

НАНОМАТЕРИАЛЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО И КОНСТРУКЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

УДК 631.8

ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТОК ПРЕПАРАТАМИ КОЛЛОИДНОГО СЕРЕБРА, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИГЕКСАМЕТИЛЕН БИГУАНИДОМ, НА УРОЖАЙНОСТЬ И БИОХИМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАРТОФЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ПОЛЕВОГО ОПЫТА

© 2023 г. Ю. А. Крутяков^{1,2,*}, А. Г. Хина¹, М. Т. Мухина³, О. А. Шаповал³, Г. В. Лисичкин¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, Москва, Россия

*E-mail: sir_yurii@mail.ru

Поступила в редакцию 18.01.2023 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 14.03.2023 г.

Проведен полевой опыт по изучению эффекта предпосевной и фоллиарной обработки картофеля (лат. *Solanum tuberosum*) сорта Ред Скарлет дисперсиями наночастиц серебра, стабилизированных гидрохлоридом полигексаметилен бигуанида. Обработки растений картофеля дисперсиями привели к увеличению значений морфологических показателей растений – высоты стебля, массы ботвы и массы листьев, что, в свою очередь, стало причиной достоверного роста урожайности (от 10.6 до 21.9% по сравнению с контрольным вариантом) и товарного качества клубней. Дисперсии серебра продемонстрировали фитопротекторное действие на растения картофеля, которое проявилось в снижении степени поражения листьев фитофторозом (*P. infestans*) с 30 до 7–8%. На основании проведенного анализа ферментативной активности в тканях листьев растения предложено объяснение наблюдаемого фитопротекторного эффекта наночастиц серебра.

DOI: 10.56304/S1992722323030056

ВВЕДЕНИЕ

Резкий рост мирового населения, преодолевший в ноябре 2022 г. рубеж в 8 млрд чел., обостряет проблему глобальной продовольственной безопасности. В связи с этим внедрение современных технологий в сельскохозяйственный сектор, позволяющих увеличивать урожайность выращиваемых культур и повышать экономическую эффективность производства продуктов питания, приобретает особую значимость. Стимуляторы роста способствуют лучшему развитию сельскохозяйственных растений за счет увеличения показателей энергии прорастания и всхожести семян, укрепления корневой системы, ускорения процесса цветения, стимуляции формирования зерен и плодов и роста зеленой массы [1]. Кроме того, применение таких препаратов позволяет защитить растения от абиогенных и биогенных факторов внешней среды, таких как перепады температур, засухи, заморозки и воздействие фитопатогенов, что в совокупности с ростостимулирующим эффектом приводит к получению высокого урожая [2].

Традиционно в качестве регуляторов роста растений используют препараты, содержащие

синтетические аналоги эндогенных фитогормонов – низкомолекулярных веществ, вырабатываемых клетками и регулирующих экспрессию генов, ответственных, в том числе, за рост и развитие растений [3, 4]. Среди наиболее часто применяемых фитогормонов можно выделить ауксины, гиббереллины, брассиностероиды и цитокинины [2].

Другим подходом к стимуляции роста является опосредованное воздействие на растительный организм путем внесения небольших доз веществ, влияющих на активность ферментов, отвечающих за неспецифический иммунитет и индукцию активных форм кислорода (АФК), или эндогенный синтез фитогормонов [5, 6]. Особый интерес в данном направлении представляет использование препаратов на основе химически стабилизированных наночастиц благородных металлов, обладающих широким спектром биологических свойств [7]. Наиболее изученными и коммерчески доступными среди них являются наночастицы серебра (НЧАg), которые, с одной стороны, тонко воздействуют на гормональную и ферментативную системы растения, способствуя стимуляции роста [8–11], а с другой, в более высоких дозировках обладают собственной анти-

бактериальной и фунгицидной активностью, что позволяет защитить растения и будущий урожай от воздействия фитопатогенов [12–14]. Действительно, антимикробная активность серебра известна с античных времен, а ставшая коммерчески доступной с развитием нанотехнологий нанодисперсная форма металла обладает еще большей эффективностью в отношении подавления роста микроорганизмов [14, 15]. Кроме того, в опубликованных в последнее десятилетие работах было показано, что НЧАг способны увеличивать концентрацию ауксинов и уменьшать восприимчивость рецепторов к этилену, что способствует набору зеленой массы растений, развитию корневой системы, а также позволяет растениям лучше справляться с фитопатогенами и абиогенными стрессами [16, 17]. При этом, поскольку высвобождение с поверхности НЧАг ионов серебра Ag^+ , являющихся цитотоксичными только в высоких концентрациях, происходит постепенно, наносеребро не обладает выраженной фитотоксичностью в концентрации, достаточных для стимуляции роста растений и подавления фитопатогенных микроорганизмов [18].

Для сохранения агрегативной устойчивости НЧ в процессе их получения необходимо использовать эффективные стабилизаторы. Последние формируют потенциал скользящего слоя вблизи поверхности НЧ, превосходящий по модулю 30 мВ, и/или структурно-механический барьер, препятствующий их агрегации. Особый интерес для растениеводства представляет использование в качестве стабилизаторов НЧАг веществ, не только обеспечивающих коллоидную стабильность дисперсиям, но и проявляющих собственную биологическую активность и таким образом усиливающих биологическое действие НЧ [18]. Примером подобных веществ может выступать гидроксид полигексаметиленбигуанида (ПГМБ) — катионный полимер из ряда производных гуанидинов, повсеместно использующийся в качестве антисептика [19, 20]. Механизм антимикробного действия ПГМБ заключается в способности положительно заряженных макромолекул адсорбироваться на несущей отрицательный заряд поверхности фосфолипидной мембраны микроорганизмов и, приводя к ее перфорации, проникать в цитоплазматическое пространство и вызывать гибель клеток [21].

