

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12>

**ВЛИЯНИЕ КОЛЛОИДНОГО РАСТВОРА НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА ПОЧВЕННЫЕ ФИТОПАТОГЕННЫЕ
ГРИБЫ НА ПРИМЕРЕ *FUSARIUM SP.***

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

⁴ ООО «Наносинтез», Красноярск, Российская Федерация

⁵ Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

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

Аннотация

В работе дан анализ влияния различных концентрации коллоидного раствора наночастиц серебра на фитопатогенные грибы р. *Fusarium* на примере изолята *F. solani*, выделенного из корней поражённой фузариозом сои. Наночастицы в концентрациях 50%, 25% и 12,5% от исходного раствора статистически значимо снижают среднюю длину гиф *F. solani*. Максимальное снижение длины гиф (в 6 раз относительно контроля) наблюдается при концентрации частиц 50% от исходного раствора. Минимальное снижение (в 1,5 раза относительно контроля) наблюдается при концентрации частиц 12,5% от исходного раствора. Изученные наночастицы снижают максимальную длину гиф в диапазоне от 50% до 3,125% от исходного раствора. Отмечена перспективность дальнейшего изучения как фунгистатических, так и рост-стимулирующих эффектов исследованных наночастиц с научной и практической точек зрения.

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

**INFLUENCE OF COLLOIDAL SILVER NANOPARTICLE SOLUTION ON SOIL PHYTOPATHOGENIC FUNGI
ON THE EXAMPLE OF *FUSARIUM SP.***

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

⁴ Nanosintez LLC, Krasnoyarsk, Russian Federation

⁵ Siberian Federal university, Krasnoyarsk, Russian Federation

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

Abstract

The work analyses the effect of different concentrations of colloidal solution of silver nanoparticles on phytopathogenic fungi of *Fusarium* p. on the example of *F. solani* isolate extracted from roots of *Fusarium*-infected soybean. Nanoparticles in concentrations of 50%, 25% and 12,5% of the initial solution statistically significantly reduced the average length of hyphae of *F. solani*. The maximum reduction in hyphae length (6 times relative to the control) was observed at a particle concentration of 50% of the stock solution. The minimum reduction (1,5 times relative to control) was observed at particle concentration of 12,5% of the initial solution. The studied nanoparticles reduce the maximum length of hyphae in the range from 50% to 3,125% of the initial solution. The prospect of further study of both fungistatic and growth-stimulating effects of the studied nanoparticles from scientific and practical points of view was noted.

Keywords: silver nanoparticles, antifungal activity, phytopathogenic fungus *Fusarium sp.*, soils of Krasnoyarsk Krai, soil conservation.

Введение

На территории Красноярского края одним из наиболее распространенных возбудителей заболеваний растений являются грибы рода *Fusarium*, включающих большое количество видов. Круг растений-хозяев у грибов р. *Fusarium* исключительно широк, они способны поражать как однодольные, так и двудольные растения, представленные как однолетними, так и многолетними культурами. Использованный в данной работе в качестве тест-культуры *Fusarium solani* поражает картофель, горох, сою, тыкву и ряд других культур, выращиваемых на территории Красноярского края

[1]. Кроме этого, он способен вызывать микозы у людей с ослабленным иммунитетом [2]. Заболевания, вызываемые грибами р. *Fusarium*, носят название «фузариозы» и включают поражение наземной и подземной части растения, а также плодов и семян [2].

Широко распространенные методы борьбы с фузариозами, основанные на использовании химических реагентов, привели к широкому распространению резистентных к ним штаммов [3], что свидетельствует о необходимости поиска альтернативных методов решения проблемы [4]. К таковым может быть отнесено применение в сельском хозяйстве наноразмерных частиц [5], [6], в частности, наночастиц серебра [7].

В связи с вышесказанным, целью настоящей работы являлась оценка влияния коллоидного раствора наночастиц серебра на фитопатогенные грибы р. *Fusarium* на примере изолята *F. solani*, выделенного из корней поражённой фузариозом сои.

