полноценных и здоровых клубней картофеля необходимо совершенствование системы подготовки семенного материала к посадке. Предпосадочное протравливание клубней картофеля помогает бороться с патогенами и вредителями, внесение в почву ми-



**Рис. 4.** Влияние предпосадочной обработки клубней НЧ микроэлементов в составе полимеров на распространение (P) и степень развития (R) *Alternaria solani* Sorauer (a) и распространение *Rhizoctonia solani* Kühn на растениях картофеля (б).

неральных и органических удобрений обеспечивает интенсивный рост растений и формирование нового урожая. С другой стороны, использование токсичных пестицидов и/или синтез новых химических средств, вследствие адаптации патогенов к используемым препаратам, приводит к экологическим, экономическим проблемам и нарушениям здоровья человека (развитие неврологических, опухолевых и аллергических заболеваний). Поэтому возникает необходимость в разработке новых подходов и средств для смягчения этих проблем. В этом отношении использование нанотехнологий вселяет оптимизм. Накапливается опыт использования наноструктурных пестицидов, микроэлементов в растениеводстве. Примененные нанобиопрепаратов способствует повышению урожайности и качества продукции, снижению дозы использования химических средств для защиты от вредителей и болезней [7, 18].

Обнаружена противогрибковая активность чистого и покрытого НЧ серебра  $\text{TiO}_2$  против *Fusarium solani*, вызывающего фузариозное увядание картофеля. Установлено, что фунгицидный эффект НЧ зависит от концентрации Ag и связан со способностью образовывать стабильные Ag-S и дисульфидные связи (R-S-S-R) в клеточном белке, вызывая повреждение клеток патогена. Сравнительное исследование действующих концентраций НЧ Ag (размером 12.7 нм) и фунгицида (Kocide) показало полное подавление развития *Alternaria solani* серебром в концентрации 25 мкг/мл, в то время как максимальное ингибирование фунгицидом происходит при концентрации 600 мкг/мл [19].

НЧ Se в природных полимерных матрицах арабиногалактана и крахмала обладают антибактериальным действием в отношении фитопатоген-

ного возбудителя кольцевой гнили картофеля *Clavibacter sepedonicus* (Cms) и почвенной бактерии *Rhodococcus erythropolis*. При этом НЧ Se стимулируют рост и развитие растений картофеля и его корнеобразование. Se не накапливается в тканях картофеля и не нарушает роста и образования биопленки почвенной бактерии *R. erythropolis* [20]. Для активного роста растения картофеля и получения высоких урожаев клубней необходимо достаточное количество в соответствующих пропорциях следующих элементов: Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo на фоне сбалансированного содержания NPK (комплексного удобрения, содержащего в своем составе азот, фосфор и калий). С учетом уникальных свойств НЧ использовали НЧ железа, молибдена, цинка, меди – элементов, обеспечивающих профилактику хлороза листьев, антистрессовое действие против неблагоприятных условий окружающей среды (заморозки, засуха, жара и т.д.), в качестве препаратов для предпосадочной обработки клубней картофеля. Установлена целесообразность интегрирования НЧ в стратегию борьбы с болезнями картофеля. Полевые испытания, проведенные в 2018 и 2019 г., показали, что в среднем за два года в результате предпосевной обработки семенных клубней нанопрепаратами Fe, Zn, Cu и Mo снизилась распространенность и степень развития *Alternaria spp.* с 29.2 и 7.4% соответственно до 10.8 и 2.0% и *Phytophthora infestans* с 12.8 и 2.1 до 0.9 и 0.1%, а распространенность *Rhizoctonia solani* – с 8.4 до 6.5%. При этом наблюдается увеличение урожайности на 25.7% (2018 г.) и 28.1% (2019 г.), урожайности товарных клубней на 11.7% (2018 г.) и 31.2% (2019 г.) [4, 21].

Погодные условия 2021 г. не способствовали развитию фитофтороза на картофеле. Нами не было обнаружено ни одного растения с признаками этого заболевания за весь вегетационный период. Однако в этот год отмечалось эпифитотийное развитие альтернариоза. Так, в середине июля распространение альтернариоза в контрольном варианте достигало 67.4% при степени поражения 13.9%, а к концу вегетации распространение альтернариоза в контрольном варианте достигло 99.3% при степени поражения 34.7%. В результате исследований по разработке оптимального состава НЧ в полимерном покрытии для предпосадочной обработки клубней на основании лабораторных испытаний была выбрана композиция НЧ Cu  $10^{-9}\%$  + НЧ В  $10^{-6}\%$  + НЧ Мо  $10^{-7}\%$  + Mg НЧ  $10^{-6}\%$  и НЧ Cu  $10^{-9}\%$ , обработка клубней которыми увеличивала валовую урожайность на 3.3 и 3.6% и урожайность стандартных клубней на 1.5 и 2.9%, а выход здорового картофеля на 5.4 и 6.2% по сравнению с контролем соответственно. Предпосадочная обработка клубней композицией НЧ и НЧ Cu снижала распространенность альтернариоза в 1.4–1.5 раза, степень

