

DOI: 10.7868/S3034574X26020082
УДК 571.27:632.4:632.938:633.11

Оригинальная статья

ВЛИЯНИЕ НАНОКОМПОЗИТОВ ХИТОЗАН-Ag НА РАЗВИТИЕ ЗАЩИТНЫХ МЕХАНИЗМОВ РАСТЕНИЙ КАРТОФЕЛЯ И УСТОЙЧИВОСТЬ К *Phytophthora infestans*

Л.Г. Яруллина^{1,*}, Е.А. Черепанова¹, Г.Ф. Бурханова¹, Е.А. Заикина¹, В.О. Цветков²,
А.В. Сорокань¹, И.С. Марданшин³, И.Я. Фаткуллин¹, А.Д. Пустовая¹,
Ж.Н. Калацкая⁴, К.С. Гилевская⁵

¹ Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Российская Федерация

² Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

³ Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук, Уфа, Российская Федерация

⁴ Институт экспериментальной ботаники имени В.Ф. Купревича Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

⁵ Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

*E-mail: yarullina@bk.ru

Аннотация. В работе проведена сравнительная оценка влияния двух различных по структуре наноконкомпозитов хитозан-серебро (НК Хит-Ag 1 и НК Хит-Ag 2) на устойчивость растений к *Phytophthora infestans*, состояние про-/антиоксидантной системы, транскрипционную активность генов PR-белков и продуктивность картофеля. Выявлена зависимость биологической активности наноконкомпозитов Хит-Ag от их структуры. Механизмы активации защитных систем картофеля под воздействием наноконкомпозитов Хит-Ag были опосредованы накоплением пероксида водорода, снижением активности каталазы и повышением уровня транскрипции генов, кодирующих PR-белки: хитиназу (PR-3), тауматин-подобный белок (PR-5), РНК-азу (PR-10) и метилтрансферазу (MT). Показано, что обработка наноконкомпозитом Хит-Ag 2 снижала степень поражения листьев *P. infestans* и увеличивала массу мини-клубней картофеля. Полученные данные свидетельствуют о том, что наноконкомпозиты хитозан-серебро являются перспективными биопрепаратами для повышения устойчивости и продуктивности картофеля.¹

Ключевые слова: *Solanum tuberosum*, *Phytophthora infestans*, хитозан, наночастицы Ag, про-/антиоксидантная система, PR-белки, продуктивность

Финансирование. Работа выполнялась при финансовой поддержке гранта РНФ № 23-16-00139.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи.

Ссылка для цитирования: Яруллина Л.Г., Черепанова Е.А., Бурханова Г.Ф., Заикина Е.А., Цветков В.О., Сорокань А.В., Марданшин И.С., Фаткуллин И.Я., Пустовая А.Д., Калацкая Ж.Н., Гилевская К.С. Влияние наноконкомпозитов хитозан-Ag на развитие защитных механизмов растений картофеля и устойчивость к *Phytophthora infestans*. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 2. С. 230–246. <https://doi.org/10.7868/S3034574X26020082>

© Л. Г. Яруллина, Е. А. Черепанова, Г. Ф. Бурханова, Е. А. Заикина, В. О. Цветков, А. В. Сорокань, И. С. Марданшин, И. Я. Фаткуллин, А. Д. Пустовая, Ж. Н. Калацкая, К. С. Гилевская, 2026

¹**Сокращения:** НЧ Ag — наночастицы серебра; НК — наноконкомпозиты; Хит-Ag — хитозан-серебро; MT — метилтрансфераза; ФБ — фосфатный буфер; КАТ — каталаза; ПО — пероксидаза.

THE EFFECT OF CHITOSAN-AG NANOCOMPOSITES ON THE DEVELOPMENT OF PROTECTIVE MECHANISMS IN POTATO PLANTS AND RESISTANCE TO *Phytophthora infestans*

L.G. Yarullina^{1,*}, E.A. Cherepanova¹, G.F. Burkhanova¹, E.A. Zaikina¹, V.O. Tsvetkov²,
A.V. Sorokan¹, I.S. Mardanshin³, I.Y. Fatkullin¹, A.D. Pustovaya¹,
J.N. Kalatskaja⁴, K.S. Hileuskaya⁵

¹ Institute of Biochemistry and Genetics — a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

² Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

³ Bashkir Research Institute of Agriculture — a separate structural unit of the Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

⁴ Institute of Experimental Botany, V. F. Kuprevich National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁵ Institute of Chemistry of New Materials National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

*E-mail: yarullina@bk.ru

Abstract. The work carried out a comparative assessment of the effect of two structurally different chitosan-silver nanocomposites (Ch-Ag 1 and Ch-Ag 2) on plant resistance to *Phytophthora infestans*, the state of the pro-/antioxidant system, the transcriptional activity of PR protein genes and potato productivity. The dependence of the biological activity of Ch-Ag nanocomposites on their structure has been revealed. The mechanisms of activation of potato defense systems under the influence of Ch-Ag nanocomposites were mediated by the accumulation of hydrogen peroxide, a decrease in catalase activity, and an increase in the transcription of genes encoding PR proteins: chitinase (PR-3), thaumatin-like protein (PR-5), RNase (PR-10), and methyltransferase (MT). It was shown that treatment with Ch-Ag 2 reduced the degree of damage to the leaves of *P. infestans* and increased the mass of potato mini-tubers. The data obtained indicate that chitosan-silver nanocomposites are promising biological products for increasing the stability and productivity of potatoes.

Keywords: *Solanum tuberosum*, *Phytophthora infestans*, chitosan, silver nanoparticles, pro-/antioxidant system, PR proteins, productivity

Funding. The work was carried out with the financial support of the RSCF grant No. 23-16-00139.

Conflict of interests. Authors declare no conflict of interests.

Authors contribution. All the authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article.

For Citation: Yarullina L.G., Cherepanova E.A., Burkhanova G.F., Zaikina E.A., Tsvetkov V.O., A.V. Sorokan, Mardanshin I.S., Fatkullin I.Y., Pustovaya A.D., Kalatskaja J.N., Hileuskaya K.S. The effect of chitosan-Ag nanocomposites on the development of protective mechanisms in potato plants and resistance to *Phytophthora infestans*. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology*. 2026;62(2):230–246. (In Russ.) <https://doi.org/10.7868/S3034574X26020082>

ВВЕДЕНИЕ

Картофель является одной из основных продовольственных культур в мире [45]. В естественных условиях растения подвергаются воздействию патогенов и различных абиотических стрессов, которые оказывают негативное воздействие на урожайность и качество продукции [47].

Разрабатываемые в настоящее время экологически безопасные способы борьбы с патогенами с использованием биопестицидов рассматриваются как перспективная возможность полной или частичной замены химических средств защиты [40]. Растущий потенциал нанотехнологий обеспечивает внедрение наноматериалов практически во все отрасли производства, в том числе в агропромышленный сектор. Одним из экологически безопасных подходов к повышению устойчивости растений к биотическим и абиотическим стрессовым факторам является использование соединений на основе хитозана, поскольку они признаны эффективными индукторами устойчивости растений. Введение в структуру производных хитозана новых функциональных групп, в том числе наночастиц металлов, позволяет создавать биосовместимые соединения с улучшенными свойствами [22].

Препараты хитозана обладают ценными свойствами, такими как биосовместимость и низкая токсичность, которые определяют их широкое использование в растениеводстве [14]. Кроме того, наличие свободных реакционноспособных аминогрупп в полимерной цепи хитозана обеспечивает возможность получения наночастиц за счет восстановления ионов металлов [31].

С развитием нанотехнологий биогенные металлы стали широко использоваться в сельском хозяйстве. Среди наночастиц металлов наиболее часто используют наночастицы серебра (НЧ Ag). НЧ Ag могут быть использованы в качестве стимуляторов роста растений [41], защитных средств для профилактики вирусных [18], бактериальных [32] и грибковых заболеваний [21].

НЧ серебра менее токсичны, чем ионы Ag^+ , однако эффект НЧ определяется не только их составом, но также размером входящих в него частиц и их концентрацией [46]. Использование НЧ Ag часто ограничивается их низкой стабильностью. Полисахариды являются одними из лучших биологически активных веществ для синтеза комплексов с НЧ Ag. При этом получают стабилизированные хитозаном НЧ Ag, способные проявлять свойства, присущие каждому из компонентов, а также синергетически усиливать их [8, 22]. Необходимо отметить, что использование капсул из хитозана способствует снижению цитотоксичности непокрытых НЧ Ag [8].

Несмотря на обширные исследования, проблема биологического воздействия НЧ Ag на расти-

тельные объекты недостаточно изучена. Сведения о характере влияния НЧ Ag, покрытых полимерной оболочкой, на защитный потенциал растений часто противоречивы [33, 48].

Цель работы — изучение потенциала наноконкомпозитов хитозан-Ag для повышения устойчивости растений картофеля к *Phytophthora infestans* и его продуктивности.

МЕТОДИКА

Объекты исследования

В опытах использовали растения картофеля *Solanum tuberosum* L., выращенные из мини-клубней сорта Удача на Чишминской опытной станции Башкирского НИИ сельского хозяйства (Уфа, Россия). Клубни высаживали в емкости с грунтом (TerraVita, pH 6,0–6,5) на глубину 3–4 см. Растения выращивали со световым периодом 16 ч, интенсивностью освещения 14000 люкс, при температуре 20–22 °С в климатической камере Спектр-15КР (Башкирский государственный аграрный университет, Россия).

Обработка растений

Через 45 сут после посадки клубней в почву растения обрабатывали наноконкомпозитами (НК) хитозан-Ag в различном разведении. В контроле опрыскивали 5 мл дистиллированной воды на одно растение. Для обработки растений использовали НК Хит-Ag 1 и Хит-Ag 2, разведенные в 50 раз (Хит-Ag 1/50, Хит-Ag 2/50) и в 100 раз (Хит-Ag 1/100, Хит-Ag 2/100). НК Хит-Ag 2 отличались от НК Хит-Ag 1 большим (в 10 раз) содержанием серебра.

