

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40>

ВОЗДЕЙСТВИЕ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ФИТОПАТОГЕННЫЕ ГРИБЫ
P. BIPOLARIS

Научная статья

Хижняк С.В.¹, Хартов С.В.², Коротченко И.С.³, Чирков Д.Ю.⁴, Первышина Г.Г.^{5,*}, Симунин М.М.⁶

¹ORCID : 0000-0003-2583-8857;

³ORCID : 0000-0002-9099-9537;

⁵ORCID : 0000-0001-5880-5395;

^{1,3}Красноярский государственный аграрный университет, Красноярск, Российская Федерация

^{2,4,6}Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук, Красноярск, Российская Федерация

⁴ООО «Наносинтез», Красноярск, Российская Федерация

⁵Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (gpervyshina[at]sfu-kras.ru)

Аннотация

Рассмотрено влияние коллоидного раствора наночастиц серебра (НЧ Ag) на фитопатогенный гриб *Bipolaris sorokiniana*, выделенный из почв Красноярского края. Коллоидный раствор НЧ в концентрациях 50 и 25% от исходного раствора статистически значимо ($p < 0,001$) подавляет прорастание конидий *B. sorokiniana* и статистически значимо ($p < 0,05$) снижает максимальную длину проростковой гифы в диапазоне концентраций от 6,25 до 50% от исходного раствора. Влияние на среднюю длину проростковой гифы варьируется от снижения в 1,7 раз относительно контроля в концентрации 50% от исходного раствора, до увеличения в 1,3 раза относительно контроля при использовании НЧ в концентрации 6,25% от исходного раствора. Все зафиксированные эффекты носят нелинейный характер, что предположительно связано с наличием в растворе НЧ разного размерного класса. Проведено исследование влияния НЧ на прорастание конидий после 2,5 мес. хранения раствора, которое показало, что антигрибная активность раствора НЧ сохраняется. Так, обнаружено статистически значимое снижение прорастания конидий *B. sorokiniana* в 1,5 раза относительно контроля для концентрации 50% от исходного раствора. В присутствии НЧ в области концентраций 6,25–3,125% от исходного раствора отмечено аномальное прорастание конидий *B. sorokiniana*. В целом следует отметить перспективность дальнейшего изучения как фунгистатических, так и рост-стимулирующих эффектов НЧ с научной и практической точек зрения.

Ключевые слова: наночастицы серебра, антигрибная активность, фитопатогенный гриб *Bipolaris sorokiniana*, почвы Красноярского края, охрана почв.

INFLUENCE OF COLLOIDAL SILVER NANOPARTICLE SOLUTION ON PHYTOPATHOGENIC FUNGI *P. BIPOLARIS*

Research article

Khizhnyak S.V.¹, Khartov S.V.², Korotchenko I.S.³, Chirkov D.Y.⁴, Pervishina G.G.^{5,*}, Simunin M.M.⁶

¹ORCID : 0000-0003-2583-8857;

³ORCID : 0000-0002-9099-9537;

⁵ORCID : 0000-0001-5880-5395;

^{1,3}Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russian Federation

^{2,4,6}Krasnoyarsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁴Nanosintez LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵Siberian Federal university, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (gpervyshina[at]sfu-kras.ru)

Abstract

The influence of colloidal solution of silver nanoparticles (NP Ag) on the phytopathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana* isolated from soils of Krasnoyarsk Krai was examined. The colloidal solution of NPs at concentrations of 50 and 25% of the initial solution significantly ($p < 0.001$) suppresses germination of conidia of *B. sorokiniana* and significantly ($p < 0.05$) reduces the maximum length of germination hyphae statistically in the concentration range from 6.25 to 50% of the initial solution. The effect on the average length of seedling hyphae varies from a decrease of 1.7 times relative to the control at a concentration of 50% of the initial solution, to an increase of 1.3 times relative to the control when using NP at a concentration of 6.25% of the initial solution. All recorded effects are nonlinear in nature, which is presumably associated with the presence of particles of different size class in the solution. The study of the effect of NP on germination of conidia after 2.5 months of storage of the solution was carried out, which showed that the antifungal activity of NP solution is preserved. Thus, a statistically significant decrease in germination of conidia of *B. sorokiniana* by 1.5 times relative to the control was found for the concentration of 50% of the initial solution. Abnormal germination of *B. sorokiniana* conidia was observed in the presence

