

ISSN 1029-8940 (Print)  
ISSN 2524-230X (Online)  
УДК 581.17:620.3  
<https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

Поступила в редакцию 07.09.2022  
Received 07.09.2022

А. С. Курнушко<sup>1</sup>, Т. А. Скуратович<sup>1</sup>, Ю. Н. Бекиш<sup>2</sup>, С. Г. Азизбекян<sup>2</sup>, О. В. Молчан<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт физико-органической химии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

## ВЛИЯНИЕ СОЛЕЙ И НАНОЧАСТИЦ СЕЛЕНА И КРЕМНИЯ НА РОСТ МИЦЕЛИЯ *FUSARIUM AVENACEUM* (FR.) SACC. И *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. И ПРОРАСТАНИЕ СЕМЯН ЗЛАКОВЫХ КУЛЬТУР

**Аннотация.** Изучено влияние селена и кремния в наноформе в сравнении с селенитом натрия и натрием кремнефтористым на рост мицелия патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. Выявлен ингибирующий эффект наночастиц на рост *Bipolaris sorokiniana* и *Fusarium avenaceum*. Нанокремний в концентрации 5–50 мг/л в большей степени, чем наночастицы селена, ингибировал рост *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* и был более эффективен, чем натрий кремнефтористый. *Fusarium avenaceum* оказался более устойчивым к наноселену и селениту натрия по сравнению с *Bipolaris sorokiniana*. Наночастицы практически не влияли на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы, в то время как селенит натрия и натрий кремнефтористый в таких же концентрациях вызывали снижение энергии прорастания семян и сухой массы побегов и корней проростков.

**Ключевые слова:** наноселен, нанокремний, селенит натрия, натрий кремнефтористый, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, пшеница (*Triticum aestivum* L.), кукуруза (*Zea mays* L.), биометрические показатели, фунгицидная активность

**Для цитирования:** Влияние солей и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. и *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. и прорастание семян злаковых культур / А. С. Курнушко [др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. биол. наук. – 2023. – Т. 68, № 4. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

Anna S. Kurnushko<sup>1</sup>, Tatiana A. Skuratovich<sup>1</sup>, Yuliya N. Bekish<sup>2</sup>, Siarhei G. Azizbekyan<sup>2</sup>, Olga V. Molchan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## INFLUENCE OF SELENIUM AND SILICON SALTS AND NANOPARTICLES ON THE GROWTH OF *FUSARIUM AVENACEUM* (FR.) SACC. AND *BIPOLARIS SOROKINIANA* (SACC.) SHOEM. MYCELIUM AND GRAIN SEEDS GERMINATION

**Abstract.** The effect of selenium and silicon in nanoform in comparison with sodium selenite and sodium silicofluoride on the growth of pathogenic fungi *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* was evaluated. The influence of nanoparticles on wheat and corn seed germination and seedling growth was also studied. The inhibitory effect of selenium and silicon nanoparticles on the growth of *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* was revealed. Nanosilicon at a concentration of 5–50 mg/l inhibited the growth of pathogenic fungi *Fusarium avenaceum* and *Bipolaris sorokiniana* to a greater extent than selenium nanoparticles and was more effective than sodium silicofluoride. *Fusarium avenaceum* was shown to be more resistant to nanoselenium and sodium selenite compared to *Bipolaris sorokiniana*. Nanoparticles had practically no effect on seed germination and the growth of wheat and corn seedlings, while sodium selenite and sodium silicofluoride at the same concentrations caused a decrease in seed germination energy and dry weight of the shoots and roots of seedlings.

**Keywords:** selenium nanoparticles, silicon nanoparticles, sodium selenite, sodium silicofluoride, *Fusarium avenaceum*, *Bipolaris sorokiniana*, wheat (*Triticum aestivum* L.), corn (*Zea mays* L.), biometric indicators, fungicidal activity

**For citation:** Kurnushko A. S., Skuratovich T. A., Bekish Y. N., Azizbekyan S. G., Molchan O. V. Influence of selenium and silicon salts and nanoparticles on the growth of *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. and *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. mycelium and grain seeds germination. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya biyalagichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Biological series*, 2023, vol. 68, no. 4, pp. 332–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2023-68-4-332-344>

**Введение.** Потери урожая в результате воздействия биотических стрессоров, вызывающих различные заболевания растений, по некоторым оценкам, до сих пор достаточно велики и составляют от 20 до 40 % [1]. Одной из самых распространенных болезней зерновых культур является фузариоз, вызываемый грибами рода *Fusarium*, особенно *Fusarium graminearum*, *Fusarium culmorum* и *Fusarium avenaceum* [2]. Опасным возбудителем болезней злаковых культур являются грибы рода *Bipolaris*. Повсеместно распространена гельминтоспориозная корневая гниль (*Bipolaris sorokiniana*), поражающая озимую и яровую пшеницу, рожь, ячмень, злаковые травы [3]. Для защиты растений от грибковых заболеваний используют различные фунгициды, часто являющиеся токсичными для человека, животных, рыб и зоопланктона. При этом растущая потребность человечества в продуктах растениеводства и формирование устойчивости патогенов к применяемым препаратам приводит к увеличению потребления химикатов в сельском хозяйстве [4]. Это вызывает ухудшение состояния почв, загрязнение окружающей среды и попадание в пищу человека и животных все большего количества ксенобиотиков. Поэтому большие надежды возлагают на нанотехнологические подходы к созданию и улучшению свойств систем защиты растений, позволяющие разработать рентабельные, высокоэффективные и экологически безопасные пестициды. В частности, большое внимание уделяется вопросу о влиянии наночастиц на физиологические и биохимические процессы и устойчивость растений к патогенам [5]. У многих препаратов, содержащих наночастицы, выявлена высокая фунгицидная и/или бактерицидная активность.