Изучение устойчивости к *P. infestans* на изолированных листьях

Исследование устойчивости к фитофторозу растений, обработанных НК, было проведено через 7 сут после обработки конкомпозитами. Листья картофеля с трех верхних ярусов срезали с растений и размещали в пластиковых кюветах, где создавались условия влажной камеры. На дно кюветы укладывали фильтровальную бумагу, места срезов помещали под ватные тампоны, пропитанные 40 мг/л раствора бензимидазола. Листья выдерживали 24 ч при 23 °С в темноте для снятия раневого стресса, затем инфицировали суспензией зооспор *P. infestans* изолята 1840 из коллекции Всероссийского научно-исследовательского института защиты растений (10^5 спор/мл) по 10 мкл на лист.

Для получения зооспор возбудителя болезни выделяли из инфицированных мини-клубней картофеля. Изолят выращивали на картофельно-декстрозном агаре в течение 7 сут для восстановления агрессивности патогена. Суспензию спор получали путем смыва с поверхности коло-

ний, выращенных на картофельно-декстрозном агаре. Поверхность колоний *P. infestans* заливали дистиллированной водой и инкубировали при температуре 4 °С в течение 30 мин. Концентрацию спор оценивали с помощью камеры Фукса-Розенталя, препарат разводили до титра 1×10^3 спор/мл. В качестве контроля использовали растения, обработанные водой и не инфицированные фитотфоруей.

Развитие болезни оценивали по процентному отношению площади поражения к общей площади листовой пластинки на 5 сут после заражения растений *P. infestans*. Листья фотографировали, полученные изображения анализировали с помощью компьютерной программы ImageJ (НИН, США).

Получение НК хитозана с серебром

Коллоидные растворы НК Хит-Аг были получены в Институте химии новых материалов НАН Беларуси путем химического восстановления нитрата серебра хитозаном с молекулярной массой 30 кДа и степенью дезацетилирования 98,3 % в гидротермальных условиях [25]. 100 мл раствора хитозана (34,0 мг/мл) в 2%-ной уксусной кислоте тщательно перемешивали с 10 мл водного раствора AgNO_3 (0,34 или 34,0 мг/мл) в течение 15 мин. Затем реакционную смесь подвергали гидротермальной обработке в течение 1 ч (121 °С, 1,5 бар). Полученные НК фильтровали под вакуумом, нормализовали концентрацию хитозана (34,0 мг/мл) и хранили в темноте при комнатной температуре. Расчетная концентрация Ag^0 (с учетом полного восстановления ионов серебра хитозаном) составила 0,196 мг/мл и 1,96 мг/мл для образцов Хит-Аг 1 и Хит-Аг 2 соответственно. Ранее [25] было показано, что образцы Хит-Аг 1 и Хит-Аг 2 имеют принципиально разные пространственные структуры. НК Хит-Аг 1 представляют собой нано- и субмикронные структуры с несколькими ядрами и оболочками, в которых монодисперсные наночастицы Ag^0 (10 ± 4 нм) объединены в единую общую хитозановую матрицу нано- и субмикронного (до 200 нм) размера. В то же время НК Хит-Аг 2 имел структуру ядро-оболочка: отдельные наночастицы Ag^0 (25 ± 8 нм) покрыты слоем хитозана (20–25 нм).

Определение биохимических показателей проводили в листьях через 72 ч после инокуляции растений зооспорами.

Определение содержания белка

Содержание белка в образцах определяли по методу Брэдфорда, используя бычий сывороточный альбумин в качестве стандарта [30]. Оптическую плотность растворов измеряли при 595 нм.

Определение содержания пролина

Экстракцию и определение свободного пролина проводили согласно методу Бэйтса с соавт. с использованием нингидринового реактива [11].

Определение содержания H_2O_2

Листья (200 мг) гомогенизировали в 600 мкл 25 мМ натрий-фосфатного буфера (ФБ) pH 6,2. Гомогенаты центрифугировали в течение 10 мин при 13000 g на центрифуге 5415R (Eppendorf, Германия). Содержание H_2O_2 в растениях измеряли с помощью с ксиленолового оранжевого [29], оптическую плотность комплекса продукта железа с ксиленоловым оранжевым определяли спектрофотометрически при 560 нм. Концентрацию H_2O_2 определяли с помощью калибровочной кривой.

Определение активности каталазы (КАТ)

Для определения активности каталазы (КФ 1.11.1.6) использовали метод [23]. Активность каталазы рассчитывали по формуле: $U = (A_k - A_o) * K / (V * T)$, где A_k и A_o — абсорбция контрольных (содержащих воду вместо образца) и опытных образцов, соответственно, V — объем пробы, 0,1 мл, T — время инкубации, 600 с, K — коэффициент миллимолярного поглощения H_2O_2 , равный $22,2 * 10^3 \text{ mM}^{-1}\text{cm}^{-1}$. Активность КАТ выражали в ед. на 1 мг белка.

Определение активности пероксидазы (ПО)

Для определения активности пероксидазы (КФ 1.11.1.7) использовали метод [20]. Активность определяли путем окисления 20 мМ субстрата ортофенилендиамина 10 мМ H_2O_2 , развитие окраски прекращали 4 н. H_2SO_4 . Оптическую плотность раствора измеряли при 490 нм на приборе Perkin Elmer LS 55 (США). Единица активности фермента соответствовала изменению оптической плотности раствора за 1 мин. Активность ПО выражали в ед. на 1 мг белка.

Определение активность РНКаз

Активность РНКаз определяли по методу Анфинсена с соавт. с модификациями [7]. Навеску 0,3 г растительного материала гомогенизировали в ледяном 0,05 М трис-НСI-буфере, pH 8,5, в соотношении 1:5 в охлажденных ступках на льду. Фермент экстрагировали 15 мин при 4 °С, затем гомогенат центрифугировали в течение 10 мин при 12000 g. К 2 мл раствора, содержащего 50 мкг/мл дрожжевой РНК Torula Yeast (Sigma, США) в 0,05 М трис-НСI буфере, pH 8,5, добавляли 20 мкл супернатанта. Пробы выдерживали в термостате при 37 °С. Через 5 мин и 65 мин измеряли оптическую плотность в реакционном растворе на спектрофотометре при 260 нм относительно контроля (реакционная смесь без растительного экстракта).

Для определения скорости ферментативной дегградации РНК за единицу нуклеазной активности (Е) принимали количество фермента, вызывающего увеличение адсорбции на оптическую единицу за 1 ч в пересчете на 1 мг белка. Концентрацию белка измеряли по методу Брэдфорда.

Определение транскрипционной активности генов PR-белков

Для выделения РНК использовали листья каждого растения, замороженные в жидком азоте через 72 ч после инокуляции *P. infestans*. Тотальную РНК из растений выделяли с помощью реактива Лира® по протоколу производителя («Биолабмикс», Россия). Навеску листьев гомогенизировали в жидком азоте. Для получения кДНК на основе мРНК исследуемых образцов проводили реакцию обратной транскрипции с использованием обратной транскриптазы M-MuLV («Сибэнзим», Россия) согласно протоколу поставщика. Анализ накопления транскриптов генов PR-белков проводили с помощью количественной ПЦР в реальном времени на приборе CFX Connect Real-Time System (Bio-Rad, США).

Концентрацию РНК измеряли с помощью спектрофотометра. Концентрации РНК в образцах

выравнивали путем разбавления до одинакового уровня. Первую цепь кДНК синтезировали с использованием олигонуклеотидных праймеров (табл. 1) и обратной транскриптазы M-MuLV (Thermo Scientific, Испания). Эффективность праймеров была оценена с помощью серии 10-кратных разведений кДНК. Полученную кДНК разводили в 5 раз и использовали для количественной ПЦР (кПЦР). Количественную ПЦР проводили методом полимеразной цепной реакции в реальном времени с использованием набора реагентов SYBR Green I («Синтол», Россия) и прибора CFX Connect Real-Time PCR Detection System (Bio-Rad, США). Экспрессия генов растений картофеля была представлена как кратное изменение, нормализованное по отношению к референсному гену StAct (картофельный актин). Для анализа данных использовалось программное обеспечение iCycler iQ5 Real-Time Detection System 181 (BioRad, США).

Таблица 1. Праймеры, использованные в ПЦР-анализе для исследования экспрессии генов

Table 1. Primers used for PCR analysis of gene expression

Продукт	Ген	GenBank, номер	Последовательность (5'-3')	
			прямой праймер	обратный праймер
Актин	StAct	X55749	gat-ggt-gtc-agc-cac-ac	att-cca-gca-gct-tcc-att-cc
Хитиназа, PR3	StPR3	U49970	ttc-tgg-atg-aca-gca-cag-gat	ggc-gtc-cat-tgc-cca-at
Тауматин-подобный белок, PR5	StPR5	AY737317	ccc-gtt-tga-cat-tga-cct-ttg	cga-ata-cgg-tgg-aac-atg-ga
Ингибитор протеиназы, PR6	StPR6	JX683427	ggg-aaa-gaa-tat-gct-caa-gtt-at	aat-tct-cca-tca-tct-tcc-act-g
Пероксидаза, PR9	StPR9	M21334	gta-atc-ctg-ccg-cac-aac-t	gca-gca-aaa-tct-cca-agg-aa
Рибонуклеаза, PR10	StPR10	AF500589	ctc-gct-aac-cct-tct-gtc-tat-g	caa-cac-gtc-ctg-ctc-tct-c
Метилтрансфераза	StMT	XM_006356514	ggc-aat-gga-cat-taa-ccg	tca-aga-aga-ggc-aaa-gca-g
Пролин-карбоксилат синтаза	StPCS	XM015308529	tta-aag-agg-acg-gag-ctt-gc	cag-tgc-atc-agg-tcg-tga-ct

Статистическая обработка

Опыты проводили в пятикратной биологической повторности. Биохимические параметры измеряли не менее трех раз, уровень экспрессии генов — не менее 10 раз. На гистограммах показаны выборочные средние, в качестве показателя погрешности показан 95%-ный доверительный интервал.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние нанокмозитов хитозан–Ag на устойчивость картофеля к *P. infestans*

Через 5 сут после инфицирования симптомы фитофтороза на контрольных растениях развились на 95–100% площади листовой пластинки. После обработки НК Хит-Ag 2 в разведении 1/50 —

болезнь проявлялась на чуть более 40 % площади листьев (рис. 1). Действие Хит-Ag 1 в разведении 100 раз приводило к снижению симптомов фитофтороза, признаки поражения наблюдались на 60–65 % площади листа. Другие варианты применения препаратов не были эффективны.