of NP in the concentration range of 6.25-3.125% of the initial solution. In general, it should be noted that it is promising to further study both fungistatic and growth-stimulating effects of NPs from scientific and practical points of view.

Keywords: silver nanoparticles, antifungal activity, phytopathogenic fungus *Bipolaris sorokiniana*, Krasnoyarsk Krai soils, soil conservation.

Введение

Возбудитель обыкновенной корневой гнили зерновых фитопатогенный гриб *Bipolaris sorokiniana* является одним из распространенных возбудителей корневых гнилей, листовой пятнистости и «черного зародыша» зерновых культур во всех основных зернопроизводящих регионах мира [1], [2]. Наибольший вред от данного фитопатогена отмечается в Казахстане, Западной и Восточной Сибири, на Дальнем Востоке, в Алтайском крае, восточной части Саратовской области, в Куйбышевской области. За рубежом – в Австралии, Канаде, США [3], [4].

До настоящего времени основным методом борьбы с вызываемыми *B. sorokiniana* обыкновенной корневой гнилью зерновых и «черным зародышем» являлся химический метод, заключающийся в протравливании семенного материала фунгицидами. Однако в последние десятилетия наблюдается повсеместное распространение резистентных к фунгицидам штаммов фитопатогенных грибов [5]. Это делает актуальным поиск альтернативных методов борьбы с возбудителями болезней растений [6], [7]. Одним из перспективных направлений в защите растений от болезней в настоящее время рассматривается использование наноматериалов, особенно наночастиц серебра (НЧ Ag).

Цель работы – изучить влияние коллоидного раствора НЧ Ag на фитопатогенный гриб *Bipolaris sorokiniana*.

Методы и принципы исследования

Объектом исследования служил коллоидный раствор (золь) НЧ Ag, изготовленный Отделом молекулярной электроники Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ОМЭ ФИЦ КНЦ СО РАН). Коллоидный раствор (золь) НЧ Ag при комнатной температуре в темном месте стабилен в течение 1 года.

По данным разработчиков, содержание серебра в растворе составляет 50 мг/л. Основная доля наночастиц имеет размеры от 4 до 12 нм, хотя встречаются отдельные частицы размером до 25 нм, а также агрегаты наночастиц (рис. 1).

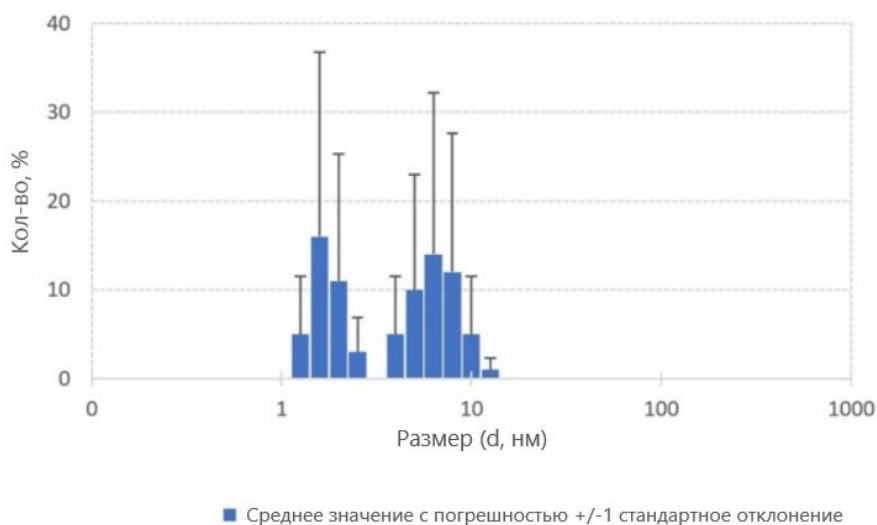


Рисунок 1 - Гистограмма распределения наночастиц серебра по размерам
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40.1>

