ПРИКЛАДНАЯ БИОХИМИЯ И МИКРОБИОЛОГИЯ /
APPLIED BIOCHEMISTRY AND MICROBIOLOGY. 2026. Т. 62. № 2. С. 286–296

DOI: 10.7868/S3034574X26020128
УДК: 632.9: 577.1:544.77

Оригинальная статья

ВЛИЯНИЕ ХИТОЗАНА И НАНОЧАСТИЦ ХИТОЗАНА НА УСТОЙЧИВОСТЬ РАСТЕНИЙ ПШЕНИЦЫ К ТЕМНО-БУРОЙ ПЯТНИСТОСТИ

Э.В. Попова[1], Н.С. Домнина[2], И.И. Новикова[1], Н.М. Коваленко[1], И.Л. Краснобаева[1,*]

[1] ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Пушкин, Российская Федерация

[2] Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Петергоф, Российская Федерация

**E-mail: krasnobaeva08@mail.ru*

Аннотация. Проведено сравнительное изучение фунгистатической и элиситорной активности растворов хитозана и дисперсий наночастиц хитозана, полученных методом дробного осаждения при pH 5,0 (НХ-5) и pH 7,0 (НХ-7) из хитозана с молекулярной массой 60 кДа. Обе дисперсии продемонстрировали более высокую фунгистатическую активность в отношении *Bipolaris sorokiniana* по сравнению с раствором хитозана. Для дисперсии НХ-5 выявлена тенденция к большему эффекту ингибирования роста мицелия *B. sorokiniana* по сравнению с дисперсией НХ-7. Установлено, что предварительная обработка растений пшеницы дисперсиями НХ-5 и НХ-7 снижала пораженность листьев темно-бурой пятнистостью в три и в два раза соответственно по сравнению с контролем. Раствор хитозана в этих же условиях подавлял развитие болезни только на 10%. Изученные дисперсии могут рассматриваться в качестве основы эффективных натуральных антимикробных препаратов, обладающих индуцирующей активностью.

Ключевые слова: хитозан, нанохитозан, антигрибная, элиситорная активности, пшеница, *Bipolaris sorokiniana*

Соблюдение этических стандартов. В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

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

Финансирование. Работа финансировалась за счет государственного задания согласно тематическому плану ВИЗР по проекту по FGEU-2023-0006 «Разработка эколого-генетических основ отбора штаммов микробов-антагонистов, энтомопатогенных грибов и нематод; разработка технологий получения и применения новых полифункциональных препаратов для контроля численности вредных организмов (вредители, возбудители болезней) и повышения супрессивности почвы» с использованием УНУ «Государственная коллекция микроорганизмов, патогенных для растений и их вредителей» (зарегистрирована в WFCC WDCM №760) из средств бюджета института.

Ссылка для цитирования: Попова Э.В., Домнина Н.С., Новикова И.И., Коваленко Н.М., Краснобаева И.Л. Влияние хитозана и наночастиц хитозана на устойчивость растений пшеницы к темно-бурой пятнистости. *Прикладная биохимия и микробиология / Applied biochemistry and microbiology*. 2026. Т. 62. № 2. С. 284–294. https://doi.org/10.7868/S3034574X26020128

© Э. В. Попова, Н. С. Домнина, И. И. Новикова, Н. М. Коваленко, И. Л. Краснобаева, 2026

PRIKLADNAYA BIOKHIMIYA I MIKROBIOLOGIYA /
APPLIED BIOCHEMISTRY AND MICROBIOLOGY, 2026, vol. 62, no. 2, pp. 284–296

DOI: 10.7868/S3034574X26020128 Original Article

EFFECT OF CHITOSAN AND CHITOSAN NANOPARTICLES ON RESISTANCE OF WHEAT PLANTS TO DARK BROWN SPOT

E.V. Popova[1], N.S. Domnina[2], I.I. Novikova[1], N.M.Kovalenko[1], I.L. Krasnobaeva[1,*]

[1]All-Russian Research Institute for Plant Protection, Pushkin, Russian Federation

[2]St. Petersburg State University, St. Petersburg, Peterhof, Russian Federation

**E-mail: krasnobaeva08@mail.ru*

Abstract. A comparative study of fungistatic and elicitor activity of chitosan solutions and dispersions of chitosan nanoparticles obtained by fractional precipitation at pH 5.0 (NC-5) and pH 7.0 (NC-7) from chitosan with a molecular weight of 60 kDa was carried out. Both dispersions demonstrated higher fungistatic activity against Bipolaris sorokkiniana compared to chitosan solution. A tendency towards a greater effect of inhibition of *B. sorokiniana* mycelium growth was revealed for NC-5 dispersion compared to NC-7 dispersion. It was found that pretreatment of wheat plants with NC-5 and NC-7 dispersions reduced leaf infestation with dark brown spot by three and two times, respectively, compared to the control. Chitosan solution under the same conditions suppressed disease development by only 10%. The studied dispersions can be considered as the basis for effective natural antimicrobial drugs with inducing activity.

Keywords: chitosan, nanochitosan, antifungal, elicitor activity, wheat, *Bipolaris sorokiniana*

Compliance with ethical standards. This work does not contain any human or animal studies.

Conflict of interest. The authors of this work declare that they have no conflicts of interest.

Author contributions. All authors made significant contributions to the concept development, conduct of the study, and preparation of the article.

Funding. This work was funded by a state assignment under the VIZR subject plan for project FGEU-2023-0006, "Development of an Ecological and Genetic Foundation for Selecting Strains of Antagonistic Microbes, Entomopathogenic Fungi, and Nematodes; Development of Technologies for Obtaining and Using New Multifunctional Preparations to Control the Population of Harmful Organisms (Pests, Disease Pathogens) and Enhance Soil Suppressivity," using the State Collection of Microorganisms Pathogenic to Plants and Their Pests (registered in WFCC WDCM No. 760) from the institute's budget.