Влияние нанокмозитов на содержание пролина и активность РНК-аз

Под влиянием обработки НК Хит-Ag 2/50 повышалось содержание пролина в здоровых, но особенно в инфицированных листьях картофеля (рис. 2а). Стимулирующее действие на накопление пролина НК Хит-Ag 1/100 проявлялось только на здоровых растениях. Уровень пролина в листьях коррелировал с транскрипционной активностью гена пролин-карбоксилатсинтазы (рис. 2б).

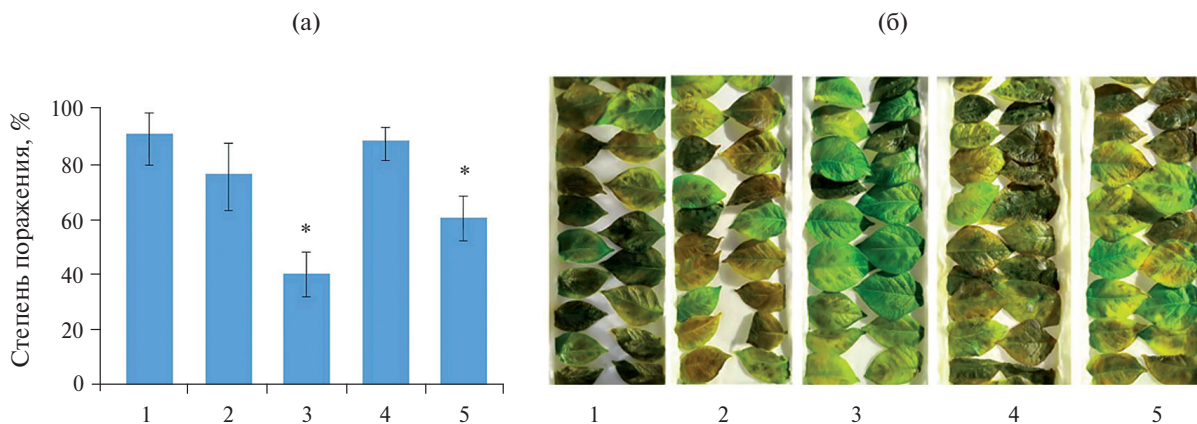


Рис. 1. Влияние обработки НК Хит-Аг на степень поражения (а) и внешний вид пораженных листьев (б) картофеля сорта Удача через 5 сут после инфицирования *P. infestans*: 1 — контроль, 2 — Хит-Аг 1/50, 3 — Хит-Аг 2/50, 4 — Хит-Аг 1/100, 5 — Хит-Аг 2/100. * - отмечены значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 1. The effect of treatment with ChAg NC on the degree of damage (a) and the appearance of the affected leaves (b) of Udacha potatoes, 5 days after infection with *P. infestans*: 1 — control, 2 — ChAg 1/50, 3 — ChAg 2/50, 4 — ChAg 1/100, 5 — ChAg 2/100. * - values significantly different from the control were noted ($p < 0.05$)

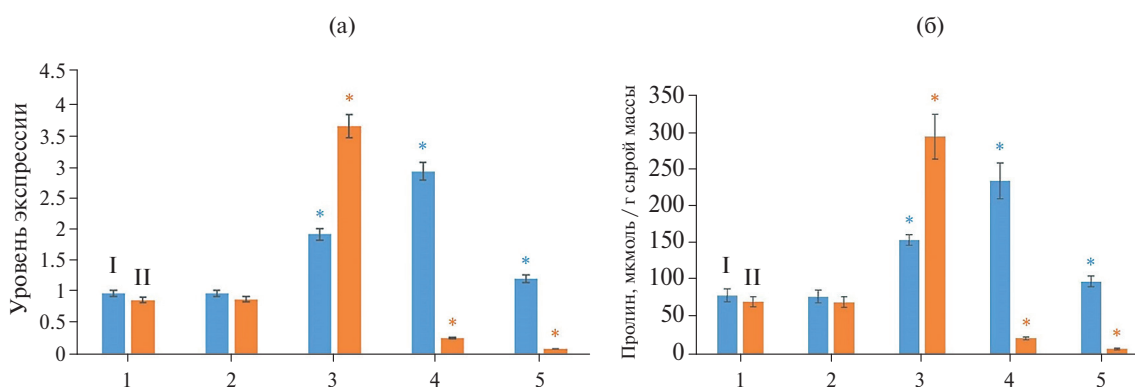


Рис. 2. Влияние нанокмпозитов Хит-Аг на содержание пролина и транскрипционную активность гена StPCS в листьях растений картофеля сорта Удача через 72 ч после инфицирования *P. infestans*: 1 — контроль, 2 — Хит-Аг 1/50, 3 — Хит-Аг 2/50, 4 — Хит-Аг 1/100, 5 — Хит-Аг 2/100. I — здоровые растения, II — зараженные *P. infestans*. * — отмечены значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 2. The effect of ChAg nanocomposites on the proline content and transcriptional activity of the StPCS gene in the leaves of potato plants of the Udacha variety 72 hours after infection with *P. infestans*: 1 — control, 2 — ChAg 1/50, 3 — ChAg 2/50, 4 — ChAg 1/100, 5 — ChAg 2/100. I — healthy plants, II — infected with *P. infestans*. * — values significantly different from the control were noted ($p < 0.05$)

Обработка НК Хит-Аг 2/50 здоровых растений картофеля приводила к повышению рибонуклеазной активности в 1,5 раза (рис. 3). При обработке нанокмпозитом Хит-Аг 1/100 активность РНК-азы снижалась относительно контроля в 3 раза. В остальных вариантах обработки здоровых растений достоверных различий с контролем не выявлено.

У инфицированных растений применение НК Хит-Аг 2/50 способствовало увеличению активности РНК-азы на 50% по сравнению с контролем. После обработки Хит-Аг 1/50 активность рибонуклеаз была на уровне инфицированного контрольного варианта. Однако оба НК в 100-кратном разведении подавляли активность РНК-азы в среднем на 30%.

Влияние НК хитозан-Аг на про-/антиоксидантную систему растений картофеля

Обработка НК Хит-Аг приводила к повышению содержания пероксида водорода в растительных тканях во всех вариантах опыта: под воздействием Хит-Аг 1/50 и Хит-Аг 1/100 — в 2 раза; Хит-Аг 2/50 — в 3 раза; Хит-Аг 2/100 — в 1,5 раза по сравнению с контролем.

Во всех вариантах обработки у растений картофеля наблюдалось снижение активности каталазы в несколько раз по сравнению с контролем (рис. 4в).

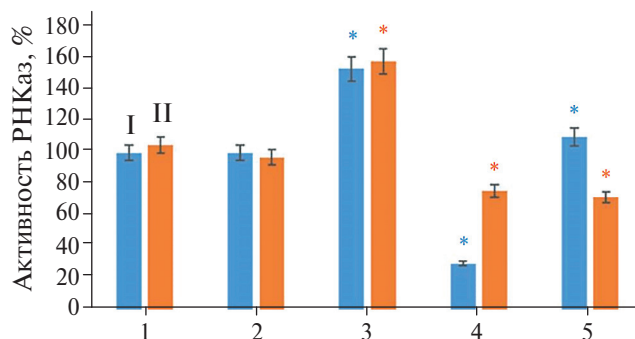


Рис. 3. Влияние НК Хит-Аг на активность РНК-азы в здоровых (I) и инфицированных *P. infestans* (II) растениях картофеля сорта Удача через 72 ч после заражения: 1 — контроль, 2 — Хит-Аг 1/50, 3 — Хит-Аг 2/50, 4 — Хит-Аг 1/100, 5 — Хит-Аг 2/100. * - отмечены значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 3. Effect of ChAg NC on RNase activity in healthy (I) and infected with *P. infestans* (II) Udacha potato plants 72 hours after infection: 1 — control, 2 — ChAg 1/50, 3—ChAg 2/50, 4—ChAg 1/100, 5 — ChAg 2/100. * - values significantly different from the control were noted ($p < 0.05$)