В качестве тест-культуры для проверки биологических свойств исследуемого коллоидного раствора НЧ Ag (разбавляли непосредственно перед применением) использовали моноконидиальный изолят возбудителя обыкновенной корневой гнили зерновых *B. sorokiniana*, выделенный из поражённой корневой гнилью пшеницы, выращенной в учебно-научном комплексе (УНПК) «Борский» (56°26'15" с. ш. 92°54'11" в. д.) ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ.

Проверку фунгицидных свойств препарата проводили с помощью теста, основанного на прорастании конидий [8].

Для получения конидий гриб выращивали в течение 14 сут. при $25 \pm 1^\circ\text{C}$ на агаризованной среде Чапека-Докса следующего состава (г/л): сахара – 20,0 г/л; нитрат натрия – 2,0 г/л; фосфат калия двузамещенный – 1,0 г/л; сульфат магния – 0,5 г/л; хлорид калия – 0,5 г/л; сульфат железа – 0,01 г/л; агар – 20,0 г/л; pH $7,3 \pm 0,2$. В качестве индуктора прорастания конидий использовали сахарозу [9]. Эксперименты проводили в плашке для иммуноферментного анализа.

В ячейки с помощью микропипет-дозатора вносили по 20 мкл суспензии конидий в смеси с разными концентрациями раствора наночастиц, после чего инкубировали во влажной камере при температуре 26°C в течение 6 часов. По окончании инкубирования подсчитывали число проросших и непроросших конидий, а также измеряли длину проростковых гиф. Подсчёт проросших и непроросших конидий, а также измерение длины проростковых гиф проводили по микрофотографиям набора полей зрения. Микрофотографии выполняли с помощью микроскопа

Микмед-6 вар. 3, оснащённого цифровой USB-камерой DCM-13E. Измерение гиф выполняли с помощью распространяемой без лицензионных ограничений в качестве общественного достояния программы ImageJ, разработанной сотрудниками National Institutes of Health Департамента здравоохранения Соединённых Штатов Америки.

Первоначальный эксперимент выполняли со свежеприготовленным коллоидным раствором наночастиц серебра. Для проверки стабильности биологических свойств исследуемого раствора был проведён повторный эксперимент с тем же образцом раствора после 2,5 месяца его хранения в закрытой таре в темноте при комнатной температуре. В первом эксперименте набор концентраций наночастиц получали последовательным разведением исходного раствора в 2, 4, 8 и 16 раз. Во втором эксперименте, с целью уточнения кривой «доза-эффект» на малых концентрациях – последовательным разведением в 2, 4, 8, 16, 32, 64 и 128 раз Контролем служила суспензия конидий без добавления наночастиц.

Статистическую обработку данных проводили с использованием программы Statistica (версия 6, Statsoft) и MS Excel 2007 для Windows.

Основные результаты

Прорастание конидий в контроле после 6 ч инкубирования составило 30,8%. Прорастание в коллоидном растворе НЧ Ag в диапазоне концентраций от 12,5 до 50% от исходного раствора было ниже, чем в контроле, хотя статистическая значимость эффекта доказана только для концентраций 25 и 50 % (табл. 1).