Особый интерес представляют содержащие селен и кремний наночастицы, которые во многих случаях демонстрируют свою эффективность, повышая устойчивость растений к абиотическим и биотическим стрессорам [6, 7]. В ряде исследований установлено, что наночастицы селена обладают бактерицидным и бактериостатическим эффектом [6]. В работе [8] показано, что наноселен более эффективен для повышения активности селенозависимых антиоксидантных ферментов и менее токсичен для растений, чем селен в солевой форме. Кремний, хотя и не является критически необходимым элементом, также играет важную роль в защите растений от абиотических и биотических стрессоров [7]. Известно, что кремний, в том числе и в наночастицах, может ослаблять стресс, вызываемый у сельскохозяйственных культур тяжелыми металлами, а также снижать заболеваемость, вызываемую *Magnaportha grisea*, *Cochliobolus miyabeanus*, *Thanatephorus cucumeris*, *Monographella albescens*, различными видами родов *Fusarium*, *Bipolaris* и другими патогенами [7, 9]. Выявлено влияние кремния на фотосинтетические реакции листьев ячменя, зараженных *Bipolaris sorokiniana* [10]. Кроме того, кремний придает растениям механическую прочность, укрепляет клеточные стенки, обеспечивая повышение устойчивости растений. В оптимальных дозах кремний способствует лучшему обмену азота и фосфора в тканях, стимулирует потребление бора и ряда других элементов, обеспечивает снижение токсичности избыточных количеств тяжелых металлов [11]. Нанотехнологии также открывают большие перспективы для целевой доставки биомолекул и агрохимикатов, включая фунгициды, что повышает эффективность и безопасность борьбы с болезнями растений и позволяет сократить или свести к минимуму неизбежное использование обычных химических пестицидов [9].

Таким образом, использование наночастиц селена и кремния может быть эффективным в комплексных системах борьбы с биотическими стрессорами, позволит сократить применение фунгицидов и повысить устойчивость растений к атакам патогенов и различным заболеваниям. Одним из направлений может быть их применение в качестве защитных препаратов фунгицидного действия. Однако к настоящему времени работ, свидетельствующих о фунгицидном или фунгистатическом действии наноселена и нанокремния, крайне мало [5]. Следует также отметить, что эффективность воздействия наночастиц, в том числе селена и кремния, зависит от их физико-химических характеристик, особенно от структуры, размера, концентрации используемых частиц, а также от вида и физиологического состояния растения [5, 12]. При этом важно, чтобы наночастицы, обладая фунгицидной активностью, в используемой концентрации не были токсичными для растений.

Цель настоящей работы – оценка влияния солей и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы.

**Объекты и методы исследования.** В работе использовали штаммы *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. MSK-F 44C из гербария Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси и *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem. БИМ-464 из Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов Института микробиологии НАН Беларуси [13, 14].

Определение фунгицидной активности проводили, используя метод агаровых блоков. Культуры выращивали в чашках Петри на агаризованной среде Чапека. После образования мицелием сплошного газона на поверхности питательной среды стерильным сверлом вырезали агаровые блоки, которые переносили на другую плотную питательную среду. В чашки со средой Чапека перед застыванием добавляли селен или кремний в наноформе или в форме солей. Чашки инкубировали в термостате 5 сут при 25 °С, после чего измеряли диаметр зоны роста мицелия [15].

В качестве растительных объектов использовали проростки яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сорта Дарья, предоставленные НПЦ НАН Беларуси по земледелию, и кукурузы (*Zea mays* L.) сорта Порумбень (ОАО «МинскСортСемОвощ», Беларусь). Семена пшеницы стерилизовали в течение 30 с в 70 %-ном  $C_2H_5OH$  (этанол), кукурузы – в течение 5 мин в 25 %-ном растворе  $H_2O_2$  (перекиси водорода), затем многократно промывали дистиллированной водой. Определяли энергию прорастания семян, сухую массу надземной части и корней проростков [16].

В качестве солевых форм элементов использовали  $Na_2SeO_3$  (селенит натрия), ч, ТУ 6-09-17-209-88 и  $Na_2SiF_6$  (водный раствор натрия кремнефтористого,  $Si = 1 \text{ мг/см}^3$ ; ГСО 8212-2002) производства ЭАА «Эко-аналитик» (Минск, Беларусь).

Наночастицы селена синтезировали в НТООО «АКТЕХ» (Минск, Беларусь). В качестве источника наночастиц кремния использовали золь кремниевой кислоты марки Ковелос производства ООО «Экокремний» (Россия) в виде коллоидного раствора мицелл аморфного кремнезема ( $SiO_2$ ) в воде. Размеры наночастиц (гидродинамические радиусы) определяли с помощью метода динамического рассеяния света на лазерном анализаторе Zetasizer Nano ZSP (Malvern, Великобритания) при разбавлении растворов деионизованной водой в различных соотношениях – от 1 : 10 до 1 : 1000. Массовые доли селена и кремния в растворах исследуемых образцов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой VISTA PRO (Varian, США).

Для статистической обработки данных использовали программу Excel. Эксперименты проводили в трехкратной повторности. Данные на гистограммах представлены в виде средних арифметических значений со стандартным отклонением [17]. Однофакторный дисперсионный анализ применяли для оценки достоверности отличий от контроля.

**Результаты и их обсуждение.** Используемые в работе наночастицы селена, синтезированные в виде нерастворимых соединений в оболочке из биогенных полимеров [18], являются компонентом одной из марок микроудобрений серии Наноплант, разработанных в НАН Беларуси и освоенных в массовом производстве в НТООО «АКТЕХ» [19, 20]. Токсичность микроудобрения Наноплант исследовали согласно Европейской процедуре оценки острой, кумулятивной, фито-, эко-, цитотоксичности, мутагенности на мышях, кроликах, растениях, моллюсках и одноклеточных организмах [21–23]. В результате многолетних исследований установлено, что данное микроудобрение является менее токсичным, чем соли соответствующих микроэлементов, и, согласно классификации опасности химических веществ (продукции, материалов) по воздействию на организм, может быть отнесено к IV классу опасности (вещества малоопасные) [24].

На рис. 1 представлены гистограммы распределения частиц селена и кремния по размерам. Оба образца характеризуются достаточно высокой полидисперсностью (распределение от 15 до 70 нм для Se и от 7 до 12 нм для  $SiO_2$ ), средние размеры наночастиц составляют 10 нм для  $SiO_2$  и 38 нм для Se.