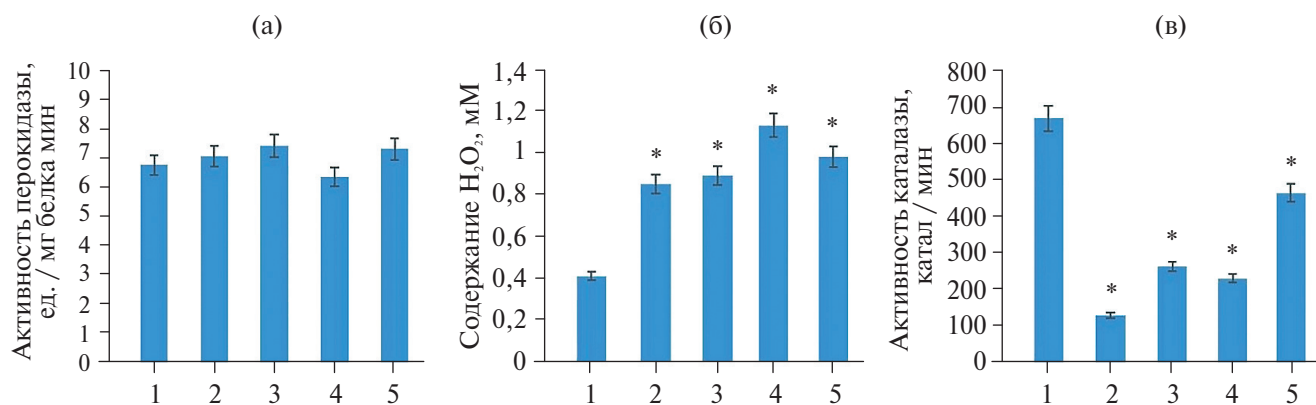


Рис. 4. Влияние НК Хит-Аг на активность пероксидазы (а), содержание H_2O_2 (б) и активность каталазы (в) в растениях картофеля сорта Удача через 72 ч после заражения: 1 — контроль, 2 — Хит-Аг 1/50, 3 — Хит-Аг 2/50, 4 — Хит-Аг 1/100, 5 — Хит-Аг 2/100. * - отмечены значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p < 0.05$)

Fig. 4. The effect of ChAg NC on peroxidase activity (a), H_2O_2 content (b), and catalase activity (c) in Udacha potato plants 72 hours after infection: 1 — control, 2 — ChAg 1/50, 3 — ChAg 2/50, 4 — ChAg 1/100, 5 — ChAg 2/100. * - values significantly different from the control were noted ($p < 0.05$)

Влияние НК на транскрипционную активность генов PR-белков в растениях картофеля при заражении *P. infestans*

В работе было изучено влияние НК Хит-Аг на уровень транскрипционной активности генов *StPR3*, *StPR5*, *StPR6*, *StPR9*, *StPR10*, *StMT*, *StPCS*, кодирующих белки: PR-3 (хитиназа), PR-5 (тауматин-подобный), PR-6 (ингибитор протеиназ), PR-9 (пероксидаза), PR-10 (рибонуклеаза), метилтрансферазу и пролин-карбоксилат-синтазу в здоровых и инфицированных растениях картофеля (табл. 1).

Исследования показали, что у здоровых растений под влиянием НК Хит-Аг 2/50 снижалась транскрипционная активность гена *StPR9*. Напротив, обработка тем же НК Хит-Аг 2/50 инфицированных растений значительно стимулировала транскрипционную активность генов *StPR3*, *StPR5*, *StPR10* и *StMT* (рис. 5), что коррелировало с устойчивостью к *P. infestans* (рис. 1).

В других вариантах опыта обработка НК приводила к снижению транскрипционной активности генов *StPR3*, *StPR6*, *StPR9* и *StPR10* в здоровых и инфицированных растениях (рис. 5).

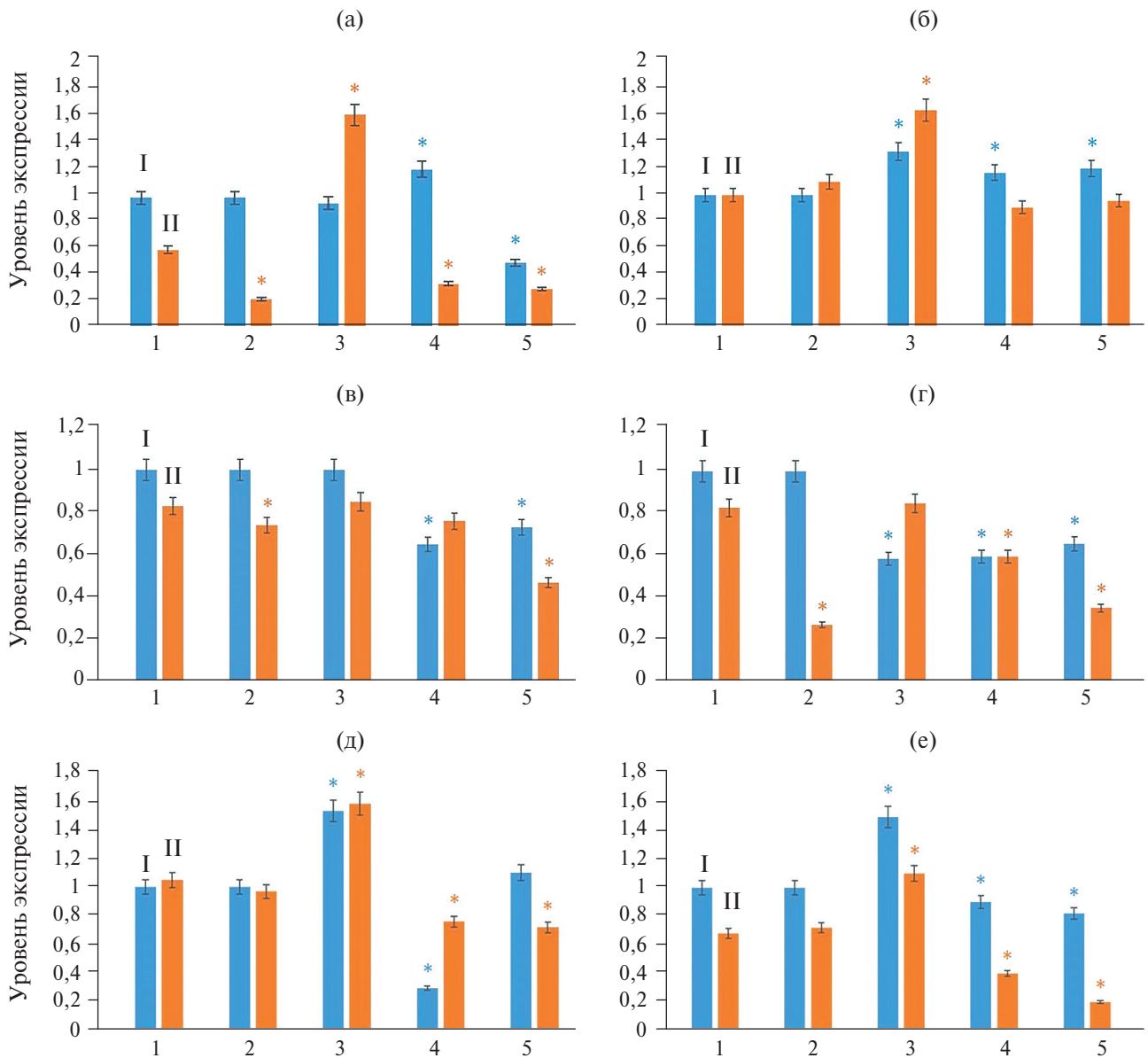


Рис. 5. Влияние НК Хит-Аг в разведении 50 и 100 раз на транскрипционную активность генов StPR-3 (а), StPR-5 (б), StPR-6 (в), StPR-9 (г), StPR-10 (д), StMT (е) в листьях растений картофеля через 72 ч после инфицирования *P. infestans*. 1 — контроль, 2 — Хит-Аг 1/50, 3 — Хит-Аг 2/50, 4 — Хит-Аг 1/100, 5 — Хит-Аг 2/100. I — здоровые растения, II — зараженные *P. infestans*. * — отмечены значения, достоверно отличающиеся от контроля ($p < 0,05$)

Fig. 5. The effect of ChAg NC in dilution of 50 and 100 times on the transcriptional activity of StPR-3 (a), StPR-5 (b), StPR-6 (c), StPR-9 (d), StPR-10 (e), StMT (f) in leaves of potato plants 72 hours after infection with *P. infestans*. 1 — control, 2 — ChAg 1/50, 3 — ChAg 2/50, 4 — ChAg 1/100, 5 — ChAg 2/100. I — healthy plants, II — infected with *P. infestans*. * — values significantly different from the control were noted ($p < 0.05$)

Оценка продуктивности растений и качества клубней

Лучшие показатели по продуктивности и качеству продукции были получены после обработки Хит-Аг 1/100. При этом достоверно увеличивалась масса клубней, доля сухого вещества, крахмала и белка. Достоверное повышение содержания сухого вещества, крахмала и белка отмечено и после об-

работки картофеля Хит-Аг 1/50. После обработки Хит-Аг 2/50 достоверно увеличилась продуктивность растений, при этом значительно (на 62,8 %) увеличивалось количество клубней (табл. 2), масса клубней — на 10,3 %, доля сухого вещества — на 3,4 %, крахмала — на 4,0 %. Однако после обработки Хит-Аг 2/50 и Хит-Аг 2/100 количество белка в клубнях снижалось.

Таблица 2. Влияние обработки НК Хит-Аг на массу, количество мини-клубней и пищевую ценность картофеля
Table 2. Effect of ChAg NC treatment for weight and number of mini-tubers and food quality of potato

Вариант	Количество мини-клубней	Продуктивность (масса клубней), г	Сухое вещество, %	Крахмал, %	Содержание белка, %
Контроль	4,3 ± 0,3	24,03 ± 0,41	22,15 ± 0,22	16,3 ± 0,19	1,50 ± 0,03
Хит-Аг 1/50	4,0 ± 0,3	23,04 ± 0,36	23,9 ± 0,25 *	17,7 ± 0,28 *	1,56 ± 0,03 *
Хит-Аг 1/100	4,6 ± 0,4	26,80 ± 0,58 *	24,4 ± 0,26 *	18,1 ± 0,29 *	1,54 ± 0,03 *
Хит-Аг 2/50	7,0 ± 0,9 *	26,46 ± 0,53 *	22,9 ± 0,21	16,9 ± 0,21	1,30 ± 0,03
Хит-Аг 2/100	4,6 ± 0,5	24,46 ± 0,55	22,75 ± 0,24	16,8 ± 0,20	1,30 ± 0,03

* — достоверное отличие от контроля ($p < 0,05$)

* — significant difference from control ($p < 0.05$)

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В последние годы для борьбы с возбудителями болезней растений все чаще используют наночастицы металлов [17]. Наиболее эффективный биоцидный эффект характерен для наночастиц серебра, он проявляется в отношении таких патогенов, как *Phytophthora parasitica*, *Fusarium spp.* и нематод рода *Meloidogyne spp.* [9].