Таблица 1 - Прорастание конидий *B. sorokiniana* в присутствии НЧ Ag

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40.2>

Концентрация раствора, % от исходной	Число конидий			Прорастание, %	Значимость различий с контролем, P	
	Проросших	Непроросших	Всего		Двустороннее	Одностороннее
0 (контроль)	37	83	120	30,8	-	-
50	6	54	60	10,0	0,0016	0,0012
25	13	83	96	13,5	0,0033	0,0020
12,5	12	49	61	19,7	0,1161	0,0761
6,25	56	108	164	34,1	0,6094	0,3236

Кроме прорастания конидий, НЧ Ag оказали ингибирующее влияние на рост проростковых гиф *B. sorokiniana* (рис. 2).



Рисунок 2 - Характерный размер проростковых гиф *B. sorokiniana* после 6 часов инкубирования в контроле (1) и в присутствии наночастиц серебра в концентрации 50% от исходной (2)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40.3>

Примечание: конидии обозначены жёлтыми точками, проростковые гифы – стрелками

Обсуждение

Дисперсионный анализ подтвердил статистическую значимость влияния НЧ Ag на рост проростковых гиф на уровне $p < 0,05$ с показателем силы влияния 10,7%. Ингибирующий эффект наночастиц на рост проростковых гиф проявился в концентрациях 50 и 12,5%. С учётом того, что в растворе присутствуют частицы разного размера, можно предположить, что эти эффекты обусловлены действием частиц разного размерного класса.

Кроме этого, НЧ Ag оказали негативное влияние на максимальную длину проростковых гиф, в том числе – в минимальной изученной концентрации. В первом приближении эффект описывается линейным уравнением (коэффициент детерминации $R^2 = 0,793$, коэффициент корреляции $r = -0,891$, статистическая значимость регрессии $p < 0,05$), однако зависимость максимальной длины от концентрации наночастиц носит ярко выраженный нелинейный характер.

Можно предположить, что нелинейный характер эффекта, как и в случае средней длины проростковых гиф, связан с наличием в растворе наночастиц разного размерного класса с разными кривыми доза-эффект. В таком случае наблюдаемая зависимость является результатом наложения двух дозовых кривых.

Кроме влияния на среднюю и максимальную длину проростковых гиф, наночастицы серебра снизили такие показатели варьирования, как коэффициенты вариации и осцилляции. Особенно ярко эффект проявился в отношении коэффициента осцилляции.

Одной из важных проблем при использовании коллоидных растворов наночастиц является изменение их свойств в процессе хранения – как за счёт агрегации частиц, так и за их счёт окисления [10].

В этой связи нами было проведено изучение влияния исследуемых НЧ Ag на прорастание конидий после 2,5 мес. хранения. Установлено, что прорастание конидий в контроле составило в среднем 51,3%. Прорастание в вариантах с НЧ Ag варьировало от 34,8% (при разведении исходного раствора наночастиц в 2 раза) до 58,0% (при разведении исходного раствора в 128 раз). Статистическая значимость влияния НЧ Ag длительного хранения на прорастание конидий *B. sorokiniana* доказана только для концентрации 50% от исходного раствора. Это влияние проявилось в снижении прорастания конидий в 1,5 раза относительно контроля. На этой же концентрации отмечено статистически значимое ($p < 0,05$) ингибирование роста проростковых гиф в сравнении с контрольными вариантами.

Следует отметить, что отсутствие статистической значимости эффекта не означает отсутствия эффекта. Отсутствие статистической значимости означает лишь то, что эффект при использовании данного конкретного статистического теста не доказан. Для уточнения наличия эффектов наночастиц были построены кривые «доза-эффект» (рис. 3).