Прежде всего было изучено действие наночастиц селена и кремния, а также селенита натрия и натрия кремнефтористого на рост мицелия *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* (рис. 2, 3). В результате обнаружено, что селен в наноформе при его концентрации в диапазоне 5–50 мг/л не оказывал достоверного влияния на рост *Fusarium avenaceum*, хотя и отмечалась тенденция к снижению диаметра зоны роста мицелия при повышении концентрации наночастиц (рис. 2, 3). Селенит натрия только при концентрации селена в среде 50 мг/л снижал интенсивность разрас-

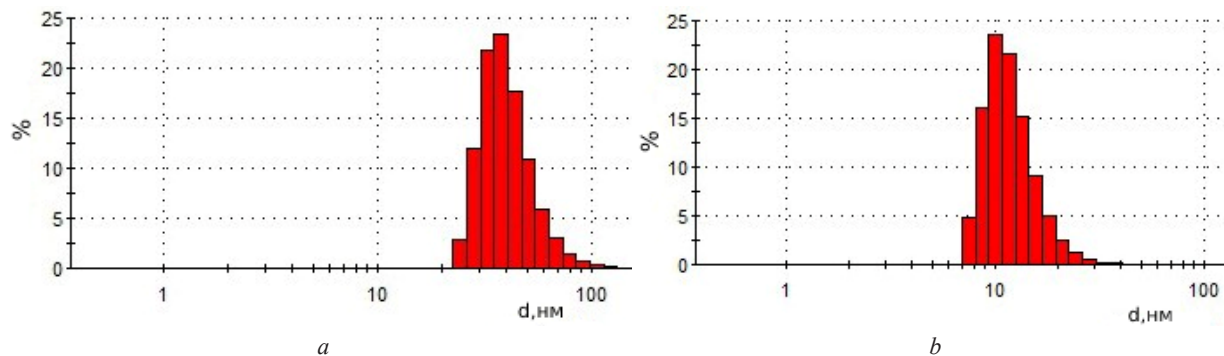


Рис. 1. Размеры наночастиц селена (a) и кремния (b)

Fig. 1. Sizes of selenium (a) and silicon (b) nanoparticles

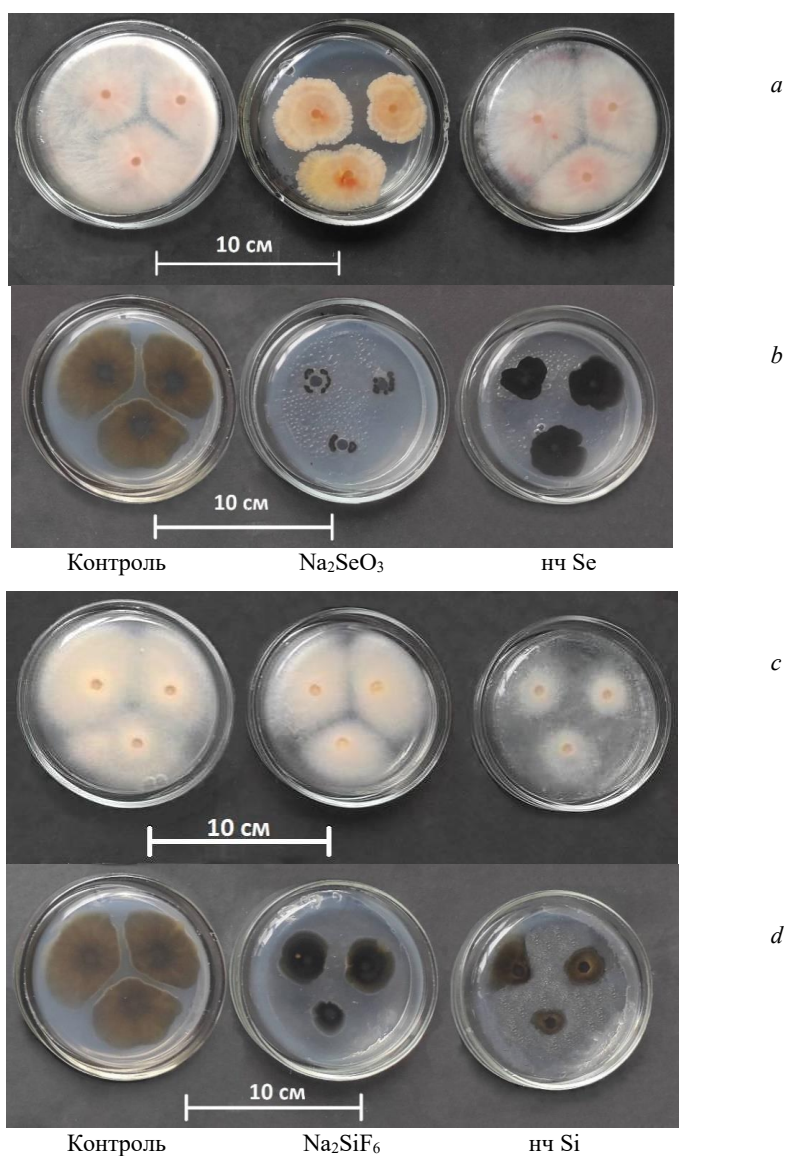


Рис. 2. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (a, c) и *Bipolaris sorokiniana* (b, d) на 7-е сутки (50 мг/л в пересчете на селен или кремний)

Fig. 2. Effect of saline and nanoforms of selenium and silicon on the *Fusarium avenaceum* (a, c) and *Bipolaris sorokiniana* (b, d) mycelium growth on the 7th day (50 mg/l per selenium or silicon)



тания мицелия *Fusarium avenaceum* на 10–20 % (рис. 3, а). Действие нано- и солевой формы селена на рост *Bipolaris sorokiniana* являлось более выраженным: ингибирующее действие наночастиц и натрий селенита проявлялось при концентрациях селена 25–50 и 5–50 мг/л соответственно (рис. 3, б). Добавление в среду наноселена в концентрации 50 мг/л приводило к уменьшению диаметра зоны роста мицелия *Bipolaris sorokiniana* на 30–40 % (рис. 2, б). В работе Saadony с соавт. (2021) также было показано, что наночастицы селена (Che-SeNPs и BioSeNPs) оказались достаточно эффективны против некоторых видов грибов рода *Fusarium*, рост которых был значительно снижен при использовании Che-SeNPs в диапазоне концентраций 25–45 мкг/мл и BioSeNPs в диапазоне 20–40 мкг/мл [25]. В этом же исследовании отмечены различия в эффективности действия наночастиц, полученных разными способами.