Как показали исследования, повышение устойчивости листьев картофеля к фитофторозу при обработке нанокомпозитами хитозана с серебром неодинаково при применении разных форм композитов. Наиболее эффективным оказался НК Хит-Аг 2/50 и Хит-Аг 1/100, заметно уступающий первому (рис. 1).

Известно, что морфология частиц оказывает значительное влияние на высвобождение ионов Ag^+ и биологическую активность композитов [37]. Использование полимерных матриц, таких как хитозан, для модификации наночастиц серебра защищает металлическое серебро от окислительного разложения и предотвращает взрывообразное высвобождение катионов серебра. Матрица из полисахарида хитозана играет ключевую роль в процессах растворения наночастиц серебра в результате окислительно-восстановительных реакций [25]. Хитозановая оболочка, благодаря своему защитному эффекту, обеспечивает повышенную стабильность при хранении [27], контролируемое длительное высвобождение ионов серебра благодаря их взаимодействию с гидроксильными и амидными группами полимера [36] и сниженной

токсичностью [25]. Таким образом, синтезированные полимер-неорганические гибридные нанокомпозиты хитозан-серебро могут обеспечивать благоприятное воздействие на защитный потенциал растений.

Накопление пролина — важный показатель состояния растений при воздействии патогенов. Выявленное в настоящем исследовании увеличение содержания пролина в листьях инфицированных растений картофеля (рис. 2), вероятно, связано как с элиситорной природой хитозана, так и с действием ионов серебра. Защитное действие пролина обусловлено его участием в стабилизации мембран, структуры белковых молекул и снижении уровня АФК. Кроме того, пролин задействован в регуляции многих клеточных процессов, является одним из индикаторов активации системной защиты растений, выполняя сигнальную функцию при взаимодействии растений с патогенами [19].

Ранее было показано, что применение препаратов хитозана активировало рибонуклеазную активность в тканях растений [1]. Наночастицы серебра проявляли индуцирующую активность в отношении РНК-аз при заражении вирусом желтой мозаики фасоли [35].

Выявлено стимулирующее действие на активность РНКазы композита Хит-Аг 2/50 в здоровых и инфицированных растениях картофеля (рис. 3).

Наиболее изучена роль РНКаз в подавлении развития вирусных болезней, вызываемых РНК-содержащими вирусами. Защитный механизм связывают с тем, что при вирусной инфекции

экстраклеточные РНКазы могут повреждать геномную РНК вирусов на тех стадиях инфекционного процесса, когда она уязвима. Во время инокуляции при поранении тканей РНКазы из апопласта могут проникать в поврежденные клетки и разрушать пул клеточных мРНК, что не даст вирусу возможности размножиться [5].

Показано, что РНКазы могут функционировать в качестве фунгицидов, причем эта их способность, связанная с нуклеазной активностью, может проявляться как при прямом воздействии на патоген при проникновении внутрь клетки и разрушении клеточных РНК [15], так и за счет участия только в реакции сверхчувствительности [28].

Известно, что определяющим фактором формирования и последующего развития защитных реакций у растительного организма является генерация АФК. Важно было выяснить влияние НК хитозан-серебро на состояние про-/антиоксидантной системы растений. Известно, что хитин, хитозан и их олигомеры являются активными элиситорами иммунитета растений, в том числе, за счет регуляции редокс-статуса растительных клеток [14]. Показано также, что наночастицы серебра стимулируют выработку АФК [3].

ПО (белки семейства PR-9) включается как в генерацию, так и утилизацию H_2O_2 , а активация фермента происходит при любом стрессовом ответе растения [16]. При анализе активности пероксидазы было продемонстрировано (рис. 4), что при обработке растений НК не наблюдалось достоверной активации ПО во всех вариантах опыта, что свидетельствовало об отсутствии стрессового воздействия исследуемых НК на растения картофеля.

Известно, что токсическое действие НЧ Ag на растения может приводить к снижению общей массы растений, подавлению роста корней, уменьшению размеров побегов, прерыванию репликации ДНК и влиянию на экспрессию генов [13]. Наиболее распространенными причинами индуцированной НЧ Ag токсичности являются окислительный стресс, повреждение ДНК и апоптоз [38]. Токсичность НЧ Ag зависит от размера, формы, наличия и природы стабилизирующей оболочки [26]. Показано, что наночастицы серебра могут растворяться и выделять Ag^+ во внеклеточную среду, что и определяет в основном их токсичность [43].

Обработка Хит-Ag приводила к повышению содержания пероксида водорода в растительных тканях во всех вариантах опыта: под воздействием Хит-Ag 1/50 и Хит-Ag 1/100 — в 2 раза; Хит-Ag 2/50 — в 3 раза; Хит-Ag 2/100 — в 1,5 раза по сравнению с контролем. Ранее было показано, что механизмы повышения устойчивости картофеля к возбудителю фитофтороза связаны с накоплением H_2O_2 в растительных тканях [42].

Изменение концентрации H_2O_2 в тканях растений может происходить в результате многих метаболических процессов, но в большей степени это происходит в результате изменения активности антиоксидантных ферментов [10]. Основным ферментом антиоксидантной системы растений, участвующим в утилизации H_2O_2 , является каталаза.

Активность каталазы может существенно варьировать при участии сигнальных молекул. H_2O_2 является не только сигнальной молекулой, но и субстратом каталазы. При этом ее влияние на активность каталазы у растений неоднозначно. Так, в проростках пшеницы H_2O_2 может ингибировать [34] или стимулировать [12] активность каталазы в зависимости от ее концентрации. Снижение активности каталазы под влиянием обработок НК Хит-Ag, вероятно, является одним из механизмов усиления продукции АФК [39] и опосредованной индукции экспрессии генов PR-белков [44].

Обработка НК Хит-Ag 2/50 инфицированных растений значительно стимулировала транскрипционную активность генов *StPR3*, *StPR5*, *StPR10* и *StMT* (рис. 5), что коррелировало с устойчивостью к *P. infestans* (рис. 1).

В ответ на заражение вирусами, грибами и бактериями в межклеточной жидкости растительных тканей происходит накопление, в основном, хитиназ третьего типа (PR-3). Среди внеклеточных гидролаз, способных лизировать клеточную стенку и гифы грибов, наибольший интерес представляют именно хитиназы [4]. В большинстве случаев хитиназы являются индуцибельными ферментами, образующимися в присутствии специфического субстрата. В работе композит Хит-Ag2 способствовал усилению транскрипционной активности гена хитиназы. Показано, что в устойчивых к *Pectobacterium carotovorum* сортах картофеля экспрессия гена PR-3 значительно выше, чем в восприимчивых растениях [6].

Основной защитный механизм белка PR-5 связан с увеличением проницаемости мембран патогенов [24]. Белки семейства PR-10 могут функционировать в качестве фунгицидов, причем эта их способность, связанная с нуклеазной активностью, может проявляться как при прямом воздействии на патоген при проникновении внутрь клетки и разрушении клеточных РНК, так и за счет участия в реакции сверхчувствительности [28].

Повышение активности метилтрансфераз, участвующих в поддержании и регуляции метилирования ДНК растений, позволяет предположить участие композитов Хит-Ag в регуляции устойчивости растений на эпигенетическом уровне.

Можно предположить, что индукция устойчивости растений картофеля к возбудителю фитофтороза под влиянием Хит-Ag 2 опосредована регуляцией окислительно-восстановительных процессов

в растении и накоплением пероксида водорода, включающим экспрессию генов PR-белков.

Установлено, что применение НК Хит-Аг 2 достоверно снижало зараженность растений картофеля *P. infestans*, что способствовало увеличению количества и массы мини-клубней картофеля. Поддержание продукции пероксида водорода, снижение активности каталазы, увеличение уровня транскриптов генов белков PR-3, PR-5, PR-9, PR-10, PCS и метилтрансферазы под действием Хит-Аг 2 может быть решающим фактором повышения устойчивости растений картофеля к *P. infestans*. НК Хит-Аг 1 по степени повышения устойчивости растений картофеля к *P. infestans* уступал НК Хит-Аг 2, однако обработанные им растения отличались максимальным содержанием сухого вещества, крахма-

ла и белка. Вероятно, под влиянием НК Хит-Аг может проявляться дополнительный стимулирующий эффект на ростовые процессы растений картофеля. Показано, что наночастицы серебра увеличивали максимальную эффективность фотосистемы II у растений горчицы и содержание хлорофиллов в листьях [2]. Полученные данные свидетельствуют о том, что композиты хитозан-серебро в определенных комбинациях являются перспективными биопрепаратами для повышения устойчивости, продуктивности и качества картофеля.