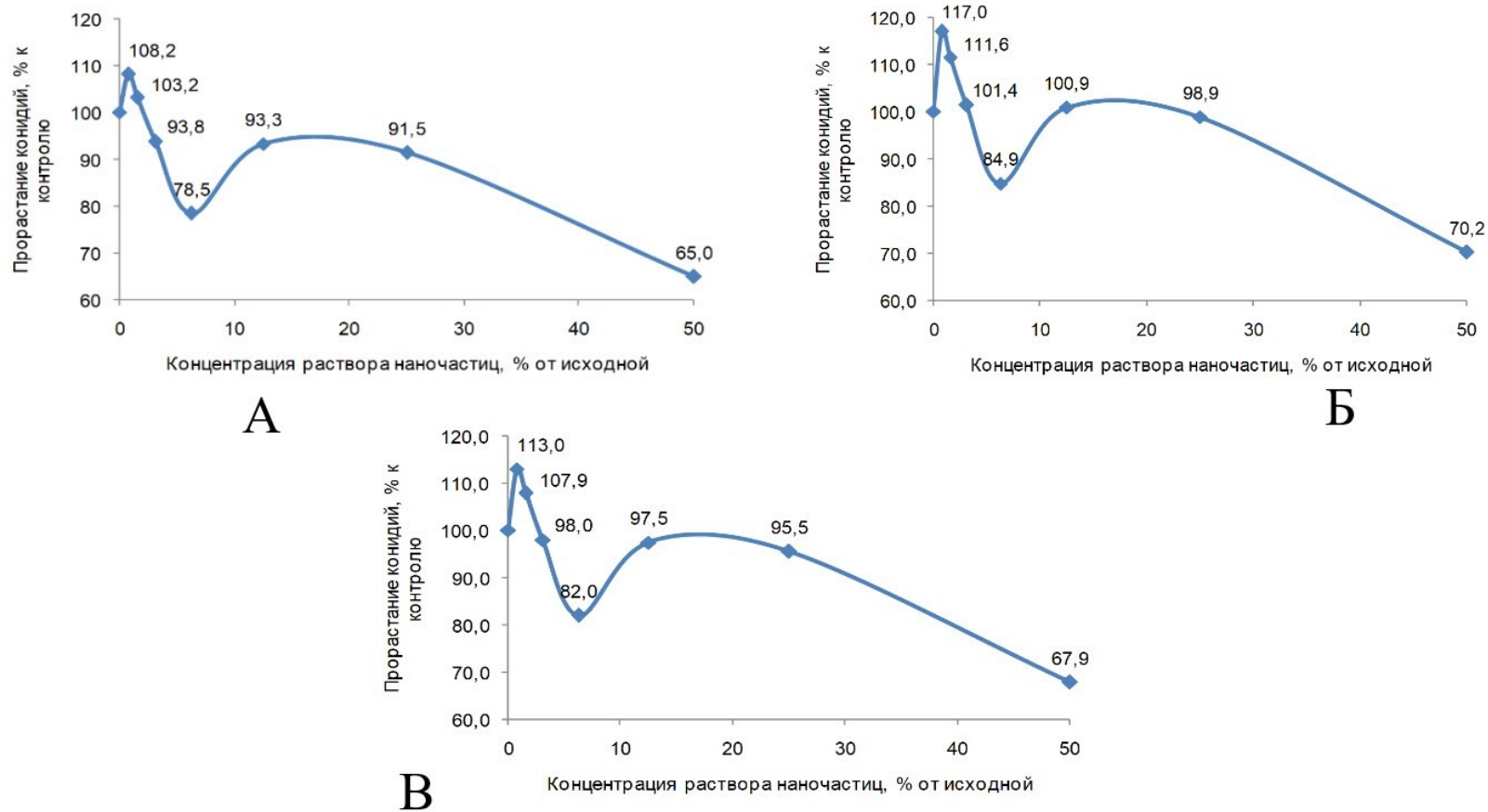


Рисунок 3 - Прорастание конидий в разных вариантах эксперимента:

А – к «Контролю 1» (контроль с 1 % сахарозы); Б – к «Контролю 2» (контроль с 2 % сахарозы); В – к «Контролю 1+2» (контроль, составленный из объединённых данных «Контроля 1» и «Контроля 2»)

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40.4>

При анализе полученных кривых обращает на себя внимание явно двувёршинный характер зависимости прорастания конидий от концентрации наночастиц. Возможно, что биологический эффект исследуемого коллоидного раствора обусловлен частицами разных (как минимум – двух) размерных классов, для каждого из которых характерна своя кривая «доза-эффект», а наблюдаемая зависимость является наложением этих кривых.