Методы и принципы исследования

При выполнении исследований использовали коллоидный раствор наночастиц серебра (концентрация серебра составляла 50 мг/л), в составе которого присутствовали: наночастицы размером 4-12 нм (основная часть), размером до 25 нм (отдельные частицы) и агрегаты наночастиц. Коллоидный раствор был изготовлен в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН.

Исследование коллоидного раствора наночастиц серебра осуществляли с использованием в качестве тест-культуры моноконидиального изолята возбудителя фузариоза сои и картофеля *Fusarium solani* (Mart.) Sacc., 1881, который был выделен из корней поражённой фузариозом сои (УНПК «Борский» ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ).

Проверку фунгицидных свойств препарата проводили с помощью теста, основанного на прорастании конидий [8], [9].

Обработку полученных результатов осуществляли при использовании пакетов анализа MS Excel 2007 и StatSoft STATISTICA 6.0.

Основные результаты

Средняя длина проростковых гиф в контрольных вариантах с 1%-ным и 2%-ным растворами сахарозы составила $36,37 \pm 12,15$ мкм и $29,70 \pm 8,45$, соответственно, после 8 часов инкубирования (рис.1). При этом максимальная длина проростковых гиф была равна 253 и 270 мкм.

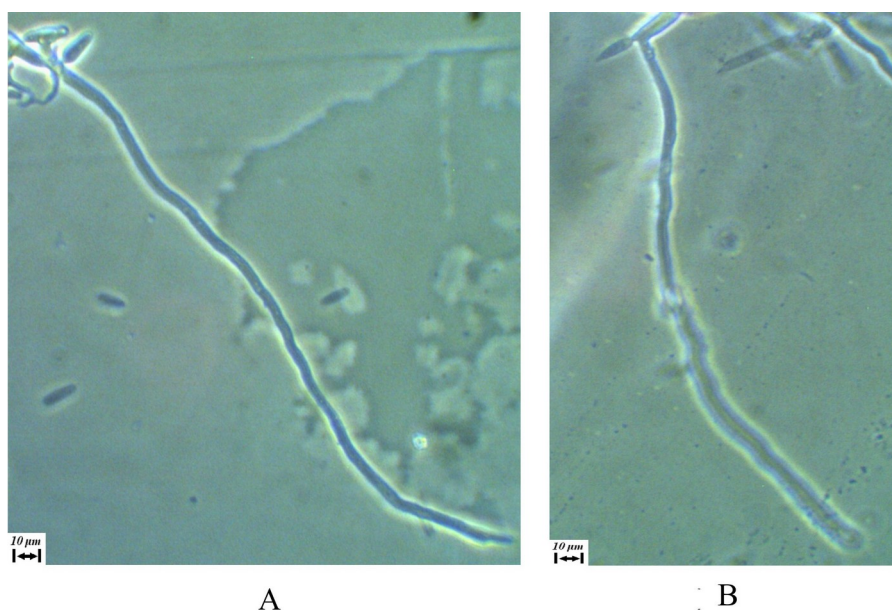


Рисунок 1 - Максимальная длина проростковой гифы *F. solani* в контрольном варианте с 1% (А) и 2% -ным (В) содержанием сахарозы

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.1>

В обоих случаях распределение носило асимметричный характер и больше соответствовало логнормальному распределению, чем нормальному (рис. 2).