В [22] на примере сои было показано, что дисперсии на основе стабилизированных ПГМБ НЧ серебра (НЧАг-ПГМБ) обладают высокой активностью в отношении стимуляции роста растений и увеличения эффективности бобово-ризобийного симбиоза.

Несмотря на многочисленные доказательства положительного влияния НЧАг на морфологию и урожайность сельскохозяйственных растений,

ряд лабораторных исследований свидетельствует об их негативном эффекте на некоторые виды культур, что является одним из факторов, сдерживающих массовое применение НЧАг в растениеводстве [23]. В качестве возможных механизмов фитотоксичного действия НЧАг выделяют окислительные повреждения цитоплазматических компонентов клеток растения, вызываемые действием молекул АФК, образующихся в результате окислительного стресса при контакте клеток растения с НЧАг, а также подавление НЧАг роста полезных для развития растений бактерий микробиоты почв [7]. Так, в обзорах [24, 25] продемонстрировано, что обработка растений дисперсиями НЧАг (особенно в концентрациях по серебру выше 100 мг/л) может приводить к замедлению роста корней и стебля растений, а также снижению всхожести семян. Вероятнее всего такие противоречивые данные связаны с различиями в условиях проведения экспериментов, в первую очередь концентрации НЧАг, а также с различиями в биологической активности исследуемых НЧАг, полученных по разным протоколам с использованием различных стабилизирующих агентов [10].

Известно, что биологическая активность НЧАг, в том числе токсичность в отношении растительных клеток, определяется множеством факторов, таких как диаметр, заряд, форма, агрегативная стабильность НЧ и, что наиболее важно, химические свойства стабилизатора [26, 27]. Целью данной работы стало исследование влияния НЧАг-ПГМБ с экспериментально установленными коллоидно-химическими параметрами на морфологические характеристики, биологическую урожайность и устойчивость к фитофторозу растений картофеля сорта Ред Скарлет. Кроме того, для углубления понимания механизмов, лежащих в основе ростостимулирующего и фитопротекторного эффекта, оказываемого НЧАг-ПГМБ на растения картофеля, была определена активность ферментов пероксидазы (ПО), каталазы (КАТ) и полифенолоксидазы (ПФО).

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Получение и коллоидно-химические характеристики дисперсии НЧАг-ПГМБ

Получение дисперсии НЧАг-ПГМБ. НЧ серебра получали методом химического восстановления с использованием нитрата серебра и боргидрида натрия в качестве прекурсора и восстановителя соответственно [18]. Для получения 250 г дисперсии 50 г водного раствора нитрата серебра, содержащего 0.1968 г (1.116×10^{-3} моль) $AgNO_3$ ($\geq 99\%$, Sigma-Aldrich), добавляли при интенсивном перемешивании через капельную воронку к 150 г водного раствора, содержащего 0.6250 г ($1.443 \times$

$\times 10^{-3}$ моль) ПГМБ ($M = 3300$ кДа, Shanghai Terpron Chemical, КНР). Полученную смесь перемешивали в течение 15 мин, после чего в реакционную массу вносили по каплям при интенсивном перемешивании 50 г водного раствора, содержащего 0.0880 г (2.326×10^{-3} моль) боргидрида натрия NaBH_4 (99%, Acros Organics), и перемешивали реакционную массу 2 ч до полного прекращения выделения водорода. Концентрация серебра в полученной дисперсии составила 500 мг/л. Полученные дисперсии характеризовали методами спектrophотометрии в УФ- и видимой областях, просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), динамического рассеяния света (ДРС).

Спектрофотометрия. Спектры поглощения в УФ-видимом диапазоне $\lambda = 330\text{--}700$ нм регистрировали на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu Corp., Япония) при концентрации НЧ, равной 10 мг/л по металлическому серебру, с использованием кварцевых кювет с длиной оптического пути 10 мм.

ПЭМ. Электронные микрофотографии были получены на микроскопе JEOL JEM-2100 с ускоряющим напряжением 200 кВ (JEOL, Япония). Перед проведением анализа методом ПЭМ образец водной дисперсии НЧ серебра разбавляли в 5 раз дистиллированной водой, после чего 1–2 мкл разбавленной дисперсии наносили на углеродную сетку и сушили на воздухе.

ДРС. ζ -потенциал и гидродинамический диаметр НЧ в полученной дисперсии определяли на анализаторе Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments Ltd., Великобритания). Измерения проводили при угле рассеяния 90° и концентрации НЧ, равной 50 мг/л по металлическому серебру. Коэффициенты диффузии НЧАг и следующие из них гидродинамические размеры частиц были рассчитаны с помощью программы DynaLS v.2.0 (Alango, Израиль) при допущении, что распределение частиц по размерам соответствует мономодальному распределению Гаусса.