For Citation: Popova E.V., Domnina N.S., Novikova I.I., Kovalenko N.M., Krasnobaeva I.L. Effect of chitosan and chitosan nanoparticles on resistance of wheat plants to dark brown spot. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya / Applied biochemistry and microbiology.* 2026;62(2):284–294. (In Russ.)
https://doi.org/10.7868/S3034574X26020128

© E.V. Popova, N.S. Domnina, I.I. Novikova, N.M. Kovalenko, I.L. Krasnobaeva, 2026

Использование традиционного подхода к борьбе с болезнями растений, основанного на применении химических пестицидов, оказывает пагубное воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Это обусловливает острую необходимость в инновационных и экологически безопасных стратегиях контроля болезней растений [1, 15].

Перспективным направлением является создание препаратов (элиситоров), эффективность действия которых определяется повышением природной устойчивости растений к фитопатогенам [3, 6, 7, 34].

В случае роста устойчивости растений к патогенам будет наблюдаться увеличение их урожайности и снижение зависимости от применения синтетических пестицидов, что в результате минимизирует воздействие химических веществ на окружающую среду и будет способствовать появлению более здоровых экосистем [16].

К настоящему времени многообещающие результаты получены при использовании в растениеводстве биополимера хитозана, обладающего широким спектром биологической активности (антигрибной, антибактериальной, антивирусной, элиситорной). Препараты на его основе применяются в качестве средств, стимулирующих рост и развитие растений, а также повышающих устойчивость многих сельскохозяйственных культур к грибным, вирусным и бактериальным заболеваниям [2, 8].

Успешное развитие нанотехнологий не обошло вниманием и этот биополимер, на основе которого создаются наноматериалы для их широкого использования, в том числе и в растениеводстве [20].

Основными отличительными физико-химическими характеристиками наночастиц хитозана (нанохитозан) являются большая площадь поверхности, положительный заряд и наноразмер. Именно благодаря этим свойствам препараты с нанохитозаном имеют повышенную биологическую активность и улучшенное взаимодействие с растительными тканями. Предполагается, что наночастицы хитозана обладают прямой антимикробной активностью, индукцируют защитные реакции растений и модулируют экспрессию микробных генов [28].

Анализ использования нанохитозана для создания препаратов, повышающих устойчивость растений к биотическим и абиотическим стрессам, проведен в ряде обзорных статей [13, 21, 25, 28].

Несмотря на достаточное количество работ по применению нанохитозана в качестве перспективных средств защиты растений, необходимо продолжать исследования с целью уточнения механизмов его действия, оценки токсичности для растений, а также способов получения собственно нанохитозана.

Широко известными способами получения наночастиц хитозана являются ионотропное гелеобразование [17], метод коалесценции капель эмульсии [37], метод обратных мицелл [27], самосборка [19] и распылительная сушка [29]. Каждый из перечисленных методов имеет свои преимущества и недостатки. Нанохитозан может быть получен несколькими простыми методами, методом осаждения, ионным гелеобразованием или методом полиэлектролитного комплекса [30].

Считается, что наиболее распространенным методом получения наночастиц хитозана является ионотропное гелеобразование с использованием триполифосфата натрия. В статье [33] сделан обзор публикаций с 2013 по 2023 гг. по этому методу, и в результате авторы пришли к выводу, что необходимость использования триполифосфата натрия в процессе может неоднозначно влиять на биологическую активность и механизм действия получаемых наночастиц хитозана. Среди других методов авторы особо отметили подход к получению нанохитозана, при котором частицы содержат в своем составе только хитозан, и высказали предположение о потенциальных преимуществах таких наночастиц против фитопатогенных грибов [33].

Среди известных способов получения нанохитозана метод дробного осаждения раствора хитозана щелочью выгодно отличается отсутствием побочных химических процессов и методической простотой образования наночастиц хитозана, что делает этот способ наиболее перспективным для использования в растениеводстве [4, 5].

Цель работы — провести сравнение антигрибной и иммуномодулирующей активности растворов хитозана и дисперсий нанохитозана, полученных методом дробного осаждения.

МЕТОДИКА

Для получения наночастиц хитозана (нанохитозан) методом дробного осаждения был использован хитозан с молекулярной массой 60 кДа и степенью деацетилирования 85% (ООО « Биопрогресс», Россия).

Получение и свойства нанохитозана и соответствующих дисперсий из него подробно описаны авторами в работе [32, 38].

Особенностью метода дробного осаждения раствора хитозана щелочью является возможность получения суспензий нанохитозана (**НХ**) при разном значении pH в процессе образования его наноструктурированной формы, что обусловлено постепенным ростом значения pH в системе (начальный pH=3,4) по мере добавления щелочи.

Для проведения биологических испытаний использованы два типа дисперсий нанохитозана (НХ-5 и НХ-7), полученных при различных зна-

чениях pH среды, что обусловлено условиями их приготовления.

Для экспериментов из «Государственной коллекции микроорганизмов, патогенных для растений и их вредителей» ВИЗР Центра коллективного пользования научным оборудованием «Инновационные технологии защиты растений» был предоставлен штамм фитопатогенного гриба *Bipolaris sorokiniana*. Оценку антигрибной активности образцов хитозана по отношению к *B. sorokiniana* (возбудители листовых пятнистостей многих сельскохозяйственных культур) проводили методом агаровых блоков [31].

С этой целью в теплую агаризованную среду Чапека вносили дисперсии нанохитозана определенного объема, рассчитывая конечную концентрацию в среде в зависимости от исходной концентрации частиц. После застывания среды на поверхности агара помещали блоки 10-суточного микромицета *B. sorokiniana* диаметром 6 мм, который предварительно выращивали в чашках Петри на агаризованной среде Чапека на светоустановке при комнатной температуре. В качестве контроля использовали чашки со средой Чапека без испытуемых образцов хитозана с блоками тест-культуры. Чашки инкубировали в темноте при 25° С. Фунгистатическую активность оценивали по диаметру подавления роста тест-культуры *B. sorokiniana* через 3, 5 и 7 сут культивирования.

Опыты по оценке иммуномодулирующей активности образцов нанохитозана проводили методом отделенных листьев [26].