поражения – в 2.9 раза (композиция НЧ), в 1.7 раза (НЧ Cu) по сравнению с контролем, распространение ризоктониоза при обработке композицией НЧ и НЧ Cu уменьшалось в 2 и 3 раза по сравнению с контролем соответственно. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования полимерного покрытия с НЧ микроэлементов в предпосадочной обработке картофеля. Гидрофильная полимерная пленка защищает клубни картофеля от инфекций и вредителей, предохраняет их от увядания при засухе, предотвращает диффузию НЧ в почву. Такая предпосадочная обработка клубней набирает популярность [22]. Микроэлементы в виде НЧ в составе пленки стимулируют рост и развитие растений, активизируют естественные биологические процессы, повышают иммунитет растений, а также защищают картофель от вредителей и болезней. Введение в состав пленки меди – элемента с переменной валентностью, активно участвующего в реакции Хабера–Вейсса и генерирующего высокореакционные  $\text{OH}^{\cdot}$ -радикалы, способствует повреждению клеточной стенки фитопатогенов. Кроме того, медь образует устойчивые дисульфидные связи с клеточными белками, что приводит к гибели клеток патогена [19, 23].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нанопрепараты в виде композиции (НЧ Cu  $10^{-9}\%$  + НЧ В  $10^{-6}\%$  + НЧ Мо  $10^{-7}\%$  + Mg НЧ  $10^{-6}\%$ ) и НЧ Cu  $10^{-9}\%$  в составе карбоксиметилцеллюлозной пленки толщиной менее 10 мкм могут быть рекомендованы для предпосадочной обработки картофеля. НЧ микроэлементов эффективно защищают растение картофеля в течение всего вегетационного периода. Это позволяет повысить урожайность и качество продукции, снизить распространенность и степень развития фитопатогенов растений картофеля.

Авторы выражают благодарность А.Н. Жигачу, заведующему лабораторией ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, и сотрудникам его лаборатории.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сельское хозяйство в России. Стат. сб./Росстат. С. 29 М., 2021. 100 с.
2. Koch M., Naumann M., Pawelzik E. et al. // Potato Res. 2020. V. 63. P. 97. <https://doi.org/10.1007/s11540-019-09431-2>
3. Tolessa E.S. // World. J. Pharm. Life. 2021. V. 7. № 4. P. 201.

4. Zeyruk V.N., Vasilieva S.V., Belov G.L. et al. // *Potato Res.* 2022. V. 65. P. 273.  
<https://doi.org/10.1007/s11540-021-09518-9>
5. Elsharkaway M., Derbalah A. // *Pest. Manag. Sci.* 2019. V. 75 (3). P. 828.  
<https://doi.org/10.1002/ps.5185>
6. Pradhan S., Mailapalli D.R. // *J. Agric. Food Chem.* 2017. V. 65 (38). P. 8279.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02528>
7. Duhan J., Kumar R., Kumar N. et al. // *Nanotechnology Biotechnol Rep (Amst)*. 2017. V. 15. P. 11.  
<https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.03.002>
8. Elrys A.S., Abdo A.I.E., Desoky E.M. // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25 (7). P. 7076.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-1075-y>
9. Hansch R., Mendel R. // *Curr Opin Plant Biol.* 2009. V. 12. P. 259.  
<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.05.006>
10. Koch M., Winkelmann M.K., Hasler M. // *Sci Rep.* 2020. V. 10. P. 8796.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-65896-z>
11. Leipunsky I.O., Zhigach A.N., Kuskov M.L. et al. // *J. Alloys. Compd.* 2019. V. 778. P. 271.  
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.11.088>
12. Методика исследований по культуре картофеля. М., 1967.
13. Методика исследований по защите картофеля от болезней, вредителей, сорняков и иммунитету. М., 1995.
14. Методические указания по проведению регистрационных испытаний агрохимикатов и регуляторов роста растений. М., 2005.
15. ГОСТ 33996-2016 “Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества” М., 2016.
16. Lisinska G., Peksa A., Kita A. et al. // *Potato for Food* / Eds. Yee N., Bussel W. Belgium: Instytutu Hodowli, 2009. V. 2. P. 99.
17. Rakhmetova A.A., Alekseeva T.P., Bogoslovskaya O.A. et al. // *Nanotechnologies in Russia*. 2010. № 3–4. P. 271.
18. Sharma R., Dewanjee S., Chittaranjan K.C. // *Plant Nanotech.* 2016. V. 12. P. 13.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-42154-4>
19. Boxi S., Mukherjee K., Paria S. // *Nanotech.* 2016. V. 27 (8). P. 085103.  
<https://doi.org/10.1088/0957-4484/27/8/085103>
20. Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Ganenko T.V. et al. // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. V. 22 (9). P. 4576.  
<https://doi.org/10.3390/ijms22094576>
21. Zeyruk V.N., Vasilieva S.V., Derevyagina M.K. et al. // *Nanotechnologies in Russia*. 2019. V. 14. № 5–6. P. 248.  
<https://doi.org/10.1134/S1995078019030133>
22. Zhang L., Zhang G., Dai Z. et al. // *J. Sci. Food. Agric.* 2018. V. 37. P. 9657.  
<https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b03994>
23. Saharan V., Sharma G., Yadav M. et al. // *Int. J. Biol. Macromol.* 2015. V. 75. P. 346.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.01.027>