Определение биологической активности дисперсии НЧАг-ПГМБ на картофеле

Характеристика сорта картофеля. Исследования проводили в полевом опыте на раннеспелом сорте картофеля Ред Скарлет. Сорт отличается интенсивным и быстрым накоплением урожая товарной продукции уже к 45–55-му дню вегетации. Растение низкое или среднерослое, полупрямостоячее. Клубни отличаются выровненным внешним видом. Имеют продолговатую удлиненно-овальную форму с соотношением диаметра к длине 1/1.5–1.69 (индекс формы), средние или крупные размеры, массу 60–125 г. По кулинарному назначению сорт относится к типам А–В, т.е. универсальный.

Характеристика условий на опытном участке полевых испытаний. Полевые испытания проводили в июне–сентябре 2022 г. в Предкамской зоне Республики Татарстан, Россия. Вегетационный период большинства сельскохозяйственных культур, возделываемых на территории Республики Татарстан, протекает в теплый период со среднесуточной температурой воздуха выше 10°C , который в Предкамской зоне составляет 132 дня в год. Сумма среднесуточных активных температур выше 10°C составляет 2150°C . Средняя минимальная температура в зимний период в республике колеблется от -13 до -14.5°C . Почва участка, на котором закладывали опыт, – светло-серая лесная, содержание в пахотном слое гумуса высокое ($>3.0\%$), подвижного фосфора очень высокое (>250 мг/кг), обменного калия повышенное (121–170 мг/кг), обладает нейтральной реакцией среды (рН 6.1–7.0). Погодные условия во время вегетации картофеля в 2022 г. были неоднозначными для формирования высокого урожая. Количество выпавших за май осадков составило 50 мм, что на 13 мм больше средней многолетней нормы, а средняя температура воздуха была выше на 13.1°C . За июнь осадков выпало 33.6 мм, что на 38.4 мм меньше от среднемноголетней нормы, их распределение было неравномерным, основное количество выпало в первой декаде месяца. В июле основное количество осадков выпало в третьей декаде месяца, а в фазе цветения картофеля наблюдалась повышенная температура воздуха и недостаток атмосферной влаги.

Схема проведения полевого опыта. Схема опыта представлена пятью вариантами.

1. Контроль – фон НРК (внесение минеральных удобрений в количестве 40 кг/га в пересчете на каждый из трех элементов: азот, фосфор и калий).

2. Фон НРК + предпосадочная обработка клубней раствором ПГМБ (500 мг/л), расход раствора ПГМБ 150 мл/т клубней, расход рабочего раствора 15 л/т + двукратная листовая обработка растений раствором ПГМБ – первая в фазу бутонизации и вторая в фазу смыкания рядков, расход раствора ПГМБ 200 мл/га, расход рабочего раствора 300 л/га.

3. Фон НРК + предпосадочная обработка клубней дисперсией НЧАг-ПГМБ, расход дисперсии 150 мл/т клубней, расход рабочего раствора 15 л/т + однократная листовая обработка растений дисперсией НЧАг-ПГМБ в фазу смыкания рядков, расход дисперсии 200 мл/га, расход рабочего раствора 300 л/га.

4. Фон НРК + предпосадочная обработка клубней дисперсией НЧАг-ПГМБ, расход дисперсии 150 мл/т клубней, расход рабочего раствора 15 л/т + однократная листовая обработка растений дисперсией НЧАг-ПГМБ в фазу бутониза-

ции, расход дисперсии 200 мл/га, расход рабочего раствора 300 л/га.

5. Фон НРК + предпосадочная обработка клубней дисперсией НЧА_g-ПГМБ, расход дисперсии 150 мл/т клубней, расход рабочего раствора 15 л/т + двукратная листовая обработка растений дисперсией НЧА_g-ПГМБ – первая в фазу бутонизации и вторая в фазу смыкания рядков, расход дисперсии 200 мл/га, расход рабочего раствора 300 л/га.

Обработку растений проводили в вечерние часы при температуре воздуха 15–18°C, безветрии и отсутствии росы. Для фолитарной обработки использовали ранцевый бензиновый опрыскиватель. Опыт закладывали в четырехкратной повторности, норма посадки клубней – 3.1 т/га (по схеме 75 × 30 см, средняя масса посадочного материала 70 г), в среднем густота посадки составляла ~44000 штук посадочных клубней/га. Площадь опытных делянок – 100 м², площадь учетных делянок – 50 м². Предшествующая культура – озимая пшеница.

Оценку устойчивости надземной части растений картофеля к фитофторозу, вызываемому оомикетом *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, в полевых условиях проводили визуально на основе универсальной девятибалльной шкалы: 9 баллов – симптомы поражения отсутствуют; 1 балл – все листья и стебли растений полностью поражены заболеванием.

Уборку картофеля проводили вручную с каждой делянки с отбором образцов на определение биохимических показателей. Учет и структуру урожая клубней картофеля проводили с каждой делянки, взвешивая фракции отдельно.

Статистическую обработку данных и определение наименьшей существенной разности в морфологических показателях и урожайности растений картофеля проводили по стандартной методике Б.А. Доспехова “Обработка опытов с однолетними культурами”, основанной на выполнении критерия Фишера [28].

Для определения ферментативной активности в листьях растения отобранные ткани после отделения помещали в жидкий азот и транспортировали в сосудах Дьюара при температуре –196°C до места проведения дальнейших исследований.