Растения пшеницы *Triticum aestivum* L, восприимчивого к болезням сорта Саратовская 29, выращивали в кюветах с водой в течение 7 сут на светоустановке с флуоресцентными лампами ЛДП-40 при температуре 22–24°С, фотопериод — 16 ч. За 24 ч до инокуляции патогеном семидневные проростки пшеницы (не менее 100 растений на вариант) опрыскивали растворами: дисперсией НХ 7 и НХ 5, а также раствором хитозана в ацетатном буфере (pH 5,0) из расчета 30 мл на 100 растений. Контролем служили растения, обработанные водой. На следующий день готовили газоны для каждого опытного образца, нарезая и укладывая отрезки листьев одинаковой длины плотным слоем в кювете (30×30 см) на стеклянной пластине, покрытой фильтровальной бумагой, смоченной 0,004%-ным водным раствором бензимидазола, который способен поддерживать метаболизм в отрезках листьев пшеницы на уровне, при котором тип реакции к возбудителю соответствует таковому интактных растений. Стекло помещали в кювету. Концы отрезков укрывали валиками ваты, смоченной этим же раствором бензимидазола. Затем контрольные листья и листья, обработанные хитозаном и наночастицами хитозана, опрыскивали 0,5 мл суспензии конидий *B. sororiniana* из пульверизатора. Концентрация спор в суспензии — 4×10^4 спор/мл. Кювету плотно обертывали полиэтиленовой пленкой и выдерживали в темноте в течение суток для лучшего прорастания спор. Затем ее помещали в светоустановку с освещенностью 2500–3000 лк при температуре 22–24°С и влажности 100 % для наблюдения за развитием болезни.

Дисперсии нанохитозана НХ-5 и НХ-7 отбирались при разном значении pH в процессе дробного осаждения раствора хитозана (pH=3,4) путем добавления 0,1 н раствора KOH при постоянном перемешивании со скоростью 0,2 мл/мин., что обусловлено постепенным ростом значения pH в системе по мере добавления щелочи. Экспериментально были получены концентрации дисперсий нанохитозана: 100, 200, 300, 500 мкг/мл, которые были использованы в опытах.

Интенсивность, или степень развития болезни, определяли на 4 сут после инокуляции патогеном по площади поражения поверхности листьев 100 растений (%), согласно методике, представленной в статье Manikandan, Sathiyabama [26]. В контрольных опытах растения обрабатывали водой. Все биологические опыты проводили в 3-кратной повторности.

Полученные данные обрабатывали с использованием методов описательной статистики (на основе стандартных ошибок средних ±SEM). Уровень различий между средними значениями определяли по критерию наименьшей существенной разницы (НСР) при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Фунгистатическая активность всех исследуемых образцов хитозана по отношению к аскомицету *B. sorokiniana* экспериментально определяли методом агаровых блоков. Результаты представлены в таблице 1.

Результаты опыта показали, что обе дисперсии обладают более высокой фунгистатической активностью по сравнению с раствором хитозана.

Подобное соотношение активностей для дисперсий наночастиц хитозана по сравнению с раствором хитозана были получены многими исследователями, изучавшими ингибирующую активность в отношении различных грибов [11, 12, 22].

Во всех случаях действие наночастиц хитозана исследователи связывают с особенностями физико-химических характеристик частиц, позволяющими им проникать в цитоплазму и взаимодействовать с клеточными мембранами микроорганизмов. Это обусловливает широкий спектр антимикробной активности нанохитозана. К настоящему времени доказана эффективность дисперсий нанохитозана против следующих патогенов растений: *Alternaria alternata*, *Macrophomina*

phaseolina, *Rhizoctonia solani* [35], *Fusarium* [18], *Fusarium oxysporum*, *Sclerotium rolfsii* [14], *graminearum* [24], *Pseudomonas syringae* pv *glycinea* *Ralstonia solanacearum* [23], *Botrytis cinerea* [39].

Таблица 1. Фунгистатическая активность дисперсий НХ-5, НХ-7 и раствора хитозана (ацетатный буфер, pH 5) по отношению к *Bipolaris sorokiniana*

Table 1. The fungistatic activity of NC-5, NC-7 dispersions and chitosan solution (acetate buffer, pH 5) against *Bipolaris sorokiniana*

Вариант	Концентрация, мкг/мл	Ингибирование роста мицелия *Bipolaris sorokiniana*, %		
		3 сут	5 сут	7 сут
Дисперсия НХ–5	100	50,4	55,7	48,0
	200	59,5	64,1	59,0
Дисперсия НХ–7	100	46,8	53,0	46,1
	200	56,8	63,1	55,5
Раствор хитозана	100	32,3	38,1	30,9
	200	40,2	45,2	40,1