Работа проводилась с использованием оборудования ЦКП «Биомика» (Отделение биохимических методов исследований и нанобиотехнологии РЦКП «Агидель») и УНУ «КОДИНК».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурханова Г.Ф., Сорокань А.В., Черепанова Е.А., Сарварова Е.Р., Хайруллин Р.М., Максимов И.В. Эндوفитные бактерии *Vacillus* spp. с РНКазной активностью и устойчивостью картофеля к вирусам // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2019. Т. 23. № 7. С. 873–878. <https://doi.org/10.18699/VJ19.561>
2. Венжик Ю.В., Мошков И.Е., Дыкман Л.А. Влияние наночастиц металлов и их оксидов на фотосинтетический аппарат растений // Известия РАН. Серия биологическая. 2021. № 2. С. 137–152.
3. Газарян И.Г., Хишупульян Д.М., Тишков В.И. Особенности структуры и механизма действия пероксидаз растений // Успехи биологической химии. 2006. Т. 46. С. 303–322.
4. Журавлева Н.В., Лукьянов П.А. Хитинолитические ферменты: источники, характеристика и применение в биотехнологии // Вестник ДВО РАН. 2004. Т. 3. С. 76–86.
5. Сангаев С.С., Кочетов А.В., Ибрагимова С.С., Левенко Б.А., Шумный В.К. Роль экстраклеточных рибонуклеаз в физиологических процессах высших растений // Вестник ВОГиС. 2010. Т. 14. № 2. С. 232–242.
6. Третьякова О.М., Евтушенков А.И. Экспрессия PR-генов картофеля при бактериальной инфекции // Труды БГУ. 2011. Т. 6. № 1. С. 163–167.
7. Хайруллин Р.М., Гарифуллина Д.В., Веселова С.В., Черепанова Е.А., Максимов И.В. Пораженность картофеля вирусами в Республике Башкортостан и активность рибонуклеаз // Вестник защиты растений. 2021. № 104(4). С. 196–201.
8. Asghar M.A., Yousuf R.I., Shoaib M.H., Asghar M.A. Antibacterial, anticoagulant and cytotoxic evaluation of biocompatible nanocomposite of chitosan loaded green synthesized bioinspired silver nanoparticles // Int. J. Biol. Macromol. 2020. V. 160. P. 934. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.197>
9. Aslani F., Bagheri S., Julkapli N.M., Juraimi A.S., Hashemi Golestan F.S., Baghdadi A. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview // Sci. World J. 2014. V. 2014. P. 28. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>
10. Bakalova S., Nikolova A., Wedera D. Isoenzyme profiles of peroxidase, catalase and superoxide dismutase as affected by dehydration stress and aba during germination of wheat seeds // Bulg. J. Plant Physiol. 2004. V. 30. P. 64–77.
11. Bates L.S., Waldran R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant and Soil. 1973. V. 39. P. 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
12. Bordiec S., Paquis S., Lacroix H., Dhondt S., Barka E., Kauffmann A., et al. Comparative analysis of defence responses induced by the endophytic plant growth-promoting rhizobacterium *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN and the non-host bacterium *Pseudomonas syringae* pv. *psis* in grapevine cell suspensions // J. Exp. Bot. 2011. V. 62. P. 595–603. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq291>
13. Bulut O., Yilmaz M.D. Catalytic evaluation of biocompatible chitosan-stabilized gold nanoparticles on oxidation of morin // ACS Applied Nano Materials. 2022. V. 5. № 10. P. 13761–13767. <https://doi.org/10.1021/acsnm.2c00834>
14. Chakraborty M., Hasanuzzaman M., Rahman M., Khan Md., Bhowmik P., Mahmud N.U., et al. Mechanism of Plant Growth Promotion and Disease Suppression by Chitosan Biopolymer // Agriculture. 2020. V. 10. № 12. P. 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture1012062437>
15. Choi D.S., Hwang I.S., Hwang B.K. The pepper RNA-binding protein CaRBP1 functions in hypersensitive cell death and defense signaling in the cytoplasm // Plant Cell. 2012. V. 24. № 4. P. 1675–1690. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.095869>

16. *dos Santos O.A.L., dos Santos M.S., Filho S.A., Backx B.P.* Nanotechnology for the control of plant pathogens and pests // *Plant Nano Biology*. 2024. V. 8. e10080. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100080>
17. *Dutta P., Kumari A., Mahanta M., et al.* Advances in Nanotechnology as a Potential Alternative for Plant Viral Disease Management // *Front. Microbiol.* 2022. V. 13. e935193. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.935193>
18. *El-Dougdoug Noha K., Bondok A.M., El-Dougdoug K.A.* Evaluation of Silver Nanoparticles as Antiviral Agent Against ToMV and PVY in Tomato Plants // *Middle East Journal of Applied Sciences*. 2018. V. 8. P. 100–111.
19. *Fabro G., Kovács I., Pavel V., Szabados L., Alvarez M.E.* Proline accumulation and AtP5CS2 gene activation are induced by plant-pathogen incompatible interactions in Arabidopsis // *Mol. Plant Microb. Interact.* 2004. V. 17. № 4. P. 343–350.
20. *Fornera S., Walde P.* Spectrophotometric quantification of horseradish peroxidase with o-phenylenediamine // *Analytical Biochemistry*. 2010. V. 407. № 2. P. 293–295. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2010.07.034>
21. *Gowda S., Sriram S.* Current status of nanotechnology application in management of the complex fungal pathogen *Colletotrichum* – a review // *Sydowia*. 2020. V. 72. P. 275–290. <https://doi.org/10.12905/0380.SYDOWIA72-2020-0275>
22. *Gowda S., Sriram S.* Green synthesis of chitosan silver nanocomposites and their antifungal activity against *Colletotrichum truncatum* causing anthracnose in chillies // *Plant Nano Biology*. 2023. V. 5. P. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100041>
23. *Hadwan M.H., Abed H.N.* Clarifying the negative aspects in the Goth method // *Data in Brief*. 2016. V. 6. P. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.12.012>
24. *He M., Xu Y., Cao J.* Protoplasts: a useful research system for plant cell biology, especially dedifferentiation // *Protoplasma*. 2013. V. 250. № 1. P. 1229–1240.
25. *Hileuskaya K., Kraskouski A., Ihnatsyeu-Kachan A., Saichuk A., Pinchuk S., Nikalaichuk V., et al.* New insights into chitosan-Ag nanocomposites synthesis: Physicochemical aspects of formation, structure-bioactivity relationship and mechanism of antioxidant activity // *Int. J. Biol. Macromol.* 2025. V. 300. P. 140077. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140077>
26. *Hou J., Zhou Y., Wang C., Li S., Wang X.* Toxic Effects and Molecular Mechanism of Different Types of Silver Nanoparticles to the Aquatic Crustacean *Daphnia magna* // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51. № 21. P. 12868–12878
27. *Jannoo K., Teerapatsakul C., Punyanut A., Pasanphan W.* Electron beam assisted synthesis of silver nanoparticle in chitosan stabilizer: preparation, stability and inhibition of building fungi studies // *Radia. Phys. Chem.* 2015. V. 112. P. 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.03.035>
28. *Jia X., Rajib M., Yin H.* Recognition pattern, functional mechanism and application of chitin and chitosan oligosaccharides in sustainable agriculture // *Curr. Pharm. Des.* 2020. V. 26. № 29. P. 3508–3521. <https://doi.org/10.2174/1381612826666200617165915>
29. *Jiang Z.Y., Woollard A.C.S., Wolff S.P.* Hydrogen peroxide production during experimental protein glycation // *FEBS Lett.* 1990. V. 268. P. 69–71.
30. *Kruger N.J.* In: *The Protein Protocols Handbook*. Springer Protocols Handbooks. /Ed. J.M. Walker. Totowa, USA: Humana Press, 2009. P. 17–24.
31. *Kulikouskaya V., Hileuskaya K., Kraskouski A., Kozerozhets I., Stepanova E., Kuzminski I., et al.* Chitosan-capped silver nanoparticles: A comprehensive study of polymer molecular weight effect on the reaction kinetic, physicochemical properties, and synergetic antibacterial potential // *SPE Polymers*. 2022. V. 3. № 2. P. 77–90. <https://doi.org/10.1002/pls2.10069>
32. *Kumari M., Pandey P., Bhattacharya A., Mishra A., Nautiyal C.S.* Protective role of biosynthesized silver nanoparticles against early blight disease in *Solanum lycopersicum* // *Plant Physiol. Biochem.* 2017. V. 121. P. 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.11.004>
33. *Lalau C.M., Simioni C., Vicentini D.S., et al.* Toxicological effects of AgNPs on duckweed (*Landoltia punctata*) // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 710. e136318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136318>
34. *Luna C.M., Pastori G.M., Driscoll S., Groten K., Bernard S., Foyer C.H.* Drought controls on H₂O₂ accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat // *J. Exp. Bot.* 2005. V. 56. P. 417–423. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri039>
35. *Manju K., Ranjini H.K., Raj S.N., Nayaka S.C., Lavanya S.N., Chouhan S.K., et al.* Nano-Management Approaches for Salt Tolerance in Plants under Field and In Vitro Conditions // *Plant Nano Biology*. 2023. V. 4. P. 100039. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100039>
36. *Martínez-Cisterna D., Chen L., Bardehle L., Hermosilla E., Tortella G., Chacón-Fuentes M., Rubilar O.* Chitosan-Coated Silver Nanocomposites: Biosynthesis, Mechanical Properties, and Ag⁺ Release in Liquid and Biofilm Forms // *Int. J. Mol. Sci.* 2025. V. 26. P. 4130. <https://doi.org/10.3390/ijms26094130>