Определение ферментативной активности

Активность пероксидазы (ПО, КФ 1.11.1.7) определяли по спектрофотометрической методике А.Н. Бояркина, основанной на измерении кинетики окисления бензидина (4,4'-диаминодифенила) пероксидом водорода в присутствии фермента [29].

Активность полифенолоксидазы (ПФО, КФ 1.10.3.1) определяли по спектрофотометрической методике А.Н. Бояркина, основанной на измере-

нии кинетики окисления пирокатехина кислородом воздуха в присутствии ПФО путем регистрации увеличения оптической плотности продуктов окисления пирокатехина [29].

Активность каталазы (КАТ, НФ 1.11.1.6) определяли по газометрической методике, основанной на измерении объема выделившегося кислорода после добавления к содержащему КАТ водному экстракту растений пероксида водорода [29].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дисперсии НЧА_g-ПГМБ

В ходе синтеза при добавлении в реакционную массу NaBH₄ наблюдали резкий переход окраски смеси из бесцветной в желто-коричневую, что свидетельствовало об образовании НЧ серебра. Полученная дисперсия НЧА_g была охарактеризована методом спектрофотометрии в УФ-видимом диапазоне. В спектре поглощения свежеприготовленной дисперсии наблюдалась линия с максимумом $\lambda = 434$ нм (рис. 1), соответствующая поверхностному плазмонному резонансу (ППР) НЧ серебра. При этом относительно большая ширина ППР свидетельствует о высокой степени полидисперсности получившихся НЧ. Для оценки коллоидной стабильности полученной дисперсии НЧА_g был проведен ее повторный спектрофотометрический анализ спустя 3 и 12 мес после синтеза (рис. 1). Из представленного спектра поглощения видно, что за 12 мес высота ППР изменилась незначительно (менее чем на 2%), что свидетельствует о высокой коллоидной устойчивости дисперсии. Однако небольшое смещение максимума поглощения ($\lambda = 438$ и 441 нм спустя 3 и 12 мес после синтеза соответственно), а также некоторое уширение линии ППР свидетельствуют о некоторой агрегации и укрупнении НЧ с течением времени.

С помощью ПЭМ была установлена морфология полученных НЧА_g (рис. 2), они имели близкую к сферической форму и средний диаметр 4.92 ± 2.66 нм. Гистограмма распределения полученных НЧА_g по размерам представлена на рис. 3. Несмотря на то что большинство частиц имело диаметр, близкий к среднему значению, в дисперсии также присутствовало ~4% частиц с диаметром 10 нм и выше, что согласуется с данными УФ-видимой спектроскопии, свидетельствующими о высокой полидисперсности системы.

Методом ДРС был определен ζ -потенциал полученных НЧА_g $\zeta = 42.6 \pm 1.3$ мВ, а также их гидродинамический диаметр $d_{гд} = 48.8 \pm 0.5$ нм.

Полевые испытания

Полученную дисперсию НЧА_g-ПГМБ, содержащую 500 мг/л НЧ серебра и 500 мг/л полигекса-

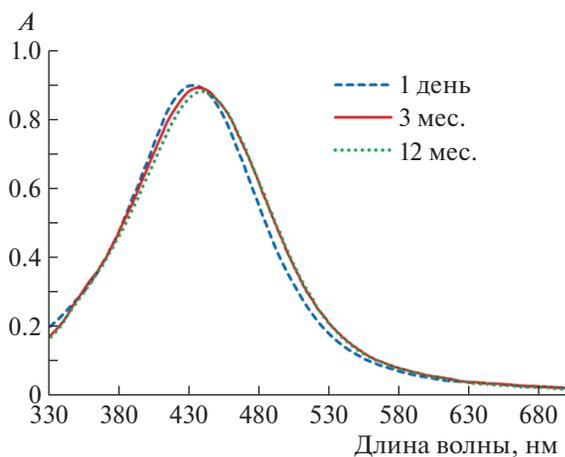


Рис. 1. Спектры поглощения в видимой области водной дисперсии НЧАg-ПГМБ.

метиленбигуанида, испытывали на раннеспелом сорте картофеля Ред Скарлет в условиях полевого опыта в Предкамской зоне Республики Татарстан (Россия). В рамках полевого опыта осуществляли предпосадочную обработку клубней раствором ПГМБ или дисперсией НЧАg-ПГМБ, а также листовую обработку растений в фазу бутонизации и/или в фазу смыкания рядков согласно схеме опыта, описанной в предыдущем разделе.

Поскольку ~95% сухого органического вещества формируется в процессе фотосинтеза, формирование максимального урожая картофеля возможно без создания достаточной зеленой поверхности, обеспечивающей фотосинтетическую деятельность. Фолиарная обработка клубней и вегетирующих растений картофеля раствором ПГМБ не приводила к значимым изменениям морфологических показателей картофеля (табл. 1, вариант 2). Напротив, согласно результатам статистической обработки данных, обработка дисперсиями НЧАg-ПГМБ во всех вариантах приводила к достоверному увеличению надземной зеленой массы растения и других исследованных

показателей при выращивании картофеля. Так, однократная фолиарная обработка в фазу бутонизации или смыкания рядков (табл. 1, варианты 3 и 4 соответственно) приводила к статистически значимому увеличению высоты стебля, а также росту массы ботвы и листьев растений по сравнению с фоновым вариантом 1. При этом обработка растений в более раннюю фазу смыкания рядков (вариант 3) давала несколько больший ростостимулирующий эффект, чем в фазу бутонизации (вариант 4). При увеличении кратности обработок растений дисперсией НЧАg-ПГМБ (вариант 5) наблюдался еще больший ростостимулирующий эффект, что выражалось в большей прибавке к длине стебля по отношению к фоновому варианту, а также большему нарастанию надземной массы ботвы и листьев растений.