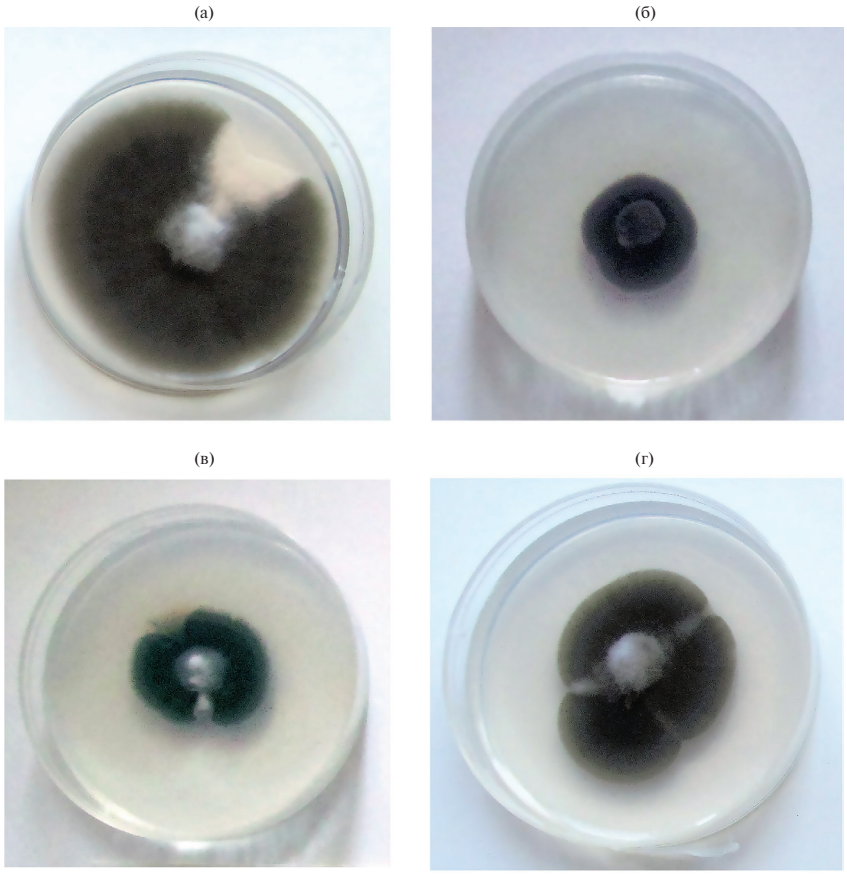

Рис.1 Фунгистатическая активность дисперсий НХ-5, НХ-7 и хитозана по отношению к *Bipolaris sorokiniana:* а — контроль; б — дисперсии НХ-5; в — дисперсии НХ-7; г — хитозан

Fig. 1. Fungistatic activity of NC-5, NC-7 and chitosan dispersions against Bipolaris sorokiniana: a — control; b — NC-5 dispersions; c — NC-7 dispersions; d — chitosan

Анализ данных таблицы 1 показал, что для дисперсии НХ-5 прослеживалась тенденция к большему эффекту ингибирования роста мицелия *B. sorokiniana* по сравнению с дисперсией НХ-7. Наблюдающееся преимущество дисперсии НХ-5 можно связать с особенностями ее состава. Ранее было установлено, что дисперсия НХ-5 состоит не только из частиц нанохитозана, образовавшихся в процессе дробного осаждения до pH 5,0, но также содержит агрегаты макромолекул хитозана, представляющие собой гелеобразные мягкие частицы с диаметром около 100 нм [38]. Дисперсия НХ-7 содержит только нанохитозан, образующийся при добавлении щелочи до pH ~7,0. Методом атомно-силовой спектроскопии путем анализа полученных изображений установлено, что в дисперсиях НХ-7 присутствуют только плотные сплошные частицы, размер которых оценивался величинами в диапазоне 5–25 нм.

Оценка элиситорной активности дисперсий нанохитозана и раствора хитозана была дана по их способности повышать устойчивость растений пшеницы к темно-бурой пятнистости, возбудитель *B. sorokiniana* (табл. 2).

Таблица 2. Влияние дисперсии НХ-5, НХ-7 и раствора хитозана на развитие темно-бурой пятнистости пшеницы (*B. sorokiniana*)

Table 2. The effect of NC-5, NC-7 dispersion and chitosan solution on the development of dark brown spotting in wheat (*B. sorokiniana*)

Образец	Концентрация, мкг/мл	Пораженность листьев, %
Контроль	-	35
Дисперсия НХ-5	500	5
	300	7
	100	10
Дисперсия НХ-7	300	10
	100	15
Раствор хитозана, (ацетатный буфер, pH 5,0)	100	25
$НСР_{0,05}$	-	4,0

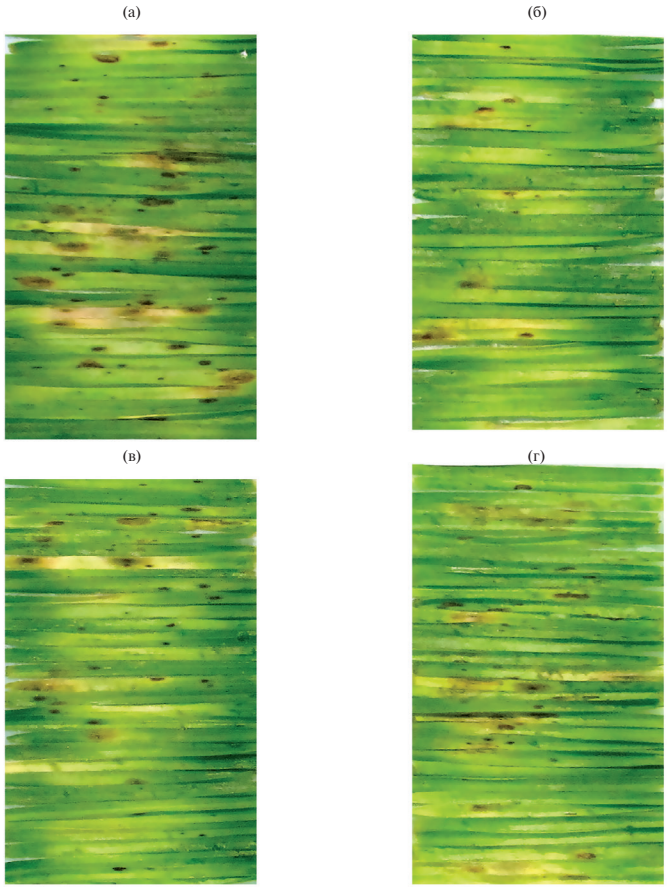

Рис. 2. Влияние дисперсий НХ-5, НХ-7 и раствора хитозана на развитие темно-бурой пятнистости пшеницы: а — контроль; б — дисперсия НХ-5; в — дисперсия НХ-7; г — хитозан
Fig. 2. The effect of NC-5, NC-7 dispersions and chitosan solution on the development of dark brown spotting in wheat: a — control; b — NC-5 dispersion; c — NC-7 dispersion; d — chitosan

Обе дисперсии продемонстрировали высокую элиситорную активность, при этом дисперсия НХ-5 обладала повышенным иммуномодулирующим действием по сравнению с дисперсией НХ-7. Вполне вероятно, что, как и в опытах с фунгистатическим действием, причина преимущества дисперсии НХ-5 кроется в ее составе, сочетающем наночастицы и ассоциаты свободных макромолекул хитозана.

Если в случае дисперсии НХ-7 их биологическая активность обусловлена наличием только наноразмерных частиц с большой удельной поверхностью, то для дисперсий НХ-5 существенным является тот факт, что наряду с наночастицами присутствуют агрегаты макромолекул хитозана, которые при pH 5,0 несут положительный заряд, что, вполне возможно, приводит к усилению биологического действия.