37. *Mbanga O., Cukrowska E., Gulumian M.* Dissolution of titanium dioxide nanoparticles in synthetic biological and environmental media to predict their biodurability and persistence // *Toxicology Reports*. 2022. V. 9. P. 788–796.
38. *Noga M., Milan J., Frydrych A., Jurowski K.* Toxicological Aspects, Safety Assessment, and Green Toxicology of Silver Nanoparticles (AgNPs)-Critical Review: State of the Art // *Int. J. Mol. Sci.* 2023. V. 24. P. 5133. <https://doi.org/10.3390/ijms24065133>
39. *Pfannschmidt T., Brautigam K., Wagner R., Dietzel L., Schroter Y., Steiner S., Nykytenko A.* Dynamic Plastid Redox Signals Integrate Gene Expression and Metabolism to Induce Distinct Metabolic States in Photosynthetic Acclimation in Arabidopsis // *Ann. Bot.* 2009. V. 103. P. 599–607. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn081>
40. *Riseh R.S., Hassaniisaadi M., Vatankhah M., Babaki S.A., Barka E.A.* Chitosan as a potential natural com-pound to manage plant diseases // *Int. J. Biol. Macromol.* 2022. V. 220. P. 998–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.109>
41. *Sadak M.S.* Impact of silver nanoparticles on plant growth, some biochemical aspects, and yield of fenugreek plant (*Trigonella foenum-graecum*) // *Bull. Natl. Res. Cent.* 2019. V. 43. № 38. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0077-y>
42. *Smirnov N., Arnaud D.* Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants // *New Phytologist*. 2019. V. 221. № 3. P. 1197–1214. <https://doi.org/10.1111/nph.15488>
43. *Smith J.N., Thomas D.G., Jolley H. et al.* All that is silver is not toxic: silver ion and particle kinetics reveals the role of silver ion aging and dosimetry on the toxicity of silver nanoparticles // *Part Fibre Toxicol.* 2018. V. 15. № 47. <https://doi.org/10.1186/s12989-018-0283-z>
44. *Vasyukova N.I., Ozeretskovskaya O.L.* Jasmonate-dependent defense signaling in plant tissues // *Russian Journal of Plant Physiology*. 2009. V. 56. № 5. P. 581–590. <https://doi.org/10.1134/S102144370905001X>
45. *Vilvert E., Stridh L., Andersson B., Olson Å., Aldén L., Berlin A.* Evidence based disease control methods in potato production // *Environmental Evidence*. 2022. V. 11. № 6. P. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00259-x>
46. *Wang L., Sun J., Lin L.* Silver nanoparticles regulate Arabidopsis root growth by concentration-dependent modification of reactive oxygen species accumulation and cell division // *Ecotoxicol Environ. Saf.* 2020. V. 190. e110072. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110072>
47. *Zhang H., Sonnewald U.* Differences and commonalities of plant responses to single and combined stresses // *The Plant Journal*. 2017. V. 90. P. 839–855. <https://doi.org/10.1111/tpj.13557>
48. *Ziotti A., Ottoni C.A., Correa C.N., et al.* Differential physiological responses of a biogenic silver nanoparticle and its production matrix silver nitrate in Sorghum bicolor // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2021. V. 28. P. 32669–32682. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13069-4>

REFERENCES

1. *Burkhanova G.F., Sorokan A.V., Cherepanova E.A., Sarvarova E.R., Khairullin R.M., Maksimov I.V.* Endophytic bacteria *Bacillus* spp. with RNase activity and potato resistance to viruses. *Vavilovsky Journal of Genetics and Breeding*, 2019, vol. 23, no. 7, pp. 873–878. (In Russ.) <https://doi.org/10.18699/VJ19.561>
2. *Venzhik Yu.V., Moshkov I.E., Dykman L.A.* The effect of metal nanoparticles and their oxides on the photosynthetic apparatus of plants. *News of the Russian Academy of Sciences*. The series is biological, 2021, no. 2, pp. 137–152. (In Russ.)
3. *Gazaryan I.G., Khushpulyan D.M., Tishkov V.I.* Features of the structure and mechanism of action of plant peroxidases. *Successes of biological Chemistry*, 2006, vol. 46, pp. 303–322. (In Russ.)
4. *Zhuravleva N.V., Lukyanov P.A.* Chitinolytic enzymes: sources, characteristics and application in biotechnology. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2004, vol. 3, pp. 76–86. (In Russ.)
5. *Sangaev S.S., Kochetov A.V., Ibragimova S.S., Levenko B.A., Shumny V.K.* The role of extracellular ribonucleases in the physiological processes of higher plants. *Vestnik VOGiS*, 2010, vol. 14, no. 2, pp. 232–242. (In Russ.)
6. *Tretyakova O.M., Yevtushenkov A.I.* Expression of potato PR genes in bacterial infection. *Proceedings of BSU*, 2011, vol. 6, no. 1, pp. 163–167. (In Russ.)
7. *Khairullin R.M., Garifullina D.V., Veselova S.V., Cherepanova E.A., Maksimov I.V.* Potato virus infestation in the Republic of Bashkortostan and ribonuclease activity. *Bulletin of Plant Protection*, 2021, no. 104(4), pp. 196–201. (In Russ.)
8. *Asghar M.A., Yousuf R.I., Shoaib M.H., Asghar M.A.* Antibacterial, anticoagulant and cytotoxic evaluation of biocompatible nanocomposite of chitosan loaded green synthesized bioinspired silver nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* 2020, vol. 160, pp. 934. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.05.197>
9. *Aslani F., Bagheri S., Julkapli N.M., Juraimi A.S., Hashemi Golestan F.S., Baghdadi A.* Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview. *Sci. World J.* 2014, vol. 2014, pp. 28. <https://doi.org/10.1155/2014/641759>

10. Bakalova S., Nikolova A., Wedera D. Isoenzyme profiles of peroxidase, catalase and superoxide dismutase as affected by dehydration stress and aba during germination of wheat seeds. *Bulg. J. Plant Physiol*, 2004, vol. 30, pp. 64–77.
11. Bates L.S., Waldran R.P., Teare I.D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, 1973, vol. 39, pp., 205–207. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>
12. Bordiec S., Paquis S., Lacroix H., Dhondt S., Barka E., Kauffmann A., et al. Comparative analysis of defence responses induced by the endophytic plant growth-promoting rhizobacterium *Burkholderia phytofirmans* strain PsJN and the non-host bacterium *Pseudomonas syringae* pv. pisi in grapevine cell suspensions. *J. Exp. Bot*, 2011, vol. 62, pp. 595–603. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq291>
13. Bulut O., Yilmaz M.D. Catalytic evaluation of biocompatible chitosan-stabilized gold nanoparticles on oxidation of morin. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, vol. 5, no. 10, pp. 13761–13767. <https://doi.org/10.1021/acsnm.2c00834>
14. Chakraborty M., Hasanuzzaman M., Rahman M., Khan Md., Bhowmik P., Mahmud N.U., et. al. Mechanism of Plant Growth Promotion and Disease Suppression by Chitosan Biopolymer. *Agriculture*, 2020, vol. 10, no. 12, pp. 624. <https://doi.org/10.3390/agriculture1012062437>
15. Choi D.S., Hwang I.S., Hwang B.K. The pepper RNA-binding protein CaRBPI functions in hypersensitive cell death and defense signaling in the cytoplasm. *Plant Cell*, 2012, vol. 24, no. 4, pp. 1675–1690. <https://doi.org/10.1105/tpc.112.095869>
16. dos Santos O.A.L., dos Santos M.S., Filho S.A., Backx B.P. Nanotechnology for the control of plant pathogens and pests. *Plant Nano Biology*, 2024, vol. 8, e10080. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2024.100080>
17. Dutta P., Kumari A., Mahanta M., et al. Advances in Nanotechnology as a Potential Alternative for Plant Viral Disease Management. *Front. Microbiol*, 2022, vol. 13, e935193. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.935193>
18. El-DougDoug Noha K., Bondok A.M., El-DougDoug K.A. Evaluation of Silver Nanoparticles as Antiviral Agent Against ToMV and PVY in Tomato Plants. *Middle East Journal of Applied Sciences*, 2018, vol. 8, pp. 100–111.
19. Fabro G., Kovács I., Pavel V., Szabodos L., Alvarez M.E. Proline accumulation and AtP5CS2 gene activation are induced by plant-pathogen incompatible interactions in Arabidopsis. *Mol. Plant Microb. Interact*, 2004, vol. 17, no. 4, pp. 343–350.
20. Fornera S., Walde pp. Spectrophotometric quantification of horseradish peroxidase with o-phenylenediamine. *Analytical Biochemistry*, 2010, vol. 407, no. 2, pp. 293–295. <https://doi.org/10.1016/j.ab.2010.07.034>
21. Gowda S., Sriram S. Current status of nanotechnology application in management of the complex fungal pathogen *Colletotrichum* – a review. *Sydowia*, 2020, vol. 72, pp. 275–290. <https://doi.org/10.12905/0380.SYDOWIA72-2020-0275>
22. Gowda S., Sriram S. Green synthesis of chitosan silver nanocomposites and their antifungal activity against *Colletotrichum truncatum* causing anthracnose in chillies. *Plant Nano Biology*, 2023, vol. 5, pp. 100041. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100041>
23. Hadwan M.H., Abed H.N. Clarifying the negative aspects in the Goth method. *Data in Brief*, 2016, vol. 6, pp. 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.12.012>
24. He M., Xu Y., Cao J. Protoplasts: a useful research system for plant cell biology, especially dedifferentiation. *Protoplasma*, 2013, vol. 250, no. 1, pp. 1229–1240.
25. Hileuskaya K., Kraskouski A., Ihnatsyeu-Kachan A., Saichuk A., Pinchuk S., Nikalaichuk V., et al. New insights into chitosan-Ag nanocomposites synthesis: Physicochemical aspects of formation, structure-bioactivity relationship and mechanism of antioxidant activity. *Int. J. Biol. Macromol*, 2025, vol. 300, pp. 140077. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140077>
26. Hou J., Zhou Y., Wang C., Li S., Wang X. Toxic Effects and Molecular Mechanism of Different Types of Silver Nanoparticles to the Aquatic Crustacean *Daphnia magna*. *Environ. Sci. Technol*, 2017, vol. 51, no. 21, pp. 12868–12878.
27. Jannoo K., Teerapatsakul C., Punyanut A., Pasanphan W. Electron beam assisted synthesis of silver nanoparticle in chitosan stabilizer: preparation, stability and inhibition of building fungi studies. *Radia. Phys. Chem*, 2015, vol. 112, pp. 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2015.03.035>
28. Jia X., Rajib M., Yin H. Recognition pattern, functional mechanism and application of chitin and chitosan oligosaccharides in sustainable agriculture. *Curr. Pharm. Des*, 2020, vol. 26, no. 29, pp. 3508–3521. <https://doi.org/10.2174/1381612826666200617165915>
29. Jiang Z.Y., Woollard A.C.S., Wolff S.P. Hydrogen peroxide production during experimental protein glycation. *FEBS Lett*, 1990, vol. 268, pp. 69–71.
30. Kruger N.J. In: *The Protein Protocols Handbook. Springer Protocols Handbooks*. Ed. J.M. Walker. Totowa, USA: Humana Press, 2009, pp. 17–24.