Помимо ростостимулирующего эффекта дисперсии НЧАg-ПГМБ оказали фитопротекторное действие на надземную часть растений картофеля, что выражалось в снижении степени поражения кустов фитофторозом. Сорт Ред Скарлет обладает средней степенью устойчивости к фитофторозу. В текущем опыте это отразилось в поражении ~30% поверхности листьев растений в случае отсутствия обработок растений дисперсией НЧАg-ПГМБ. Однако предпосадочная обработка клубней и однократная фолиарная обработка вегетирующих растений позволили снизить этот показатель до 10–15%. Более того, при увеличении кратности фолиарной обработки до двух степень поражения фитофторозом листьев растений снизилась до 7–8%. Обработка раствором ПГМБ не привела к значимым изменениям степени поражения растений фитофторозом. В соответствии с общепринятой на территории России шкалой каждому опытному варианту был присвоен балл устойчивости к фитофторозу, полученные результаты сведены в табл. 2.

Урожайность картофеля является интегрированным и наиболее важным для сельского хозяйства показателем эффективности применения

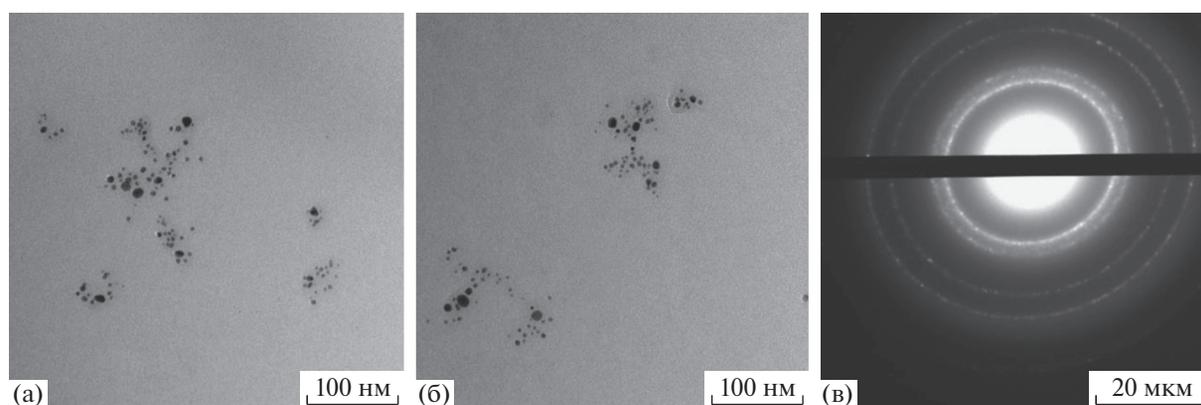


Рис. 2. ПЭМ-изображения дисперсии НЧАg-ПГМБ (а, б), электронная дифрактограмма (в).

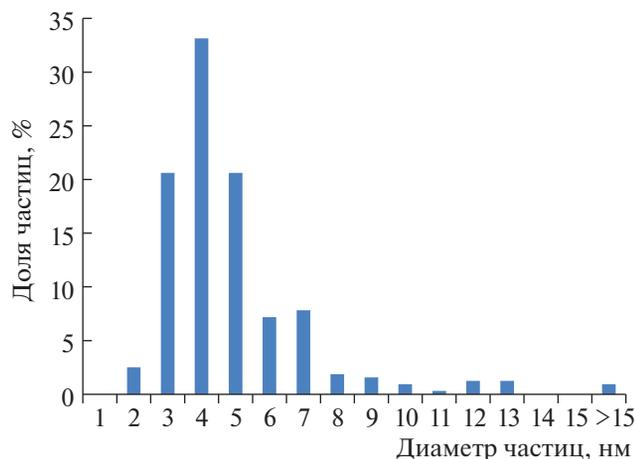


Рис. 3. Дисперсионный состав НЧAg-ПГМБ.

средств защиты растений. Несмотря на то что погодные условия по влагообеспеченности в августе 2022 г. негативно сказались на урожайности, предпосадочная и фолитарная обработки дисперсией НЧAg-ПГМБ позволили значительно увеличить валовый урожай картофеля Ред Скарлет (табл. 3). Так, в условиях проведения полевого опыта урожайность картофеля сорта Ред Скарлет находилась в диапазоне от 13.52 до 16.48 т/га. Прибавка урожайности в вариантах с применением дисперсии НЧAg-ПГМБ составила 1.44–2.96 т/га, при этом, как и в случае с морфологическими показателями растений, наилучшего эффекта удалось достичь при максимальной норме расхода препарата, достигаемой за счет предпосадочной обработки клубней и двукратной фолитарной обработки вегетирующих растений. Так, наибольшая

урожайность (16.48 т/га) была получена в варианте 5 (Фон НРК + предпосадочная обработка клубней + двукратная листовая обработка растений). Примечательно, что при однократной обработке вегетирующих растений эффективнее оказалось более раннее внесение дисперсии в фазу смыкания рядков, нежели в фазу бутонизации. Данный эффект может быть связан с более длительным временем воздействия в варианте 4 НЧAg, обладающих пролонгированным действием за счет медленного окисления кислородом воздуха и эндогенными АФК и постепенного высвобождения активных ионов Ag^+ со своей поверхности, воздействующих на гормональную и ферментативную систему растений.