С учётом этого предположения, для проведения регрессионного анализа кривая «доза-эффект» была разбита на два диапазона: диапазон концентраций частиц от 0,78125 до 6,25% от исходного раствора, и диапазон концентраций от 6,25% до 50% от исходного раствора.

В диапазоне от 0,78125% до 6,25% зависимость прорастания конидий от концентрации частиц носит экспоненциальный характер с нисходящим трендом.

Экспериментальные и теоретические значения прорастания конидий *B. sorokiniana* в присутствии НЧ Ag длительного хранения в диапазоне концентраций от 6,25 до 50% от исходного раствора; теоретические значения рассчитаны по уравнению; точка с концентрацией 0 % введена путём экстраполяции:

$$Y = Y_{\max} \frac{X}{Kx + X + \frac{X^4}{Ki}} + b \quad (1)$$

В присутствии наночастиц в области концентраций 6,25 – 3,125% от исходного раствора отмечено anomальное прорастание конидий *B. sorokiniana* в виде «пузырьков», образующихся вместо нормальной проростковой гифы (рис. 4, слева). В ряде случаев подобные структуры имели многоклеточное строение (рис. 4, справа). Можно предположить, что подобные аномалии связаны с действием исследуемых наночастиц, хотя наличие эффекта и его механизмы нуждаются в дальнейшем изучении.

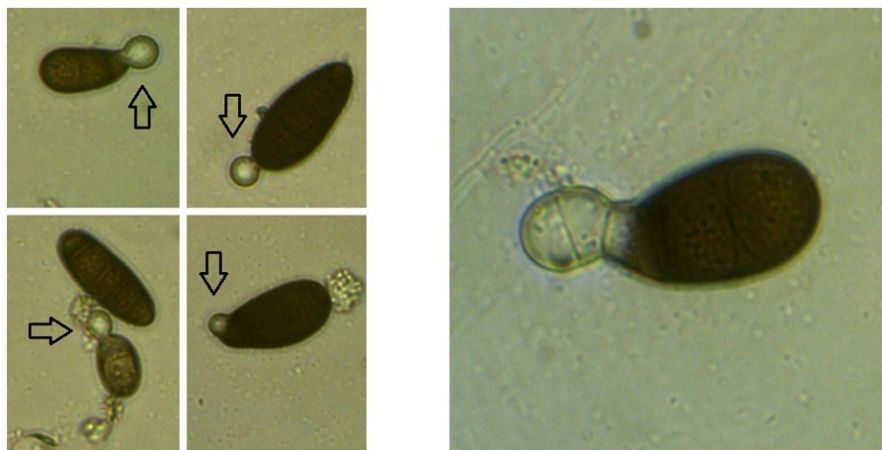


Рисунок 4 - Аномальное прорастание конидий *B. sorokiniana* в присутствии НЧ Ag длительного хранения в концентрации 6,25% от исходного раствора

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.150.40.5>

Примечание: аномальные структуры в виде «пузырьков» показаны стрелками

Таким образом, можно констатировать, что исследуемый коллоидный раствор НЧ Ag обладает ярко выраженной биологической активностью в отношении возбудителя обыкновенной корневой гнили зерновых *B. sorokiniana*. В высоких концентрациях эта активность проявляется в виде ингибирования прорастания конидий и роста проростковых гиф. В малых концентрациях отмечается небольшой стимулирующий эффект.

Заключение

Исследуемые наночастицы в концентрациях 50 и 25% от исходного раствора, что соответствует 25 и 12,5 мг/л серебра, статистически значимо ($p < 0,01$) ингибируют прорастание конидий соответственно в 3,1 и 2,3 раза относительно контроля.