Сравнение элиситорной активности дисперсий НХ-5 и НХ-7 с раствором хитозана подтвердило преимущество дисперсий (табл. 2). Из результатов, приведенных в табл. 2, видно, что предварительная обработка растений пшеницы дисперсиями НХ-5 и НХ-7 в концентрации 100 мкг/мл в 3 и 2 раза (соответственно) снижала пораженность листьев темно-бурой пятнистостью по сравнению с контролем, в то время как раствор хитозана в той же концентрации только на 10% подавлял развитие болезни. Следует также отметить наличие концентрационной зависимости для дисперсий.

В работе [10] изучалось действие хитозана по защите яблок от патогена *Penicillium expansum*, было установлено, что экзогенное применение наночастиц хитозана (размер менее 100 нм) приводило к системной приобретенной устойчивости к данной инфекции за счет увеличения экспрессии генов, связанных с реакциями защиты. Эффективность дисперсий наночастиц объясняется легкостью их проникновения в эпидермис листьев, что облегчало поглощение активных молекул и усиливало рост и продуктивность культур [9, 36].

Сравнительная оценка дисперсий нанохитозана и раствора хитозана выявила определенные преимущества дисперсий как по фунгистатической, так и по элиситорной активности, которые реализуются при значительно меньших концентрациях. Таким образом, полученные результаты согласуются с выводами этих авторов.

В заключение необходимо отметить, что изученные дисперсии хитозана могут рассматриваться в качестве эффективных натуральных антимикробных препаратов, обладающих способностью индуцировать устойчивость растений к болезням.

Простота метода их получения, отсутствие других биологически активных компонентов в системах, кроме самого хитозана, являются основными преимуществами данного подхода. Их применение в защите растений открывает большие перспективы для снижения биотических стрессов, что приведет к значительному сокращению использования агрохимикатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Архипов М.В., Данилова Т.А., Павлюшин В.А. и др.* Пути и возможности фитосанитарной оптимизации агроэкосистем Северо-Западного региона России // Вестник защиты растений. 2017. № 2(92). С. 5–14.
2. *Варламов В.П.* Хитозан и его производные в биотехнологии, сельском хозяйстве и медицине //Прикл. биохимия и микробиология. 2022. Т. 58. № 2. С. 107. https://doi.org/10.31857/s0555109922020167
3. *Карпун Н.Н., Янушевская Э.Б., Михайлова Е.В.* Механизмы формирования неспецифического индуцированного иммунитета у растений при биогенном стрессе // Сельскохозяйственная биология. 2015. Т. 50. С. 540–549. https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.540rus
4. *Купреев Н.И., Кузнецов В.А.* Способ получения наночастиц низкомолекулярного хитозана. 2011. Пат. № 2428432 (Россия).
5. *Милушева Р.Ю., Рашидова С.Ш.* Биоактивные свойства нанохитозана *Bombyx mori* // Высокомол. соед. Серия С. 2017. Т. 59. № 1. С. 33. https://doi.org/10.7868/S2308114717010058
6. *Тютерев С.Л.* Экологически безопасные индукторы устойчивости растений к болезням и физиологическим стрессам // Вестник защиты растений 2015. № 1(83). С. 3–13.
7. *Шафикова Т.Н., Омеличкина Ю.В.* Молекулярно-генетические аспекты иммунитета растений к фитопатогенным бактериям и грибам // Физиология растений. 2015. Т. 62. № 5. С. 611–627. https://doi.org/10.7868/S0015330315050140
8. *Щербань А.Б.* Хитозан и его производные как перспективные средства защиты растений // Вавиловский журнал генетики и селекции. 2023. Т. 27. № 8. С. 1010–1021. https://doi.org/10.18699/VJGB-23-11
9. *Abdel-Aziz H., Hasaneen M.N., Omar A.* Effect of foliar application of nano chitosan NPK fertilizer on the chemical composition of wheat grains // Egyp. J. Bot. 2018. V. 58. №1. P. 87–95. https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.1907.1137

10. *Abdel-Rahman F.A., Monir G.A., Hassan M.S. et al.* Exogenously applied chitosan and chitosan nanoparticles improved apple fruit resistance to blue mold, upregulated defense-related genes expression, and maintained fruit quality // Horticulturae 2021. V. 7. № 8. P. 224. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080224

11. *Abdeltwab W.M., Abdelaliem Y.F., Metry W.A., Eldeghedy M.* Antimicrobial effect of chitosan and nano-chitosan against some pathogens and spoilage microorganisms // J. Adv. Lab. Research Biol. 2019. V. 10. № 1. P. 8–15.

12. *Appu M., Muthukrishnan S.* Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea* // Int. J. Biol. Macromol. 2016. V. 84. P. 58–61. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083

13. *Bandara S., Du H., Carson L. et al.* Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials // Nanomaterials. 2020. V. 10. P. 1903. https://doi.org/10.3390/nano10101903

14. *Boruah S., Dutta P.* Fungus mediated biogenic synthesis and characterization of chitosan nanoparticles and its combine effect with *Trichoderma asperellum* against *Fusarium oxysporum, Sclerotium rolfsii* and *Rhizoctonia solani* // Ind Phytopathol. 2021. V. 74. № 1. P. 81–93. https://doi.org/10.1007/s42360-020-00289-w

15. *Brooks D.R., Hoberg E.P., Boeger W.A., Trivellone V.* Emerging infectious disease: An underappreciated area of strategic concern for food security // Transboundary and Emerging Diseases. 2022. V. 69. P. 254–267. https://doi.org/10.1111/tbed.14009

16. *Brzozowski L, Mazourek M.* A sustainable agricultural future relies on the transition to organic agroecological pest management // Sustainability. 2018. V. 10. № 2023. P. 1–25. https://doi.org/10.3390/su10062023

17. *Calvo P., Remunan-Lopez C., Vila-Jato J.L., Alonso M.* Novel hydrophilic chitosan-polyethylene oxide nanoparticles as protein carriers // J. Appl. Polym. Sci. 1997. V. 63. P. 125–132.