31. Kulikouskaya V., Hileuskaya K., Kraskouski A., Kozerozhets I., Stepanova E., Kuzminski I., et al. Chitosan-capped silver nanoparticles: A comprehensive study of polymer molecular weight effect on the reaction kinetic, physicochemical properties, and synergetic antibacterial potential. *SPE Polymers*, 2022, vol. 3, no. 2, pp. 77–90. <https://doi.org/10.1002/pls2.10069>
32. Kumari M., Pandey P., Bhattacharya A., Mishra A., Nautiyal C.S. Protective role of biosynthesized silver nanoparticles against early blight disease in *Solanum lycopersicum*. *Plant Physiol. Biochem*, 2017, vol. 121, pp. 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.11.004>
33. Lalau C.M., Simioni C., Vicentini D.S., et al. Toxicological effects of AgNPs on duckweed (*Landoltia punctata*). *Sci. Total Environ*, 2020, vol. 710, e136318. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136318>
34. Luna C.M., Pastori G.M., Driscoll S., Groten K., Bernard S., Foyer C.H. Drought controls on H₂O₂ accumulation, catalase (CAT) activity and CAT gene expression in wheat. *J. Exp. Bot*, 2005, vol. 56, pp. 417–423. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri039>
35. Manju K., Ranjini H.K., Raj S.N., Nayaka S.C., Lavanya S.N., Chouhan S.K., et al. Nano-Management Approaches for Salt Tolerance in Plants under Field and In Vitro Conditions. *Plant Nano Biology*, 2023, vol. 4, pp. 100039. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100039>
36. Martínez-Cisterna D., Chen L., Bardehle L., Hermosilla E., Tortella G., Chacón-Fuentes M., Rubilar O. Chitosan-Coated Silver Nanocomposites: Biosynthesis, Mechanical Properties, and Ag⁺ Release in Liquid and Biofilm Forms. *Int. J. Mol. Sci*, 2025, vol. 26, pp. 4130. <https://doi.org/10.3390/ijms26094130>
37. Mbang O., Cukrowska E., Gulumian M. Dissolution of titanium dioxide nanoparticles in synthetic biological and environmental media to predict their biodurability and persistence. *Toxicology Reports*, 2022, vol. 9, pp. 788–796.
38. Noga M., Milan J., Frydrych A., Jurowski K. Toxicological Aspects, Safety Assessment, and Green Toxicology of Silver Nanoparticles (AgNPs)-Critical Review: State of the Art. *Int. J. Mol. Sci*, 2023, vol. 24, pp. 5133. <https://doi.org/10.3390/ijms24065133>
39. Pfannschmidt T., Brautigam K., Wagner R., Dietzel L., Schroter Y., Steiner S., Nykytenko A. Dynamic Plastid Redox Signals Integrate Gene Expression and Metabolism to Induce Distinct Metabolic States in Photosynthetic Acclimation in *Arabidopsis*. *Ann. Bot*, 2009, vol. 103, pp. 599–607. <https://doi.org/10.1093/aob/mcn081>
40. Riseh R.S., Hassanisaadi M., Vatankhah M., Babaki S.A., Barka E.A. Chitosan as a potential natural compound to manage plant diseases. *Int. J. Biol. Macromol*, 2022, vol. 220 pp. 998–1009. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.08.109>
41. Sadak M.S. Impact of silver nanoparticles on plant growth, some biochemical aspects, and yield of fenugreek plant (*Trigonella foenum-graecum*). *Bull. Natl. Res. Cent*, 2019, vol. 43, no. 38. <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0077-y>
42. Smirnoff N., Arnaud D. Hydrogen peroxide metabolism and functions in plants. *New Phytologist*, 2019, vol. 221, no. 3, pp. 1197–1214. <https://doi.org/10.1111/nph.15488>
43. Smith J.N., Thomas D.G., Jolley H. et al. All that is silver is not toxic: silver ion and particle kinetics reveals the role of silver ion aging and dosimetry on the toxicity of silver nanoparticles. *Part Fibre Toxicol*, 2018, vol. 15, no. 47. <https://doi.org/10.1186/s12989-018-0283-z>
44. Vasyukova N.I., Ozeretskoykaya O.L. Jasmonate-dependent defense signaling in plant tissues. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2009, vol. 56, no. 5, pp. 581–590. <https://doi.org/10.1134/S102144370905001X>
45. Vilvert E., Stridh L., Andersson B., Olson Å., Aldén L., Berlin A. Evidence based disease control methods in potato production. *Environmental Evidence*, 2022, vol. 11, no. 6, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1186/s13750-022-00259-x>
46. Wang L., Sun J., Lin L. Silver nanoparticles regulate *Arabidopsis* root growth by concentration-dependent modification of reactive oxygen species accumulation and cell division. *Ecotoxicol Environ. Saf*, 2020, vol. 190, e110072. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.110072>
47. Zhang H., Sonnewald U. Differences and commonalities of plant responses to single and combined stresses. *The Plant Journal*, 2017, vol. 90, pp. 839–855. <https://doi.org/10.1111/tbj.13557>
48. Ziotti A., Ottoni C.A., Correa C.N., et al. Differential physiological responses of a biogenic silver nanoparticle and its production matrix silver nitrate in *Sorghum bicolor*. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*, 2021, vol. 28, pp. 32669–32682. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13069-4>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Яруллина Любовь Георгиевна — доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: yarullina@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1459-0067>

Черепанова Екатерина Александровна — кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: k_cherepanova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9976-0944>

Бурханова Гузель Фанилевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: guzel_mur@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2346-3502>

Заикина Евгения Александровна — кандидат биологических наук, научный сотрудник, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: evisheva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2134-0592>

Цветков Вячеслав Олегович — кандидат биологических наук, доцент, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

E-mail: zv347@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9646-478X>

Сорокань Антонина Вячеславовна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: fourtyanns@googlemail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0443-7547>

Марданшин Илдар Салимьянович — доктор сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник, Башкирский научно-исследовательский институт сельского хозяйства УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: ildar.mardanshin1966@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6174-5151>

Фаткуллин Ильдус Ямилович — аспирант, Институт биохимии и генетики УФИЦ РАН, Уфа, Российская Федерация

E-mail: ildus.fatkullin2017@yandex.ru

Пустовая Анастасия Дмитриевна — магистрант, Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация

E-mail: nastya2_0_0_2@mail.ru

Yarullina, Lyubov G. — Doctor of Biological Sciences, Professor, Leading Researcher, Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

E-mail: yarullina@bk.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1459-0067>

Cherepanova, Ekaterina A. — Cand. Sc. (Biological Sciences), Researcher, Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

E-mail: k_cherepanova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-9976-0944>

Burkhanova, Guzel F. — Cand. Sc. (Biological Sciences), Senior Researcher, Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

E-mail: guzel_mur@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2346-3502>

Zaikina, Evgeniya A. — Cand. Sc. (Biological Sciences), Researcher, Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

E-mail: evisheva@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2134-0592>

Tsvetkov, Vyacheslav O. — Cand. Sc. (Biological Sciences), Associate Professor, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

E-mail: zv347@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9646-478X>

Sorokan, Antonina V. — Cand. Sc. (Biological Sciences), Senior Researcher, Institute of Biochemistry and Genetics, Ufa Federal Research Center, Russian Academy of Sciences, Ufa, Russian Federation

E-mail: fourtyanns@googlemail.com

<https://orcid.org/0000-0002-0443-7547>

Mardanshin, Ildar S. — Doctor of Agricultural Sciences, senior scientific coworker, Bashkir scientific research Institute of Agriculture, UFITs RAS, Ufa, Russian Federation

E-mail: ildar.mardanshin1966@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-6174-5151>

Fatkullin, Ildus Y. — graduate student, Institute of Biochemistry and Genetics, UFIC RAS, Ufa, Russian Federation

E-mail: ildus.fatkullin2017@yandex.ru

Pustovaya, Anastasia D. — master's student, Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

E-mail: nastya2_0_0_2@mail.ru

Калацкая Жанна Николаевна — ведущий научный сотрудник, Институт экспериментальной ботаники им. В.Ф. Купревича НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: kalatskayaj@mail.ru

Гилевская Ксения Сергеевна — кандидат хим. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
E-mail: k_hilevskay@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3121-0014>

Поступила в редакцию 25.07.2025
После доработки 25.08.2025
Принята к публикации 05.12.2025

Kalatskaya, Zhanna N. — presenter Researcher, V.F. Kuprevich Institute of Experimental Botany, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: kalatskayaj@mail.ru

Gilevskaya, Ksenia S. — Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Chemistry of New Materials, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
E-mail: k_hilevskay@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-3121-0014>

Received July 25, 2025
Revised August 25, 2025
Accepted December 05, 2025