НЧ Ag в диапазоне концентраций от 6,25% до 50% от исходной концентрации статистически значимо ($p < 0,05$) снижают максимальную длину проростковой гифы. Наночастицы статистически значимо ($p < 0,05$) влияют на среднюю длину проростковой гифы. Это влияние варьирует от снижения средней длины проростковых гиф в 1,7 раз относительно контроля при использовании наночастиц в концентрации 50% от исходного раствора, до увеличения средней длины проростковых гиф в 1,3 раза относительно контроля при использовании наночастиц в концентрации 6,25% от исходного раствора.

Антигрибная активность НЧ Ag сохраняется при хранении в течение 2,5 месяцев, хотя и несколько ослабевает. После хранения раствора статистически значимое ($p < 0,01$) ингибирование прорастания конидий (в 1,5 раза относительно контроля) сохраняется для концентрации 50% от исходной.

Экспериментальные кривые, описывающие зависимость прорастания конидий и рост проростковых гиф от концентрации наночастиц, носят ярко выраженный нелинейный характер. Анализ этих кривых позволяет с высокой степенью уверенности предположить, что биологические свойства исследуемого раствора обусловлены суммированием независимых эффектов наночастиц как минимум двух размерных классов, для каждого из которых характерна своя дозовая кривая.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Хижняк С.В. Чувствительность *Bipolaris sorokiniana* к фунгицидам «Иншур Перформ» и «Виал Трио» / С.В. Хижняк, И.С. Коротченко, О.В. Романова [и др.] // Вестник КрасГАУ. — 2023. — № 10. — С. 152–159.
2. Постовалов А.А. Роль минеральных удобрений и предпосевной обработки семян препаратами в ограничении развития корневой гнили ячменя ярового / А.А. Постовалов, С.Ф. Суханова // Вестник Курганской ГСХА. — 2024. — № 3 (51). — С. 19–27.
3. Ghazvini H. Molecular diversity in the barley pathogen *Bipolaris sorokiniana* (*Cochliobolus sativus*) / H. Ghazvini, A. Tekauz // Australasian Plant Pathology. — 2012. — № 41. — P. 283–293.
4. Григорьев М.Ф. Изучение патогенных комплексов возбудителей наиболее распространенных типов корневых гнилей зерновых культур в Центральном нечерноземье России / М.Ф. Григорьев // Известия ТСХА. — 2012. — № 2. — С. 111–125.
5. Deising H.B. Mechanisms and significance of fungicide resistance / H.B. Deising, S. Reimann, S.F. Pascholati // Brazilian Journal of Microbiology. — 2008. — № 39 (2). — P. 286–295.
6. Hollomon D.W. Fungicide resistance: facing the challenge – a review / D.W. Hollomon // Plant Protect. Sci. — 2015. — № 51. — P. 170–176.
7. Моисеев С.А. Влияние протравителей Виал Трио, ВСК и Табу, ВСК на вредные объекты в посевах ярового ячменя / С.А. Моисеев, Е.А. Рябкин, В.И. Каргин [и др.] // Тенденции развития науки и образования. — 2021. — № 79. — С. 146–148.
8. Хижняк С.В. Экспресс-метод выявления штаммов-антагонистов для биологической защиты растений от фитопатогенных грибов / С.В. Хижняк, Е.П. Пучкова, С.А. Петрушкина // Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса России: Материалы Национальной научно-практической конференции 2019 г. — Рязань: Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета, 2019. — С. 590–594.
9. Хижняк С.В. Фитосанитарные свойства почвоподобного субстрата / С.В. Хижняк, Н.С. Мануковский // Вестник КрасГАУ. — 2016. — № 11. — С. 90–96.
10. Мацкевич Е.П. Особенности агрегации наночастиц серебра в коллоидных растворах, синтезированных боргидридным методом / Е.П. Мацкевич, С.Л. Прокопьев // Вестник БГУ. Сер. 1. — 2012. — № 2. — С. 52–56.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Hizhnjak S.V. Chuvstvitel'nost' *Bipolaris sorokiniana* k fungitsidam «Inshur Perform» i «Vial Trio» [Sensitivity of *Bipolaris sorokiniana* to the fungicides “Inshur Perform” and “Vial Trio”] / S.V. Hizhnjak, I.S. Korotchenko, O.V. Romanova [et al.] // Bulletin of KrasSAU. — 2023. — № 10. — P. 152–159. [in Russian]
2. Postovalov A.A. Rol' mineral'nyh udobrenij i predposevnoj obrabotki semjan preparatami v ogranichenii razvitija kornevoj gnili jachmenja jarovogo [The role of mineral fertilizers and pre-sowing seed treatment with drugs in limiting the development of root rot of spring barley] / A.A. Postovalov, S.F. Suhanova // Bulletin of the Kurgan State Agricultural Academy. — 2024. — № 3 (51). — P. 19–27. [in Russian]
3. Ghazvini H. Molecular diversity in the barley pathogen *Bipolaris sorokiniana* (*Cochliobolus sativus*) / H. Ghazvini, A. Tekauz // Australasian Plant Pathology. — 2012. — № 41. — P. 283–293.
4. Grigor'ev M.F. Izuchenie patogennyh kompleksov vozбудitelej naibolee rasprostranennyh tipov kornevyh gnilej zernovyh kul'tur v Tsentral'nom nechernozem'e Rossii [Study of pathogenic complexes of pathogens of the most common types of root rots of grain crops in the Central non-chernozem region of Russia] / M.F. Grigor'ev // News of TSHA. — 2012. — № 2. — P. 111–125. [in Russian]
5. Deising H.B. Mechanisms and significance of fungicide resistance / H.B. Deising, S. Reimann, S.F. Pascholati // Brazilian Journal of Microbiology. — 2008. — № 39 (2). — P. 286–295.
6. Hollomon D.W. Fungicide resistance: facing the challenge – a review / D.W. Hollomon // Plant Protect. Sci. — 2015. — № 51. — P. 170–176.
7. Moiseev S.A. Vlijanie protravitelej Vial Trio, VSK i Tabu, VSK na vrednye ob'ekty v posevah jarovogo jachmenja [Effect of disinfectants Vial Trio, VSK and Tabu, VSK on harmful objects in spring barley crops] / S.A. Moiseev, E.A.