Обработки растений разными дозами НЧAg-ПГМБ благотворно отразились и на структуре урожая. Так, предпосадочная обработка клубней с двукратной листовой обработкой растений (вариант 5) способствовала максимальному нарастанию массы клубней и в пересчете на один куст она составила 412.7 г, что на 74.6 г выше контрольного варианта. Кроме того, под действием предпосадочных обработок клубней дисперсией НЧAg-ПГМБ и некорневых подкормок растений увеличивалось количество клубней в расчете на 1 куст по сравнению с контрольным вариантом. Так, максимальное количество клубней в пересчете на один куст также отмечено в варианте 5 опыта, которое составило 8.3 шт., что на 1.2 шт. больше, чем у фонового варианта без обработок НЧAg-ПГМБ.

Как и в опытах по изучению морфологических показателей и устойчивости растений к действию фитофтороза, обработка картофеля растворами,

Таблица 1. Показатели роста и развития растений картофеля в зависимости от регламента применения дисперсии НЧAg-ПГМБ

Вариант	Вариант	Высота стебля, см	Масса ботвы, г/куст	Масса листьев, г/куст
1	Фон – НРК	41.5	187.27	96.34
2	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней ПГМБ + двукратная листовая обработка растений ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	40.9	185.01	96.18
3	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧAg-ПГМБ + однократная листовая обработка растений НЧAg-ПГМБ в фазу смыкания рядков	46.3	216.20	108.34
4	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧAg-ПГМБ + однократная листовая обработка растений НЧAg-ПГМБ в фазу бутонизации	43.7	207.07	106.52
5	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧAg-ПГМБ + двукратная листовая обработка растений НЧAg-ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	48.4	224.07	115.31
	НСР ₀₅	1.76	14.92	6.02

Таблица 2. Развитие фитофтороза картофеля в зависимости от регламента применения дисперсии НЧАг-ПГМБ

Вариант	Вариант	Степень устойчивости растений к фитофторозу, балл
1	Фон – НРК	5
2	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней ПГМБ + двукратная листовая обработка растений ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	5
3	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧАг-ПГМБ + однократная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазу смыкания рядков	7
4	Фон НРК + предпосадочная обработка НЧАг-ПГМБ клубней + однократная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазу бутонизации	7
5	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧАг-ПГМБ + двукратная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	8

Таблица 3. Показатели роста количества и качества урожая в зависимости от регламента применения дисперсии НЧАг-ПГМБ

Вариант	Вариант	Валовый урожай, т/га	Среднее количество клубней 1 куста, шт.	Средняя масса клубней 1 куста, г
1	Фон – НРК	13.52	7.1	338.1
2	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней ПГМБ + двукратная листовая обработка растений ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	13.4	7.0	335.1
3	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧАг-ПГМБ + однократная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазу смыкания рядков	15.92	7.9	398.1
4	Фон НРК + предпосадочная обработка НЧАг-ПГМБ клубней + однократная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазу бутонизации	14.96	7.4	374.6
5	Фон НРК + предпосадочная обработка клубней НЧАг-ПГМБ + двукратная листовая обработка растений НЧАг-ПГМБ в фазах смыкания рядков и бутонизации	16.48	8.3	412.7
	НСР ₀₅	0.98	0.4	11.5

содержащими ПГМБ без НЧАг (вариант 2), не привела к статистически значимым различиям в количестве и структуре урожая по сравнению с фоновым вариантом.

Для углубления понимания биохимических механизмов, лежащих в основе положительных эффектов, оказываемых НЧАг-ПГМБ на сельскохозяйственные показатели картофеля сорта Ред Скарлет, была определена активность важнейших растительных ферментов – пероксидазы, каталазы и полифенолоксидазы. Установлено, что их активность последовательно возрастала с увеличением вносимых доз дисперсии НЧАг-ПГМБ (табл. 4), что может свидетельство-

вать об активации неспецифического иммунитета растений под действием серебра [32]. Таким образом, пероксидазная система играет ключевую роль в окислительно-восстановительных процессах клетки, контролируя интенсивность окислительных реакций вплоть до развития в них реакции сверхчувствительности (СВЧ-реакции), препятствующей распространению фитопатогенов по тканям растений [31]. Накопление фенольных соединений, особенно в эпидермальных тканях растения, о котором косвенно свидетельствует увеличение активности ПФО, также является важным звеном формирования защитных реакций против фитопатогенов [32, 33]. Рост ак-

Таблица 4. Влияние обработок НЧАг-ПГМБ на активность ферментов ПО, КАТ и ПФО в листьях растений картофеля

Вариант	Активность пероксидазы, (Ед./г. сырой массы × с)	Активность каталазы, (мкМ H ₂ O ₂ /г. сырой массы × мин)	Активность полифенолоксидазы, (Ед./г. сырой массы × мин)
1	211 ± 4	1328 ± 26	34.9 ± 1.2
2	214 ± 5	1299 ± 28	34.8 ± 1.4
3	242 ± 3	1632 ± 24	33.4 ± 2.1
4	230 ± 5	1588 ± 30	38.2 ± 1.6
5	256 ± 3	1784 ± 31	41.5 ± 1.2

тивности КАТ, вероятно, связан с успешной регуляцией растениями интенсивности контролируемого окислительного стресса, вызываемого эндогенным пероксидом водорода и другими АФК, генерирующимися при активизации пероксидаз клеточной стенки после их контакта с НЧАг [34, 35].