Кроме того, наночастицы характеризуются отличными от ионных форм механизмами поступления, транспорта, накопления и воздействия на физиологические и биохимические процессы в живых организмах. Эти механизмы до сих пор слабо изучены, однако хорошо известно, что

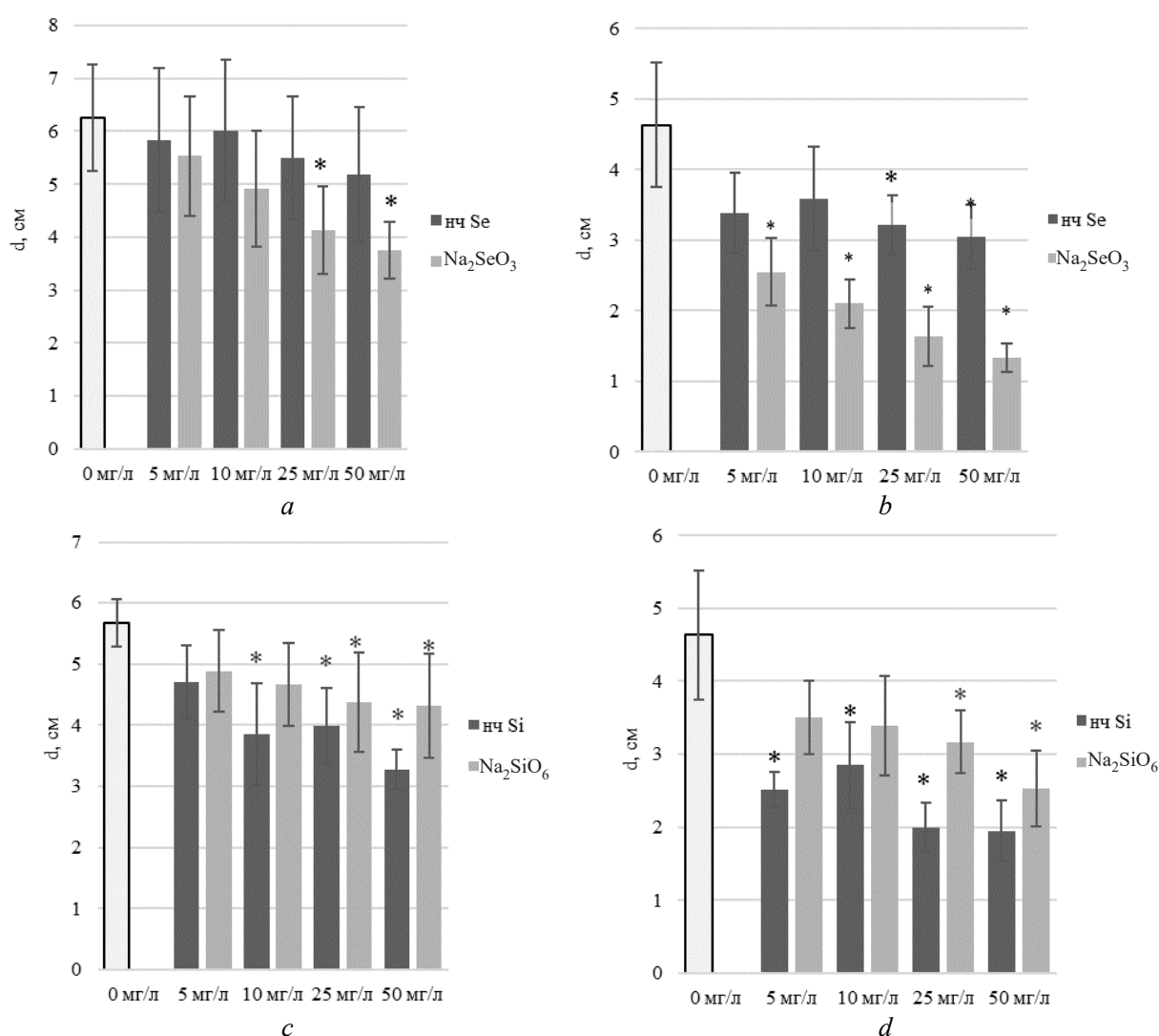


Рис. 3. Влияние солевой и наноформ селена и кремния на рост мицелия *Fusarium avenaceum* (а, с) и *Bipolaris sorokiniana* (б, д) на 7-е сутки (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний).

\* – достоверные отличия от контроля ( $p < 0,05$ )

Fig. 3. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the *Fusarium avenaceum* (a, c) and *Bipolaris sorokiniana* (b, d) mycelium growth on the 7th day (5–50 mg/l per selenium or silicon).

\* – significant differences from the control ( $p < 0.05$ )

эффектыўнасць наночастиц залежыць ад іх фізіка-хімічных свайстваў, канцэнтрацыі і фізіялагічнага становішча клеткі ці арганізма-мішні [5].