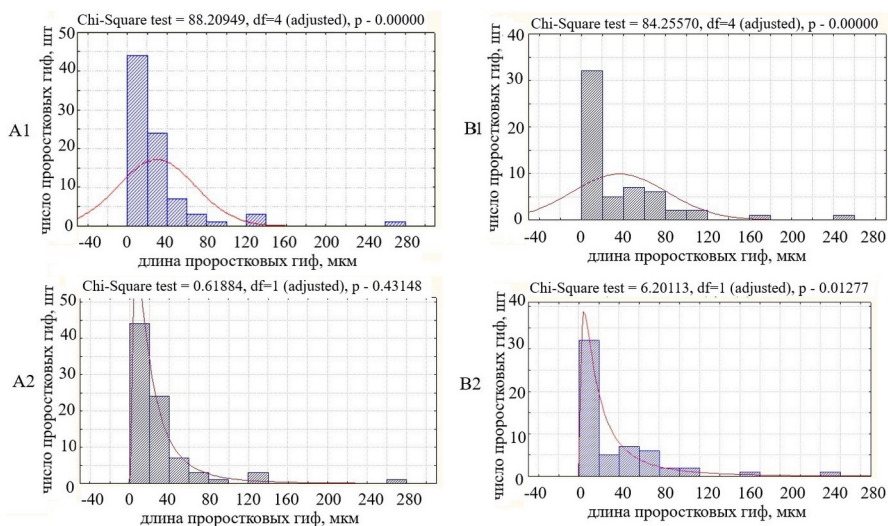


Рисунок 2 - Аппроксимация распределения проростковых гиф в контроле с 1%-ным (А) и 2%-ным (В) содержанием сахарозы нормальным (1) и логнормальным распределением (2)
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.2>

Статистически значимых различий между средней длиной гиф в контрольных вариантах с 1% и 2% сахарозой зафиксировано не было. Согласно двухвыборочному t-тесту, значимость различий между данными вариантами составила p одностороннее 0,177, p двустороннее – 0,354. Непараметрические тесты также не выявили статистически значимых различий между контрольными вариантами с 1% и 2% сахарозой. Это можно объяснить тем, что сахароза в данном случае играет лишь роль индуктора прорастания, в то время как собственно рост проростковых гиф происходит за счёт запаса питательных веществ, накопленных в конидии. В связи с отсутствием статистически значимых различий между контрольными вариантами с 1% и 2% сахарозой, для сравнения с вариантами с наносеребром был использован объединённый контроль, полученный объединением данных по длине проростковых гиф в 1% и 2% растворах сахарозы.

Данные по средней и максимальной длине проростковых гиф в соответствии с изменениями концентрации наночастиц серебра представлены на рисунке 3 и в таблице 1.

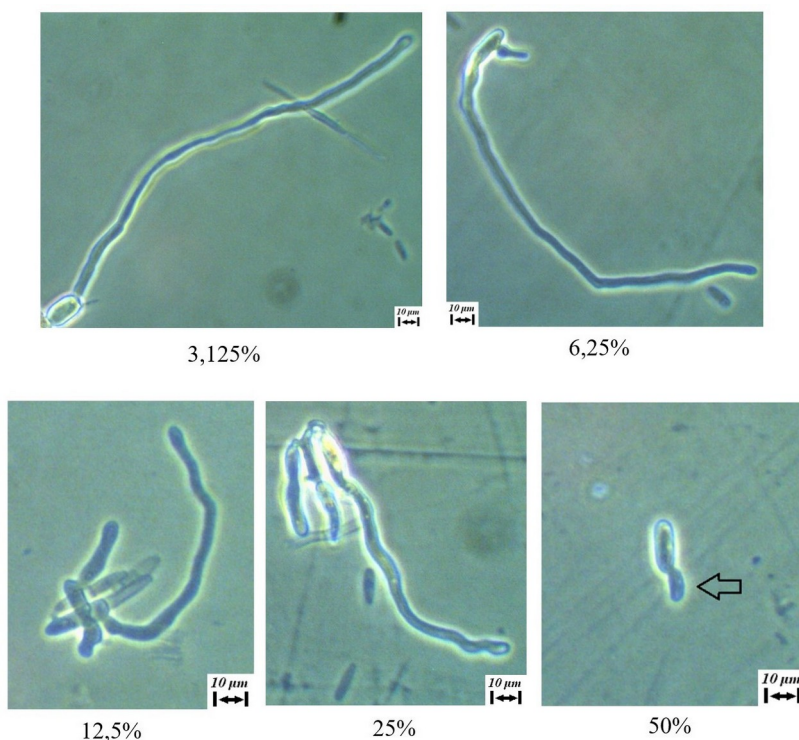


Рисунок 3 - Изменение проростковых гиф *F. solani* в присутствии наночастиц серебра в различных концентрациях от исходного коллоидного раствора
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.3>