Следовательно, увеличение активности ПО и ПФО в результате контролируемого умеренного абиогенного стресса, вызванного воздействием наносеребра, способно приводить к активации механизмов неспецифической защиты растения, что, вероятно, и явилось причиной повышенной устойчивости обработанных дисперсией НЧАг-ПГМБ кустов картофеля к воздействию фитопатогенного оомицета *Phytophthora infestans*. Действительно, количество вносимого в проведенных полевых опытах наносеребра составляет всего 75 мг в пересчете на тонну клубней при предпосадочной обработке и 100 мг в пересчете на гектар при фолиарном опрыскивании растений, что значительно ниже эффективных фунгицидных концентраций НЧАг [36]. Таким образом, фитопротекторное действие НЧАг обусловлено не контактным действием НЧАг на клетки фитопатогенов, а воздействием НЧ на гормональную и ферментативную системы растения, что продемонстрировано в данной работе через увеличение активности ферментов ПО и ПФО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изучено влияние предпосадочной и фолиарной обработок водными дисперсиями НЧ серебра, стабилизированных гидрохлоридом полигексаметилен бигуанида (ПГМБ), на морфологические характеристики, урожайность и устойчивость к фитофторозу растений картофеля сорта Ред Скарлет. По результатам проведенного полевого эксперимента установлено, что обработки картофеля дисперсиями НЧАг приводят к увеличению морфологических параметров растения, таких как высота стебля, масса ботвы и масса листьев, что, в свою очередь, приводит к достоверному увеличению урожайности картофеля, а также улучшению структуры урожая. Так, примене-

ние дисперсии НЧАг-ПГМБ позволило получить прибавку к урожайности в 1.44–2.96 тонны в пересчете на гектар. При этом увеличение кратности обработок растений и смещение времени фолиарного опрыскивания на более ранний срок приводили к увеличению положительных эффектов, оказываемых НЧАг-ПГМБ на сельскохозяйственные показатели картофеля.

Кроме того, дисперсии НЧАг-ПГМБ продемонстрировали фитопротекторное действие, что выразилось в снижении степени поражения листьев картофеля фитофторозом. Поскольку количества НЧАг, вносимых в ходе полевого опыта в пересчете на массу обрабатываемых клубней или площадь посевов, были значительно ниже эффективных подавляющих рост *P. Infestans* концентраций наносеребра, данный эффект не может быть обусловлен контактным действием наночастиц на клетки фитопатогена. Однако рост активности ферментов ПО, КАТ и ПФО, наблюдаемый в тканях листьев растений в результате контролируемого умеренного абиогенного стресса, вызванного действием НЧАг, свидетельствует об активации неспецифического иммунитета, что и стало причиной повышенной устойчивости обработанных дисперсией НЧАг-ПГМБ кустов картофеля к воздействию фитопатогенного *P. Infestans*.

Таким образом, показано, что даже в низких концентрациях, недостаточных для прямого фунгицидного и бактерицидного эффекта, НЧАг способны оказывать фитопротекторное действие, опосредованно влияя на физиологические процессы в тканях растений картофеля, активируя ферментативную систему и таким образом индуцируя системную устойчивость. Данное свойство НЧАг расширяет окно возможностей их применения в качестве действующего вещества средств защиты растений и потенциально может быть использовано для снижения общей экологической нагрузки, оказываемой химическими фунгицидами на сельскохозяйственные растения и агроценозы в целом. Сочетание уникальных биохимических свойств, лежащих в основе механизмов ростостимулирующих и фитопротекторных свойств наносеребра, обуславливает высо-