Інтарэсна адзначыць, што наночастицы крэмнія ў большай ступені, чым наночастицы селена, інгібіравалі рост патогенных грыбоў абодвух відаў і былі сярнімы па дзеянню ці нават больш эфектыўны, чым водны раствор натрыя крэмнефторыстага (рис. 2, 3). Крэмній у наноформе ў дыяпазоне канцэнтрацый 10–50 мг/л оказывал інгібіруючае дзеянне на рост міцелія *Fusarium avenaceum*, а пры канцэнтрацыі 5–50 мг/л зніжаў інтэнсіўнасць росту *Bipolaris sorokiniana*. Пры гэтым дыяметр зоны росту міцелія *Fusarium avenaceum* зніжаўся ў сярэднім на 20–45 %, а *Bipolaris sorokiniana* – на 50–60 %. Натрыў крэмнефторысты інгібіравалі рост міцелія *Fusarium avenaceum* і *Bipolaris sorokiniana* пры 25 і 50 мг/л крэмнія. У літаратуры раней ужо была паказана фунгіцыдная актывнасць крэмнійсодержащих наночастиц. Так, напрыклад, даследаванне Kalboush с соавт. (2017) таксама паказала эфектыўнасць ўплыву наночастиц крэм-

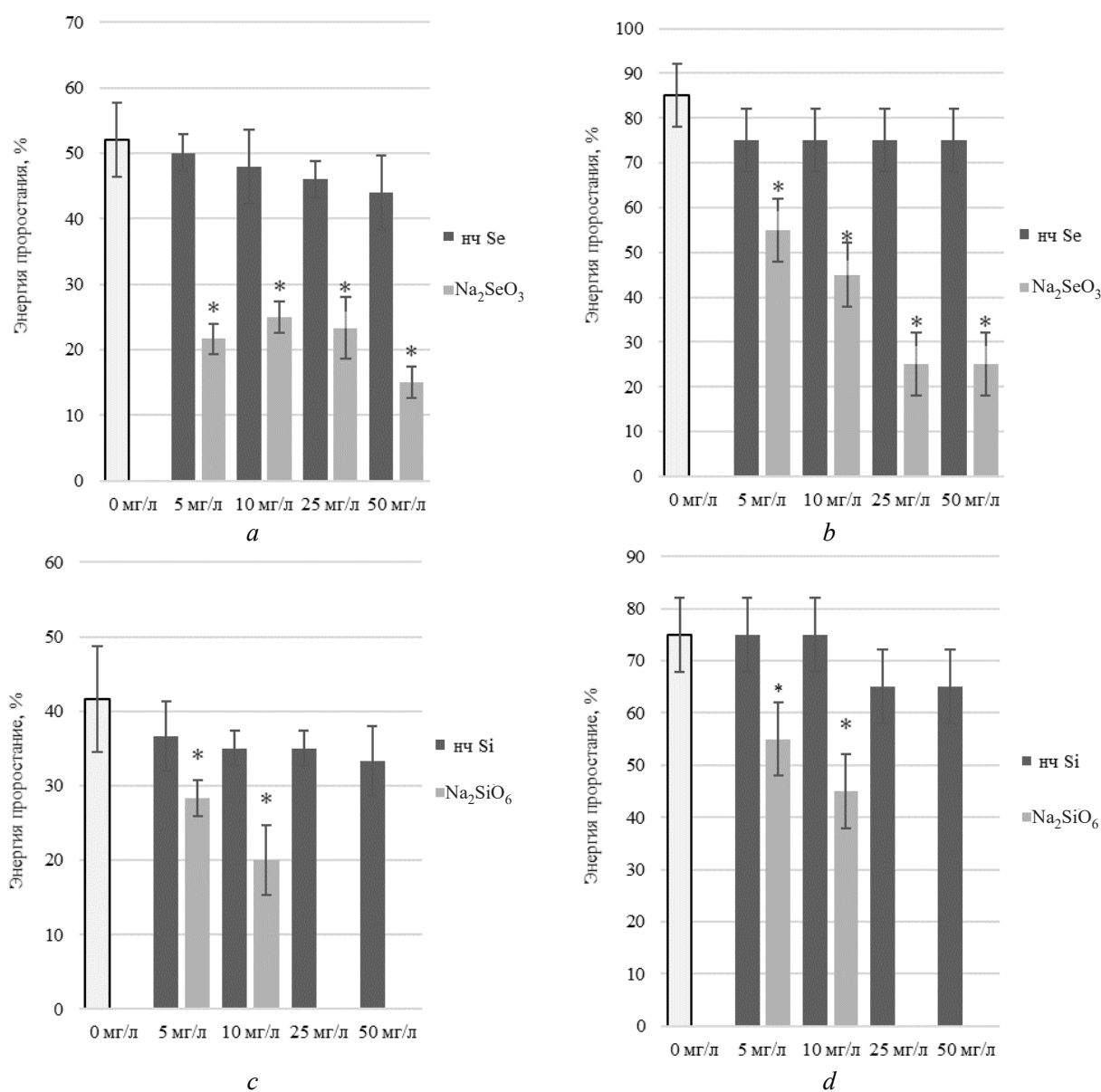


Рис. 4. Влияние солевой и наноформ селена и кремния на энергию прорастания семян пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний). \* – достоверные отличия от контроля ( $p < 0,05$ )

Fig. 4. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the germination energy of wheat (a, c) and corn (b, d) seeds (5–50 mg/l per selenium or silicon). \* – significant differences from the control ( $p < 0.05$ )

незема в борьбе с грибковыми заболеваниями риса *Pyricularia grisea* и *Bipolaris oryzae* в условиях защищенного грунта [26].

С другой стороны, всегда важно, чтобы при выраженной фунгицидной активности используемых наночастиц они не оказывали угнетающего действия на растения. Поэтому была проведена оценка влияния наночастиц в тестируемых концентрациях селена и кремния на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. В результате было обнаружено, что наночастицы, в отличие от солевых форм, не оказывали достоверного влияния на прорастание семян обеих злаковых культур (рис. 4). Так, и селенит натрия, и натрий кремнефтористый значительно снижали энергию прорастания семян обеих злаковых культур, а при обработке натрием кремнефтористым при концентрации кремния 25 и 50 мг/л семена и вовсе не проросли (рис. 4). Некоторые исследователи ранее отмечали, что предварительное замачивание в растворах, содержащих нанокремний в концентрациях 12, 24 и 36 мг/л, вызывало незначительную стимуляцию прорастания семян подсолнуха, в то время как высокие концентрации заметно подавляли прорастание [14]. В другой работе наночастицы диоксида кремния размером 10–15 нм и в концентрации до 100 мг/л не оказывали значительного влияния на семена и проростки овса, а энергия прорастания семян в присутствии более мелких наночастиц незначительно уменьшалась отно-