Таблица 1 - Влияние наночастиц серебра на среднюю и максимальную длину проростковых гиф

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.4>

Содержание наночастиц серебра, %	Средняя длина проростковых гиф, мкм	Максимальная длина проростковых гиф, мкм
Контроль	32,38±6,96	261
3,125	35,67±8,9	233
6,25	35,61±6,77	183
12,5	21,42±4,38	90
25,0	21,39±3,23	95
50,0	5,4±2,34	10

Как показано в таблице, существенных отличий средней длины проростковых гиф от объединенного контроля не было зарегистрировано в вариантах с наночастицами серебра в концентрации 3,125 и 6,25% от исходного раствора. При использовании концентрации 12,5% и 25% получены аналогичные данные, фактически не отличающиеся друг от друга. Дополнительно следует отметить, что при использовании наночастиц серебра в концентрации 50% от исходного коллоидного раствора практически не фиксировалось прорастание конидий.

Во всех случаях статистическая значимость различий с контролем по длине проростковых гиф составляет $p < 0,01$ по двухвыборочному t -тесту и $p = 0,01$ по непараметрическому тесту, при этом распределение проростковых гиф по длине является асимметричным, и ближе к логнормальному, чем к нормальному.

Обсуждение

Для сопоставления распределений длины проростковых гиф по частоте встречаемости в разных вариантах эксперимента эти распределения были переведены в единый масштаб (рис. 4)

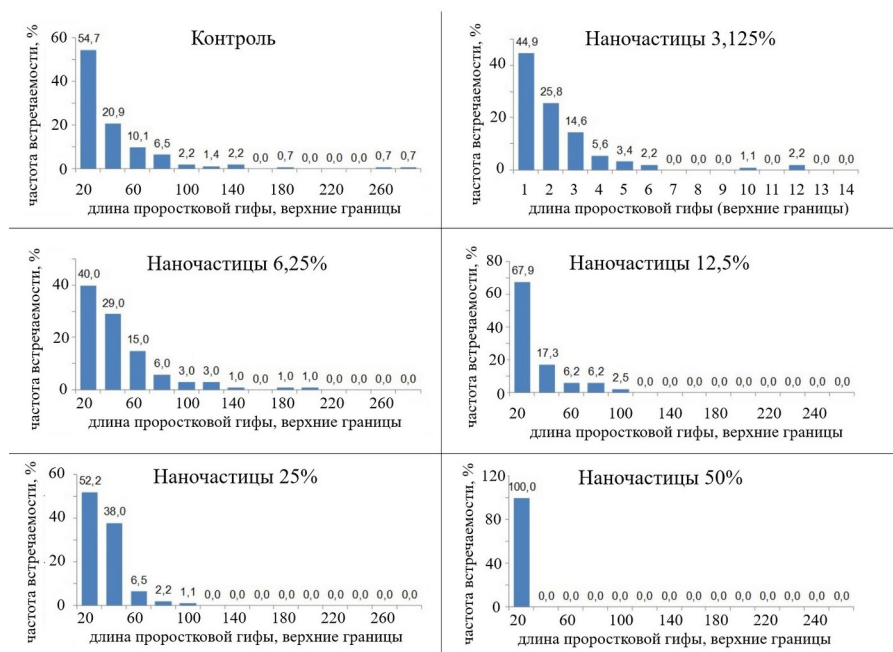


Рисунок 4 - Распределение проростковых гиф по длине в зависимости от концентрации наночастиц серебра

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.5>

Как видно из сопоставления гистограмм, по мере увеличения концентрации наночастиц происходит закономерный сдвиг верхней границы распределения влево, то есть уменьшение максимальной длины проростковых гиф. В этой связи была изучена зависимость максимальной длины проростковых гиф от концентрации наночастиц.