18. *Choudhary S., Joshi A., Saharan V.* Assessment of Cu-Chitosan Nanoparticles for its antibacterial activity against *Pseudomonas syringae* pv. *glycinea* // Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci. 2017. V. 6. № 11. P. 1335–50. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.160

19. *Chuang C-Y., Don T-M., Chiu W-Y.* Preparation of environmental-responsive chitosan-based nanoparticles by self-assembly method // Carbohyd Polym. 2011. V 84. № 2. P. 765–769. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.053

20. *Dutta P., Kumari A., Mahanta M.* Chitin-Chitosan – isolation, properties, and applications. IntechOpen, 2022. 152 p. https://doi.org/10.5772/intechopen.106502

21. *Hendrickson C., Garett H., Bunderson L.* Emerging Applications and Future Roles of Nanotechnologies in Agriculture // Agri Res. Tech.: Open Access J. 2017. V. 11. №. 1. P. 555–803. https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.11.555803

22. *Ing L.Y., Zin N.M., Sarwar A., Katas H.* Antifungal activity of chitosan nanoparticles and correlation with their physical properties // Int. J. Biomater. 2012. V. 1. P. 2–9. https://doi.org/10.1155/2012/632698

23. *Khairy A.M., Tohamy M.R., Zayed M.A. et al.* Eco-friendly application of nano-chitosan for controlling potato and tomato bacterial wilt // Saudi J. Biol. Sci. 2022. V. 29. № 4. P. 2199–2209. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.041

24. *Kheiri A., Jorf S.M., Malihipour A., Saremi H., Nikkhah M.* Application of chitosan and chitosan nanoparticles for the control of Fusarium head blight of wheat (*Fusarium graminearum*) *in vitro* and greenhouse // Int. J. Biol. Macromol. 2016. V. 93. P. 1261–1272. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.072

25. *Kumaraswamy R.V., Kumari S., Choudhary R.C., et al.* Characterization methods for chitosan-based nanomaterials // Int. J. Boil. Macromol. 2018. V. 113. P. 494–506. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12496-0_5

26. *Manikandan A., Sathiyabama M.* Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea* // Int. J. Biol. Macromol. 2016. V. 84. P. 58–61. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083

27. *Melo E., Aires-Barros M., Cabral J.* Reverse micelles and protein biotechnology // Biot. Ann. Review. 2001. V. 7. P. 87–129. https://doi.org/10.1016/S1387-2656(01)07034-X

28. *Nandhini R., Rajeswari E., Harish S. et al.* Role of chitosan nanoparticles in sustainable plant disease management // J. Nanopart. Res. 2025. V. 27. № 13. https://doi.org/10.1007/s11051-024-06203-z

29. *Ngan L.T.K., Wang S-L., Hiep Đ.M. et al.* Preparation of chitosan nanoparticles by spray drying, and their antibacterial activity // Res. Chem. Intermed. 2014. V. 40. P. 2165–2175. https://doi.org/10.1007/s11164-014-1594-9

30. Nugraheni P., Soeriyadi A., Ustadi U., Sediawan W., Wiratni W. Comparison of formulation methods to produce nano-chitosan as inhibitor agent for bacterial growth // J Engin Technoll Sci. 2019. V. 51. № 3. P. 430. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.3.9

31. *Oh J.-W., Chun Se.C., Chandrasekaran M.* Preparation and in vitro characterization of chitosan nanoparticles and their broad-spectrum antifungal action compared to antibacterial activities against phytopathogens of tomato // Agronomy. 2019. V. 9. № 2. P. 21–33. https://doi.org/10.3390/agronomy9010021

32. *Popova E.V., Domnina N.S., Zorin I.M. et al.* Nanostructured chitosan: synthesis technique and biological activity // Nanobiotechnology Reports. 2023. V. 18. № 2. P. 238–246. https://doi.org/10.1134/s2635167623700088

33. *Ramos-Enríquez J.R., Martínez-Téllez M.Á., Sánchez-Sánchez M., Hernández-Oñate M.Á., Quintana-Obregón E.A.* Chitosan-only nanoparticles against phytopathogenic fungi in the past decade (2013–2023) // Emirates Journal of Food and Agriculture. 2024. V. 36. P. 1–11. https://doi.org/10.3897/ejfa.2024.119832

34. *Roohallah S.R., Mozhgan G.V.* Unveiling methods to stimulate plant resistance against pathogens // Front. Biosci. (Landmark Ed). 2024. V. 29. №5. P 188. https://doi.org/10.31083/j.fbl2905188

35. *Saharan V., Mehrotra A., Khatik R. et al.* Synthesis of chitosan based nanoparticles and their *in vitro* evaluation against phytopathogenic fungi // Int. J. Biol. Macromol. 2013. V. 62. P. 677–683. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.10.012

36. *Sarkar A., Chakraborty N., Acharya K.* Chitosan nanoparticles mitigate *Alternaria* leaf spot disease of chilli in nitric oxide dependent way // Plant Physiol. Biochem. 2022. V. 180. P. 64–73. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.038

37. *Tokumitsu H., Ichikawa H., Fukumori Y.* Chitosan-gadopentetic acid complex nanoparticles for gadolinium neutron-capture therapy of cancer: preparation by novel emulsion-droplet coalescence technique and characterization // Pharm. Res. 2000. V. 16. P. 1830–1835. https://doi.org/10.1023/A:1018995124527

38. *Vlasov P.S., Kiselev A.A., Domnina N.S., Popova E.V., Tyuterev S.L.* Synthesis and biological activity of metal chitosan complexes // Rus. J. Appl. Chem. 2009. T. 89. № 9. C. 1675–1681. https://doi.org/10.1134/S1070427209090298

39. *Youssef K., Roberto S.R., de Oliveira A.G.* Ultra-structural alterations in *Botrytis cinerea* – the causal agent of gray mold – treated with salt solutions // Biomol. 2019. V. 9. № 10. P. 582. https://doi.org/10.3390/biom9100582

RERERENCES

1. Arkhipov M.V., Danilova T.A., Pavlyushin V.A. et al. Ways and possibilities of phytosanitary optimization of agroecosystems of the North-West region of Russia. *Bull. Plant Prot.,* 2017, vol. 2, no. 92, pp. 5–14. (In Russ.)