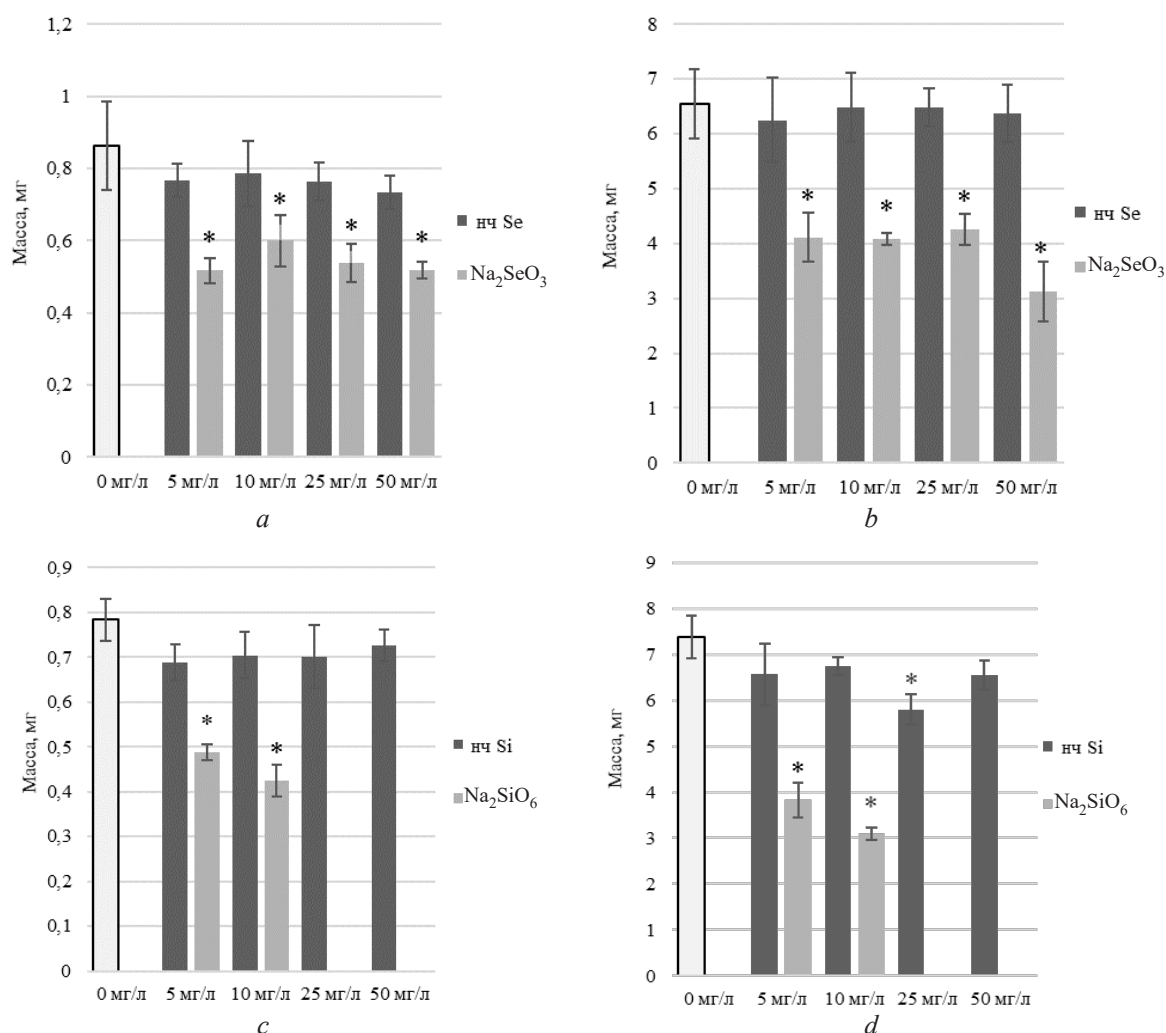


Рис. 5. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на накопление сухой массы надземной части 3-дневного проростка пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (5–50 мг/л в пересчете на селен или кремний).

\* – достоверные отличия от контроля ( $p < 0.05$ )

Fig. 5. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the dry mass of the aboveground part of 3-day wheat (a, c) and corn (b, d) seedlings (5–50 mg/l per selenium or silicon). \* – significant differences from the control ( $p < 0.05$ )

сительно контроля [27]. Таким образом, отсутствие эффекта влияния наночастиц на прорастание семян, по-видимому, свидетельствует о том, что тестируемые наночастицы селена и кремния не являются токсичными для семян злаковых культур.

В нашем исследовании наночастицы селена и кремния не оказывали такого значительного действия, как солевые формы, на прирост массы проростков пшеницы и кукурузы. Только в концентрации 25 мг/л наночастицы кремния вызвали снижение сухой массы побега проростка кукурузы на 5–10 %, а под действием 10 и 25 мг/л наночастиц селена сухая масса корня проростка пшеницы несколько отличалась от контроля (рис. 5, 6). Данный результат закономерен, поскольку наночастицы селена, использованные в работе, синтезированы в оболочке из биогенных полимеров, и их низкая токсичность для растений была ожидаема. В работе Нурминского с соавт. (2020) также не выявлено влияния нанокompозитов селена на массу побега и корня 5-дневных проростков редиса [28].

Хорошо известно, что оказываемый действием наночастиц эффект обусловлен их структурой и концентрацией. Поэтому при других, часто более низких, концентрациях и/или режимах использования положительный биологический эффект наночастиц селена вполне может проявиться, как это показано Кузовковой с соавт. (2013) при изучении влияния наноселена на клеточные культуры многоколосника морщинистого [29]. Кроме того, как упомянуто ранее, наноча-