Rjabkin, V.I. Kargin [et al.] // Trends in the Development of Science and Education. — 2021. — № 79. — P. 146–148. [in Russian]

8. Hizhnjak S.V.. Ekspress-metod vyjavlenija shtammov-antagonistov dlja biologicheskoj zaschity rastenij ot fitopatogennyh gribov [Express method for identifying antagonist strains for biological protection of plants from phytopathogenic fungi] / S.V. Hizhnjak, E.P. Puchkova, S.A. Petrushkina // Priority directions of scientific and technological development of the agro-industrial complex of Russia: Materials of the National Scientific and Practical Conference 2019. — Ryazan: Publishing House of the Ryazan State Agrotechnological University, 2019. — p. 590–594. [in Russian]

9. Hizhnjak S.V. Fitosanitarnye svojstva pochvopodobnogo substrata [Phytosanitary properties of soil-like substrate] / S.V. Hizhnjak, N.S. Manukovskij // Bulletin of KrasSAU. — 2016. — № 11. — P. 90–96. [in Russian]

10. Matskevich E.P. Osobennosti agregatsii nanochastits serebra v kolloidnyh rastvorah, sintezirovannyh borgidridnym metodom [Features of aggregation of silver nanoparticles in colloidal solutions synthesized by the borohydride method] / E.P. Matskevich, S.L. Prokop'ev // Bulletin of BSU. Ser. 1. — 2012. — № 2. — P. 52–56. [in Russian]