кую актуальность дальнейших исследований в области применения НЧАг в растениеводстве и делает эту тему заслуживающей детального изучения. Особый интерес в указанном направлении, на наш взгляд, представляют НЧАг, стабилизированные различными биологически активными соединениями, усиливающими или дополняющими эффекты, оказываемые НЧАг на растения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bons H.K., Kaur M.* // J. Horticultural Sci. Biotechnol. 2020. V. 95. № 2. P. 137.
<https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1660591>
2. *Sabagh A.E.L., Mbarki S., Hossain A. et al.* // Frontiers in Agronomy. 2021. V. 3.
<https://doi.org/10.3389/fagro.2021.648694>
3. *Ji Y., Wang A.* // Plants. 2021. V. 10.
<https://doi.org/10.3390/plants10102061>
4. *Kosakivska I.V., Vedenicheva N.P., Babenko L.M. et al.* // Mol. Biol. Rep. 2022. V. 49. № 1. P. 617.
<https://doi.org/10.1007/s11033-021-06802-2>
5. *Asija S., Seth T., Umar S., Gupta R.* // J. Plant Growth Regul. 2022. V. 41. № 7.
<https://doi.org/10.1007/s00344-022-10837-5>
6. *Shukla P.S., Borza T., Critchley A.T., Prithiviraj B.* // Front. Mar. Sci. 2016. V. 3. Art. 81.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2016.0008>
7. *Burketová L., Martinec J., Siegel J. et al.* // Biotechnol. Adv. 2022. V. 58.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107929>
8. *Tariq M., Mohammad K.N., Ahmed B. et al.* // Molecules. 2022. V. 27.
<https://doi.org/10.3390/molecules27154754>
9. *Sadak M.S.* // Bull. Natl. Res. Cent. 2019. V. 43.
<https://doi.org/10.1186/s42269-019-0077-y>
10. *Mahajan S., Kadam J., Dhawal P. et al.* // Plant Cell Tissue and Organ Culture. 2022. V. 150. P. 15.
<https://doi.org/10.1007/s11240-022-02249-w>
11. *Khan I., Awan S.A., Raza M.A. et al.* // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2021. V. 28. № 11. P. 13712.
<https://doi.org/10.1007/s11356-020-11612-3>
12. *Gupta N., Upadhyaya C.P., Singh A. et al.* // Nanobiotechnology Applications in Plant Protection. Springer International Publishing, 2018. P. 247.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8_9
13. *Mondal A., Chowdhury S., Mondal N.K. et al.* // Int. J. Environ. Sci. Technol. 2022. V. 19. P. 1573.
<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03181-w>
14. *Khina A.G., Krutyakov Y.A.* // Appl. Biochem. Microbiol. 2021. V. 57. P. 683.
<https://doi.org/10.1134/S0003683821060053>
15. *Barillo D.J., Marx D.E.* // Burns. 2014. V. 40. P. 3. PMID:
<https://doi.org/10.1016/j.burns.2014.09.00925418435>
16. *Mahendran D., Geetha N., Venkatachalam P.* // In vitro Plant Breeding towards Novel Agronomic Traits. Singapore: Springer, 2019. P. 59.
https://doi.org/10.1007/978-981-32-9824-8_4
17. *Mahendran I D., Kavi Kishor P.B., Geetha N., Venkatachalam P.* // J. Appl. Phycol. 2018. V. 30 № 2. P. 1425.
<https://doi.org/10.1007/s10811-017-1293-1>
18. *Krutyakov Y.A., Kudrinsky A.A., Gusev A.A. et al.* // Mater. Res. Expr. 2017. V. 4. № 7.
<https://doi.org/10.1088/2053-1591/aa7a2e>
19. *Feng L., Wu F., Li J. et al.* // Postharvest Biol. Technol. 2011. V. 61. P. 160.
<https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2011.03.002>
20. *Ampawong S., Aramwit P.* // J. Biomater. Sci. Polym. Ed. 2017. V. 28. № 13. P. 1286.
<https://doi.org/10.1080/09205063.2017.1321339>
21. *Sowlati-Hashjin S., Carbone P., Karttunen M.* // J. Phys. Chem. B. 2020. V. 124. № 22. P. 4487.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c02609>
22. *Krutyakov Yu.A., Mukhina M.T., Shapoval O.A., Zargar M.* // Agronomy. 2022. V. 12. № 6.
<https://doi.org/10.3390/agronomy12061473>
23. *Siddiqi K.S., Husen A.* // Crit. Rev. Biotechnol. 2022. V. 42. № 7. P. 973.
<https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1975091>
24. *Sharma P., Bhatt D., Zaidi M.G.H. et al.* // Appl. Biochem. Biotechnol. 2012. V. 167. P. 2225.
<https://doi.org/10.1007/s12010-012-9759-8>
25. *Amooaghaie R., Tabatabaei F., Ahadi A.M.* // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2015. V. 113. P. 259.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.12.017>
26. *Abramenko N., Semenova M., Khina A. et al.* // Nanomaterials (Basel). 2022. V. 12. № 22.
<https://doi.org/10.3390/nano12224003>
27. *Kudrinskiy A., Zherebin P., Gusev A. et al.* // Nanomaterials (Basel). 2020. V. 10. № 8.
<https://doi.org/10.3390/nano10081459>
28. *Ермаков А.И., Арасимович В.В., Ярош Н.П.* Методы биохимического исследования растений. Л.: Агропромиздат, 1987. 430 с.
29. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат., 1985. 351 с.
30. *Segal L.M., Wilson R.A.* // Fungal Genet. Biol. 2018. V. 110. P. 1.
<https://doi.org/10.1016/j.fgb.2017.12.003>
31. *Camejo D., Guzmán-Cedeño Á., Moreno A.* // Plant Physiol Biochem. 2016. V. 103. P. 10.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.02.035>
32. *Zhang J., Sun X.* // Phytochemistry. 2021. V. 181.
<https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2020.112588>
33. *Slobodníková L., Fialová S., Rendeková K. et al.* // Molecules. 2016. V. 21. № 12.
<https://doi.org/10.3390/molecules21121717>
34. *Yan A., Chen Z.* // Int. J. Mol. Sci. 2019. V. 20. № 5.
<https://doi.org/10.3390/ijms20051003>
35. *Tavanti T.R., Melo A.A.R., Moreira L.D.K. et al.* // Plant. Physiol. Biochem. 2021. V. 160. P. 386.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.040>
36. *Mansoor S., Zahoor I., Baba T.R. et al.* // Front. Nanotechnol. 2021. V. 3.
<https://doi.org/10.3389/fnano.2021.679358>