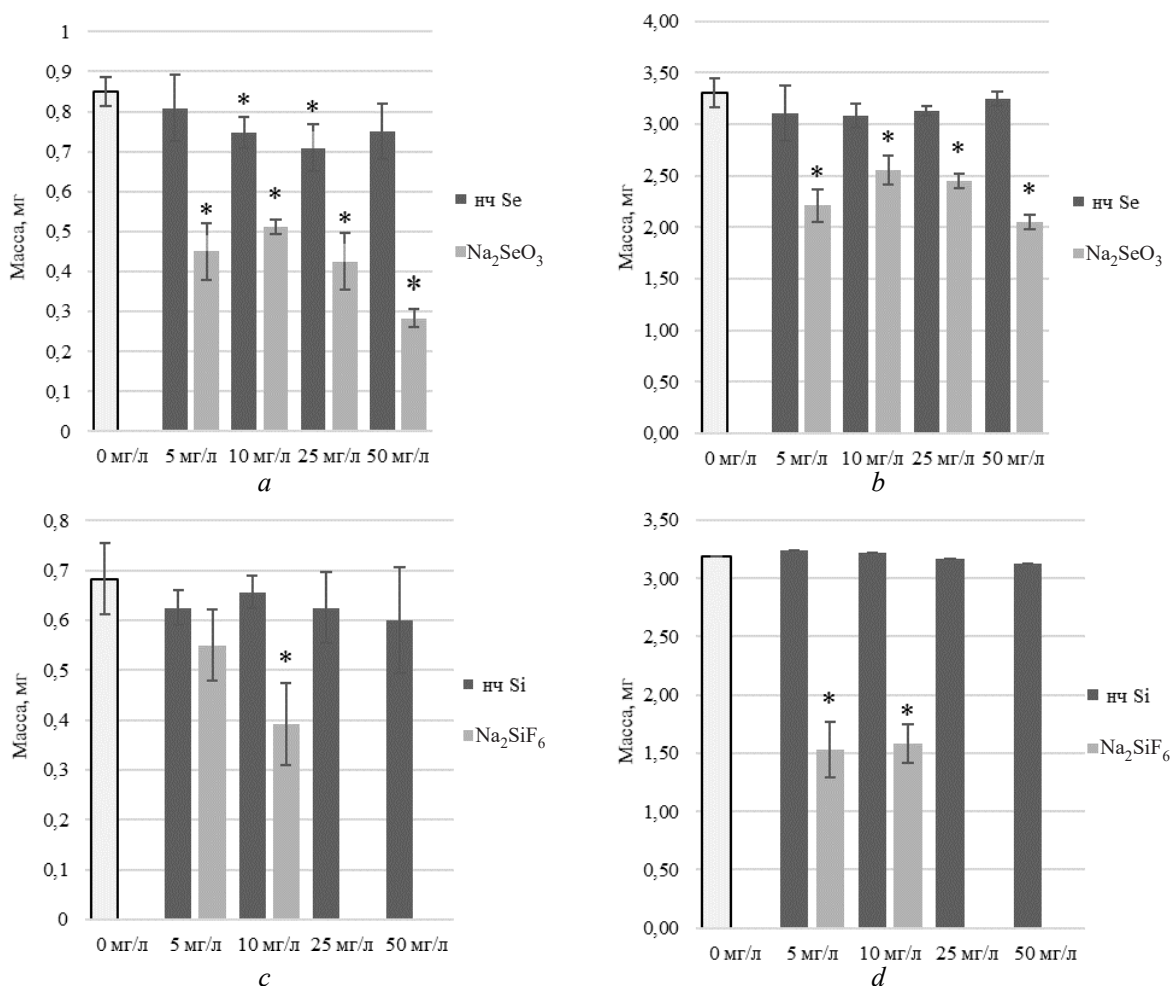


Рис. 6. Влияние солевой и наночастиц селена и кремния на накопление сухой массы корня 3-дневного проростка пшеницы (a, c) и кукурузы (b, d) (наночастицы селена и кремния, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> в концентрации 50 мг/л в пересчете на элемент). \* – достоверные отличия от контроля ( $p < 0,05$ )

Fig. 6. Effects of saline and nanoforms of selenium and silicon on the dry root mass of 3-day wheat (a, c) and corn (b, d) seedlings (selenium and silicon nanoparticles, Na<sub>2</sub>SeO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> at a concentration of 50 mg/l per element). \* – significant differences from the control ( $p < 0.05$ )



стицы селена входят в состав комплексного препарата Наноплант, широко применяемого в качестве микроудобрения с доказанной эффективностью [18, 30]. Более 10 марок Нанопланта на основе наночастиц с различным сочетанием элементов Ca, B, Co, Mn, Cu, Fe, Zn, Cr, Se, Mo, S зарегистрированы и испытаны на многих выращиваемых в Беларуси культурах [18].

Наши результаты не противоречат работам других авторов, в большинстве из которых показано, что наночастицы кремния могут либо способствовать росту растений при определенных концентрациях и режимах использования, либо не оказывают никакого влияния, проявляя эффективность только в стрессовых условиях [31]. Например, исследования Faride с соавт. (2018) показали, что наночастицы кремния, как и силикат натрия, стимулировали рост проростков овса, но при этом вызывали уменьшение длины корня [12]. В статье Tereshchenko с соавт. (2017) наночастицы оксида кремния оказывали стимулирующее действие на площадь листовой пластинки и сухую массу растений в концентрациях  $1,5 \cdot 10^{-5}$ ,  $3 \cdot 10^{-5}$  и  $3 \cdot 10^{-4}$  % [32]. Это, по мнению авторов, косвенно свидетельствовало о том, что растения быстрее проходили фенологические стадии под влиянием наночастиц оксида кремния. Как видно, авторы этой публикации использовали достаточно низкие концентрации наночастиц. В нашей работе в качестве источника наночастиц кремния использован золь кремниевой кислоты в виде коллоидного раствора мицелл аморфного кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ) в воде. В ряде работ также утверждается, что наночастицы кремнезоль стимулируют рост и развитие овощных и зерновых культур, а также посадочного материала в технологии клонального микроразмножения [33, 34]. В зависимости от размера, концентрации и способа использования наночастицы, в том числе селена и кремния, могут вызывать положительные или отрицательные эффекты на живые организмы [5].