Установлено, что наночастицы оказали ингибирующее влияние как на максимальную, так и среднюю длину проростковых гиф, в том числе и в минимально изученной концентрации. При этом следует отметить, что данные зависимости носят ярко выраженный нелинейный характер (рис. 5).

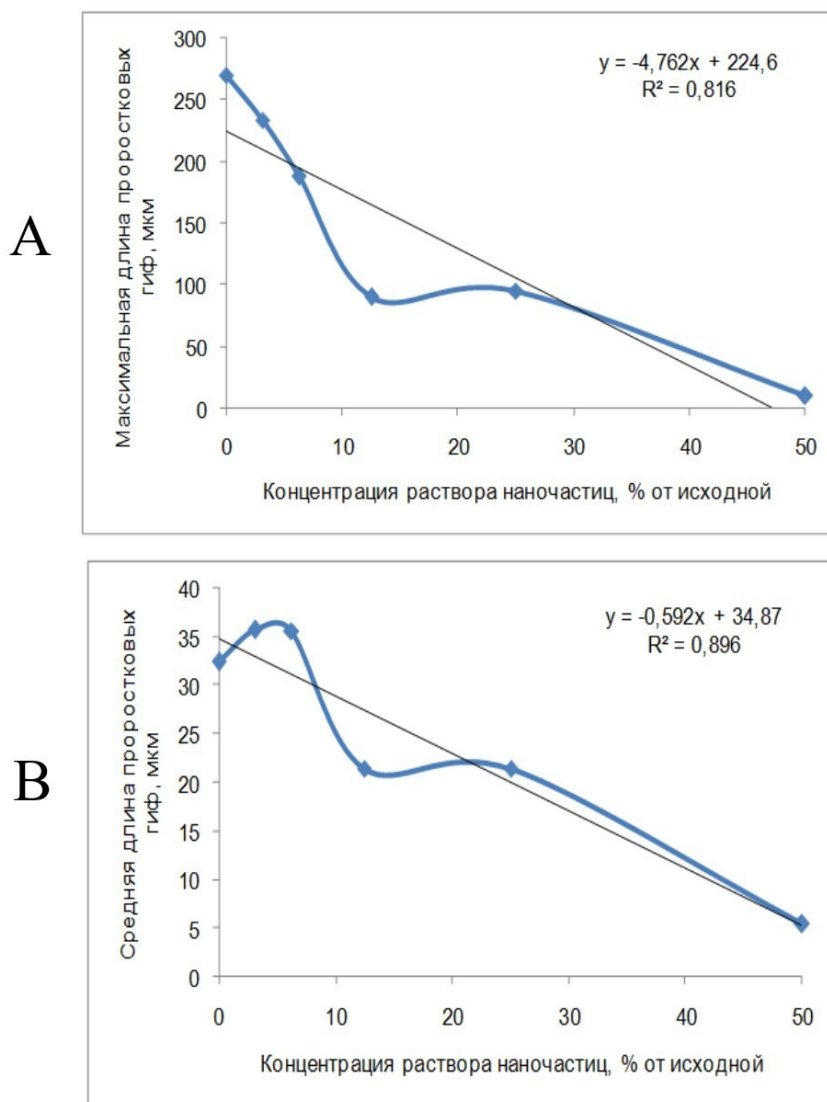


Рисунок 5 - Влияние наночастиц серебра на максимальную (А) и среднюю (В) длину проростковых гиф *F. solani* после 8 часов инкубирования

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2025.54.12.6>

Нелинейный характер эффекта вероятно может быть связан с присутствием в растворе наночастиц разного размерного класса с разными кривыми доза – эффект. То есть в данном случае наблюдаемая зависимость может являться результатом наложения двух дозовых кривых. Данная гипотеза подтверждается и в результате анализа данных, представленных на рисунке 5.