2. Varlamov V.P. Chitosan and its derivatives in biotechnology, agriculture and medicine. *Appl. Biochem. microb.*, 2022, vol. 58, no. 2, p. 107. (In Russ.) https://doi.org/10.31857/s0555109922020167

3. Karpun N.N., Yanushevskaya E.B., Mikhailova E.V. Mechanisms of formation of nonspecific induced immunity in plants under biogenic stress. *Agr. Biol.*, 2015, vol. 50, pp. 540–549. (In Russ.) https://doi.org/10.15389/agrobiology.2015.5.540rus

4. Kupreev N.I., Kuznetsov V.A. *Method for producing low-molecular chitosan nanoparticles.* 2011. Patent No. 2428432 (Russia). (In Russ.)

5. Milusheva R.Yu., Rashidova S.Sh. Bioactive properties of *Bombyx mori* nanochitosan. *High-molecular compound. Series C*, 2017, vol. 59, no. 1, p. 33. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S2308114717010058

6. Tyuterev S.L. Ecologically safe inducers of plant resistance to diseases and physiological stress. *Bull. Plant Prot.,* 2015, vol. 1, no. 83, pp. 3–13. (In Russ.)

7. Shafikova T.N., Omelichkina Yu.V. Molecular and genetic aspects of plant immunity to phytopathogenic bacteria and fungi. *Plant Physiol.*, 2015, vol. 62, no. 5, pp. 611–627. (In Russ.) https://doi.org/10.7868/S0015330315050140

8. Shcherban A.B. Chitosan and its derivatives as promising plant protection products. *Vavilov J Gen Breed.*, 2023, vol. 27, no. 8, pp. 1010-1021. (In Russ.) https://doi.org/10.18699/VJGB-23-11

9. Abdel-Aziz H., Hasaneen M.N., Omar A. Effect of foliar application of nano chitosan NPK fertilizer on the chemical composition of wheat grains. *Egyp. J Bot.,* 2018, vol. 58, no. 1, pp. 87–95. https://doi.org/10.21608/ejbo.2018.1907.1137

10. Abdel-Rahman F.A., Monir G.A., Hassan M.S. et al. Exogenously applied chitosan and chitosan nanoparticles improved apple fruit resistance to blue mold, upregulated defense-related genes expression, and maintained fruit quality. *Horticulturae*, 2021, vol. 7, no. 8, p. 224. https://doi.org/10.3390/horticulturae7080224

11. Abdeltwab W.M., Abdelaliem Y.F., Metry W.A., Eldeghedy M. Antimicrobial effect of chitosan and nano-chitosan against some pathogens and spoilage microorganisms. *J. Adv. Lab. Research Biol.*, 2019, vol. 10, no. 1, pp. 8–15.

12. Appu M., Muthukrishnan S. Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea*. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2016. vol. 84. pp. 58–61. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083

13. Bandara S., Du H., Carson L. et al. Agricultural and biomedical applications of chitosan-based nanomaterials. *Nanomaterials,* 2020, vol. 10, p. 1–32. https://doi.org/10.3390/nano10101903

14. Boruah S., Dutta P. Fungus mediated biogenic synthesis and characterization of chitosan nanoparticles and its combine effect with *Trichoderma asperellum* against *Fusarium oxysporum, Sclerotium rolfsii* and *Rhizoctonia solani. Ind Phytopathol.*, 2021, vol. 74, no 1, pp. 81–93. https://doi.org/10.1007/s42360-020-00289-w

15. Brooks D.R., Hoberg E.P., Boeger W.A., Trivellone V. Emerging infectious disease: An underappreciated area of strategic concern for food security. *Transb. Emer. Dis.*, 2022, vol. 69. pp. 254–267. https://doi.org/10.1111/tbed.14009

16. Brzozowski L, Mazourek M. A sustainable agricultural future relies on the transition to organic agroecological pest management. *Sustainability*. 2018. V. 10. № 2023. P. 1–25. https://doi.org/10.3390/su10062023

17. Calvo P., Remunan-Lopez C., Vila-Jato J.L., Alonso M. Novel hydrophilic chitosan-polyethylene oxide nanoparticles as protein carriers. *J. Appl. Polym. Sci.,* 1997, vol. 63, pp. 125–132.

18. Choudhary S., Joshi A., Saharan V. Assessment of Cu-Chitosan Nanoparticles for its antibacterial activity against *Pseudomonas syringae* pv. *Glycinea*. *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.*, 2017, vol. 6, no. 11, pp. 1335–1350. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.611.160

19. Chuang C.-Y., Don T.-M., Chiu W.-Y. Preparation of environmental-responsive chitosan-based nanoparticles by self-assembly method. *Carbohyd Polym*., 2011, vol. 84, no. 2, pp. 765–769. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.01.053

20. Dutta P., Kumari A., Mahanta M. *Chitin-Chitosan – Isolation, Properties, and Applications*. IntechOpen, 2022, 152 p. https://doi.org/10.5772/intechopen.106502

21. Hendrickson C., Garett H., Bunderson L. Emerging Applications and Future Roles of Nanotechnologies in Agriculture. *Agric. Res. Tech.*., 2017, vol. 11, no. 1, pp. 555–803. https://doi.org/10.19080/ARTOAJ.2017.11.555803

22. Ing L.Y., Zin N.M., Sarwar A., Katas H. Antifungal activity of chitosan nanoparticles and correlation with their physical properties. *Int. J. Biomater.* 2012, vol. 1, pp. 2–9. https://doi.org/10.1155/2012/632698

23. Khairy A.M., Tohamy M.R., Zayed M.A. et al. Eco-friendly application of nano-chitosan for controlling potato and tomato bacterial wilt. *Saudi J. Biol. Sci.*, 2022. vol. 29, no. 4, pp. 2199–2209. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.11.041

24. Kheiri A., Jorf S.M., Malihipour A., Saremi H., Nikkhah M. Application of chitosan and chitosan nanoparticles for the control of Fusarium head blight of wheat (*Fusarium graminearum*) *in vitro* and greenhouse. *Int. J. Biol. Macromol.* 2016, vol. 93, pp. 1261–1272. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.072