Заключение

На основании представленных данных можно сделать вывод о том, что коллоидный раствор наночастиц серебра, изготовленный в Институте физики им. Л.В. Кириенского СО РАН, характеризуется ярко выраженной биологической активностью в отношении возбудителя фузариоза сои *F. solani*. При этом снижение максимальной длины проростковых гиф относительно контроля фиксируется во всём диапазоне исследованных концентраций. При высоких концентрациях наночастиц (выше 12,5%) отмечено статистически значимое снижение средней длины проростковых гиф. В случае малых концентраций (менее 6,25%) отмечено небольшое повышение рассматриваемого параметра.

Полученные при анализе кривых «доза-эффект» данные позволяют с высокой степенью уверенности предположить, что для каждого размерного класса наночастиц характерна своя дозовая кривая, суммирование независимых эффектов которых и обуславливает биологические свойства исследуемого раствора.

Несмотря на то, что для наночастиц серебра при длительном хранении в растворах отмечается агрегация частиц в более крупные комплексы [10], исследуемый коллоидный раствор наночастиц серебра не утратил своих антимикробных свойств после 2,5 месяцев хранения. Дополнительно следует обратить внимание на то, что исследование как фунгистатических, так и рост-стимулирующих эффектов наночастиц серебра является перспективным направлением дальнейшего изучения как с научной, так и с практической точек зрения.