25. Kumaraswamy R.V., Kumari S., Choudhary R.C. et al. Characterization methods for chitosan-based nanomaterials. *Int. J. Boil. Macromol.*, 2018, vol. 113, pp. 494–506. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12496-0_5

26. Manikandan A., Sathiyabama M. Preparation of chitosan nanoparticles and its effect on detached rice leaves infected with *Pyricularia grisea*. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2016, vol. 84, pp. 58–61. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.11.083

27. Melo E., Aires-Barros M., Cabral J. Reverse micelles and protein biotechnology. *Biot. Ann. Review,*. 2001, vol. 7, pp. 87–129. https://doi.org/10.1016/S1387-2656(01)07034-X

28. Nandhini R., Rajeswari E., Harish S. et al. Role of chitosan nanoparticles in sustainable plant disease management. *J. Nanopart. Res.*, 2025, vol. 27, no. 13. https://doi.org/10.1007/s11051-024-06203-z

29. Ngan L.T.K., Wang S-L., Hiep Đ.M. et al. Preparation of chitosan nanoparticles by spray drying, and their antibacterial activity. *Res. Chem. Intermed.,* 2014, vol. 40, pp. 2165–2175. https://doi.org/10.1007/s11164-014-1594-9

30. Nugraheni P., Soeriyadi A., Ustadi U., Sediawan W., Wiratni W. Comparison of formulation methods to produce nano-chitosan as inhibitor agent for bacterial growth. *J En. Tech. Sci*., 2019, vol. 51, no. 3, p. 430. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.3.9

31. Oh J.-W., Chun Se.C., Chandrasekaran M. Preparation and in vitro characterization of chitosan nanoparticles and their broad-spectrum antifungal action compared to antibacterial activities against phytopathogens of tomato. *Agronomy*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 21–33. https://doi.org/10.3390/agronomy9010021

32. Popova E.V., Domnina N.S., Zorin I.M. et al. Nanostructured chitosan: synthesis technique and biological activity**.** *Nanobiotech. Rep,* 2023, vol. 18, no. 2, pp. 238–246. https://doi.org/10.1134/s2635167623700088

33. Ramos-Enríquez J. R., Martínez-Téllez M. Á., Sánchez-Sánchez M., Hernández-Oñate M. Á., Quintana-Obregón E.A. Chitosan-only nanoparticles against phytopathogenic fungi in the past decade (2013–2023). *Emirates J Food Agricul.*, 2024, vol. 36, pp. 1–11. https://doi.org/10.3897/ejfa.2024.119832

34. Roohallah S.R., Mozhgan G.V. Unveiling methods to stimulate plant resistance against pathogens. *Front. Biosci. (Landmark Ed),* 2024, vol. 29, no. 5, pp.188. https://doi.org/10.31083/j.fbl2905188

35. Saharan V., Mehrotra A., Khatik R. et al. Synthesis of chitosan based nanoparticles and their *in vitro* evaluation against phytopathogenic fungi. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2013, vol. 62, pp. 677–683. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.10.012

36. Sarkar A., Chakraborty N., Acharya K. Chitosan nanoparticles mitigate *Alternaria* leaf spot disease of chilli in nitric oxide dependent way. *Plant Physiol. Biochem*., 2022, vol. 180, pp. 64–73. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2022.03.038

37. Tokumitsu H., Ichikawa H., Fukumori Y. Chitosan-gadopentetic acid complex nanoparticles for gadolinium neutron-capture therapy of cancer: preparation by novel emulsion-droplet coalescence technique and characterization. *Pharm. Res.*, 2000, vol. 16, pp. 1830–1835. https://doi.org/10.1023/A:1018995124527

38. Vlasov P.S., Kiselev A.A., Domnina N.S., Popova E.V., Tyuterev S.L. Synthesis and biological activity of metal chitosan complexes. *Rus. J Appl. Chem.,* 2009, vol. 89, no. 9, pp. 1675–1681. https://doi.org/10.1134/S1070427209090298

39. Youssef K., Roberto S.R., de Oliveira A.G. Ultra-structural alterations in *Botrytis cinerea* – the causal agent of gray mold – treated with salt solutions. *Biomol.,* 2019, vol. 9, no. 10, p. 582. https://doi.org/10.3390/biom9100582

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Попова Эльза Викторовна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаб. микробиологической защиты растений ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений, Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: elzavpopova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3165-6777

Домнина Нина Семеновна — кандидат химических наук, доцент Института химии Петербургского государственного университета, Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: ninadomnina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7124-899X

Новикова Ирина Игоревна — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаб. микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР, Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: irina_novikova@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2816-2151

Коваленко Надежда Михайловна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, лаб. иммунитета растений к болезням ФГБНУ ВИЗР, Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: nadyakov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9577-8816

Краснобаева Ирина Леонтьевна — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаб. микробиологической защиты растений ФГБНУ ВИЗР, Санкт-Петербург, Российская Федерация
E-mail: krasnobaeva08@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9166-4475

Поступила в редакцию 20.06.2025
После доработки 26.08.2025
Принята к публикации 07.12.2025

ABOUT THE AUTHORS

Popova, Elza V. — Cand. Sc. (Biology), Senior Research Officer, Lab. of Microbiological Plant Protection, All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: elzavpopova@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-3165-6777

Domnina, Nina S. — Cand. Sc. (Chemistry), Associate Professor, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: ninadomnina@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-7124-899X

Novikova, Irina I. — Ph.D. (Biology), Head Scientist Researcher, Lab. of Microbiological Plant Protection All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: irina_novikova@inbox.ru
https://orcid.org/0000-0003-2816-2151

Kovalenko, Nadezhda M. — Cand. Sc. (Biology), Senior Research Officer, Lab. of immunity of plants to diseases All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: nadyakov@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9577-8816

Krasnobaeva, Irina L. — Cand. Sc. (Biology), Senior Research Officer, Lab. of Microbiological Plant Protection All-Russian Research Institute of Plant Protection, St. Petersburg, Russian Federation
E-mail: krasnobaeva08@mail.ru
https://orcid.org/0000-0001-9166-4475

Received June 20, 2025
Revised August 26, 2025
Accepted December 07, 2025