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. Romberg M.K. Host Range and Phylogeny of *Fusarium solani* f. sp. *eumartii* from Potato and Tomato in California. / M.K. Romberg, R.M. Davis // *Plant Disease*. — 2007. — Vol. 91. — № 5. — P. 585–592. — DOI: 10.1094/PDIS-91-5-0585.
2. Zhang N. Members of the *Fusarium solani* Species Complex That Cause Infections in Both Humans and Plants Are Common in the Environment / N. Zhang, K. O'Donnell, D.A. Sutton [et al.] // *Journal of Clinical Microbiology*. — 2006. — Vol. 44. — № 6. — P. 2186–2190. — DOI: 10.1128/JCM.00120-06.
3. Deising H.B. Mechanisms and significance of fungicide resistance / H.B. Deising, S. Reimann, S.F. Pascholati // *Brazilian Journal of Microbiology*. — 2008. — Vol 39. — № 2. — P. 286–295. — DOI: 10.1590/S1517-83822008000200017.
4. Hollomon D.W. Fungicide resistance: facing the challenge – a review / D.W. Hollomon // *Plant Protection Science*. — 2015. — Vol. 51. — № 4. — P. 170–176. — DOI: 10.17221/42/2015-PPS.
5. Хижняк С.В. Влияние биогенных наночастиц ферригидрита на эффективность протравливания семян пшеницы / С.В. Хижняк, Д.И. Шевелёв, В.А. Самойлова // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. — 2015. — № 10 (109). — С. 179–182. — EDN ULXDCP.
6. Ланкина Е.П. Исследование антиоксидантных свойств биогенных наночастиц гидроксида железа в отношении тиabendазол-тебуконазоловых фунгицидов / Е.П. Ланкина, Д.И. Шевелёв, С.В. Хижняк [и др.] // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. — 2011. — № 11 (62). — С. 129–133. — EDN OJIRHJ.
7. Станишевская И.Е. Наночастицы серебра: получение и применение в медицинских целях / И.Е. Станишевская, А.М. Стойнова, А.И. Марахова [и др.] // *Разработка и регистрация лекарственных средств*. — 2016. — № 1 (14). — С. 66–69. — EDN WBODEF.
8. Хижняк С.В. Фитосанитарные свойства почвоподобного субстрата / С.В. Хижняк, Н.С. Мануковский // *Вестник Красноярского государственного аграрного университета*. — 2016. — № 11 (122). — С. 90–96. — EDN XATALB.
9. Хижняк С.В. Экспериментальный 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*. — Рязань : Издательство Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева, 2019. — Ч. 2. — С. 590–594. — EDN NVTRSN.
10. Мацкевич Е.П. Особенности агрегации наночастиц серебра в коллоидных растворах, синтезированных боргидридным методом / Е.П. Мацкевич, С.Л. Прокопьев // *Вестник Белорусского государственного университета*. Серия 1: Физика. Математика. Информатика : научно-теоретический журнал. — 2012. — № 2. — С. 52–56. — EDN RUPOVR.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Romberg M.K. Host Range and Phylogeny of *Fusarium solani* f. sp. *eumartii* from Potato and Tomato in California. / M.K. Romberg, R.M. Davis // *Plant Disease*. — 2007. — Vol. 91. — № 5. — P. 585–592. — DOI: 10.1094/PDIS-91-5-0585.
2. Zhang N. Members of the *Fusarium solani* Species Complex That Cause Infections in Both Humans and Plants Are Common in the Environment / N. Zhang, K. O'Donnell, D.A. Sutton [et al.] // *Journal of Clinical Microbiology*. — 2006. — Vol. 44. — № 6. — P. 2186–2190. — DOI: 10.1128/JCM.00120-06.
3. Deising H.B. Mechanisms and significance of fungicide resistance / H.B. Deising, S. Reimann, S.F. Pascholati // *Brazilian Journal of Microbiology*. — 2008. — Vol 39. — № 2. — P. 286–295. — DOI: 10.1590/S1517-83822008000200017.
4. Hollomon D.W. Fungicide resistance: facing the challenge – a review / D.W. Hollomon // *Plant Protection Science*. — 2015. — Vol. 51. — № 4. — P. 170–176. — DOI: 10.17221/42/2015-PPS.
5. Khizhnyak S.V. Vliyanie biogennykh nanochastits ferrigidrita na effektivnost' protravlivanija semjan pshenitsy [Influence of biogenic ferrihydrite nanoparticles on the efficiency of fungicide treatment of wheat seeds] / S.V. Khizhnyak, D.I. Shevelyov, V.A. Samoylova // *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]. — 2015. — № 10 (109). — P. 179–182. — EDN ULXDCP. [in Russian]
6. Lankina E.P. Issledovanie antitoksicheskikh svojstv biogennykh nanochastits gidroksida zheleza v otnoshenii tiabendazol-tebukonazolovykh fungitsidov [Research of the antitoxic properties of the iron hydroxide biogene nanoparticles concerning thiabendazole-tebuconazole fungicides] / E.P. Lankina, D.I. Shevelev, S.V. Khizhnyak [et al.] // *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. — 2011. — № 11 (62). — P. 129–133. — EDN OJIRHJ. [in Russian]
7. Stanishevskaya I.E. Nanochastitsy srebra: poluchenie i primenenie v meditsinskikh tseljah [Silver nanoparticles: preparation and use for medical purposes] / I.E. Stanishevskaya, A.M. Stoinova, A.I. Marakhova [et al.] // *Development and Registration of Medicines*. — 2016. — № 1 (14). — P. 66–69. — EDN WBODEF. [in Russian]
8. Khizhnyak S.V. Fitosanitarnye svojstva pochvopodobnogo substrata [Phytosanitary properties of soil-like substrate] / S.V. Khizhnyak, N.S. Manukovsky // *Vestnik Krasnojarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Krasnoyarsk State Agrarian University]. — 2016. — № 11 (122). — P. 90–96. — EDN XATALB. [in Russian]

9. Khizhnyak 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. Khizhnyak, E.P. Puchkova, S.A. Petrushkina // *Prioritetnye napravlenija nauchno-tehnologicheskogo razvitija agropromyshlennogo kompleksa Rossii* [Priority directions of scientific and technological development of the agro-industrial complex of Russia] : materials of the National Scientific and Practical Conference. — Ryazan : Publishing House of Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, 2019. — Part 2. — P. 590–594. — EDN NVTRSN. [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 // *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Serija 1: Fizika. Matematika. Informatika* [Bulletin of the Belarusian State University. Series 1: Physics. Mathematics. Informatics: Scientific and Theoretical Journal]. — 2012. — № 2. — P. 52–56. — EDN RUPOVR. [in Russian]