Важно отметить, что селенит натрия при таких же концентрациях селена, как и в наночастицах, снижал сухую массу надземной части на 40–50 %, корня – на 65–70 % (рис. 5, 6). Это согласуется с работой El-Badri с соавт. (2022), в которой было показано, что после 7-дневного воздействия селенит натрия (0,26 мг/л) уменьшал длину побега и корня на 7,85 и 67,47 % соответственно по сравнению с контролем [35]. Похожие эффекты приведены и в других работах [8, 35]. Хорошо известно, что в определенных концентрациях селен может оказывать стимулирующее действие на ряд регуляторных функций в растениях, а в повышенных концентрациях является токсичным. Кремнефтористый натрий также оказывал негативное действие на проростки: при его высоких концентрациях отмечалась гибель растений (рис. 5, 6). Возможно, это связано с тем, что фтор ингибирует активность ферментов и является токсичным, повреждая клеточные мембраны [36, 37].

**Заключение.** Таким образом, изучено действие селена и кремния в наноформе в сравнении с селенитом натрия и натрием кремнефтористым на рост мицелия патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana*, а также на прорастание семян и рост проростков пшеницы и кукурузы. Установлено, что *Fusarium avenaceum* является более устойчивым к действию селена в наноформе по сравнению с *Bipolaris sorokiniana*. Показано ингибирующее действие наноселена в концентрациях 25 и 50 мг/л на рост *Bipolaris sorokiniana* и отсутствие эффектов по отношению к *Fusarium avenaceum*. Нанокремний в концентрации 5–50 мг/л в большей степени, чем наноселен, ингибирует рост патогенных грибов *Fusarium avenaceum* и *Bipolaris sorokiniana* и более эффективен, чем натрий кремнефтористый. Исследуемые наноформы селена и кремния не являются токсичными по отношению к семенам и проросткам пшеницы и кукурузы. Полученные результаты позволяют рассматривать наночастицы селена и кремния в качестве компонентов противогрибковых препаратов или носителей для целевой доставки фунгицидов и оздоровления культурных растений.

**Благодарности.** Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований согласно договорам № Б20М-044 и № Б22УЗБ-053.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института микробиологии НАН Беларуси, гербария Института экспериментальной ботаники, НПЦ НАН Беларуси по земледелию за предоставленные для работы материалы.

**Acknowledgements.** The work was carried out with the support of the Belarusian Republican Foundation for Basic Research in accordance with the agreements No. B20M-044 and No. B22UZB-053.

The authors are grateful to the staff of the Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, the Herbarium of the Institute of Experimental Botany, the Scientific Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus for the materials provided for the work.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security / S. A. Savary [et al.] // *Food Security*. – 2012. – Vol. 4, N 11. – P. 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
2. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley / N. W. Stephen [et al.] // *Crop Protection*. – 2015. – Vol. 73, N 8. – P. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
3. Овсянкина, А. В. Корневые гнили зерновых / А. В. Овсянкина // Теория и практика борьбы с паразитарными болезнями. – 2012. – № 13. – С. 300–303.
4. Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: A review / G. D. Gikas [et al.] // *Sustainability*. – 2022. – Vol. 14, N 7. – P. 1050–1073. <https://doi.org/10.3390/su14074056>
5. Wu, H. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance / H. Wu, Z. Li // *Crop*. – 2022. – Vol. 10, N 1. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>
6. Воздействие наноразмерного селена на возбудитель кольцевой гнили и картофель *in vitro* / И. А. Граскова [и др.] // *Химия раст. сырья*. – 2019. – № 3. – С. 345–354.
7. Datnoff, L. E. The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance / L. E. Datnoff, K. W. Seebold, F. J. Correa-V // *Studies Plant Sci*. – 2001. – Vol. 8, N 1. – P. 171–184.
8. Wang, H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: comparison with selenomethionine in mice / H. Wang, J. Zhang, H. Yu // *Free Radic. Biol. Med*. – 2007. – Vol. 42, N 10. – P. 1524–1533. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013>
9. Smart pH responsive system based on hybrid mesoporous silica nanoparticles for delivery of fungicide to control *Fusarium* crown and root rot in tomato / M. A. Mosa [et al.] // *Plant Pathol*. – 2022. – Vol. 104, N 7. – P. 979–992. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01122-1>
10. Effect of silicon and fungicide on photosynthetic responses in barley leaves challenged by *Bipolaris sorokiniana* / T. M. Holz [et al.] // *Physiol. Mol. Plant Pathol*. – 2022. – Vol. 120. – P. 101849. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2022.101849>
11. Cooke, J. The functional ecology of plant silicon: geoscience to genes / J. Cooke, J. L. DeGabriel, S. E. Hartley // *York Environmental Sustainability Institute*. – 2016. – Vol. 30, N 8. – P. 1270–1276. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12711>
12. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.) / A. Faride [et al.] // *Plant Physiol. Biochem*. – 2018. – Vol. 127. – P. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
13. Институт экспериментальной ботаники НАН Беларуси [Электронный ресурс] // Гербарий Института экспериментальной ботаники НАН Беларуси. – Минск, 2022. – Режим доступа: <https://herbarium-msk.botany.by/коллекция-грибов/>. – Дата доступа: 15.08.2022.
14. Институт микробиологии Национальной академии наук Беларуси [Электронный ресурс] // Каталог Белорусской коллекции непатогенных микроорганизмов. – Минск, 2022. – Режим доступа: [https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous\\_fungi/Bipolaris/sorokiniana/БИМ\\_F-464.html](https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous_fungi/Bipolaris/sorokiniana/БИМ_F-464.html). – Дата доступа: 15.08.2022.
15. Morphological and molecular variation between *Fusarium avenaceum*, *Fusarium arthrosporioides* and *Fusarium anguioides* strains / Y. Mattila [et al.] // *Pathogens*. – 2018. – Vol. 7, N 4. – Art. 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens7040094>
16. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. – М. : Стандартинформ, 2011. – 31 с.
17. Рокицкий, П. Ф. Биологическая статистика / П. Ф. Рокицкий. – Минск : Высш. шк., 1973. – 320 с.
18. Азизбекян, С. Г. Исследование эффективности микроудобрений на основе наночастиц биоэлементов / С. Г. Азизбекян, А. Р. Набиуллин, В. И. Домаш // *Нанотехника*. – 2012. – № 4. – С. 70–71.
19. Морфология и биологическая активность наносистем на основе наночастиц селена / С. В. Валуева [и др.] // *Нанотехника*. – 2012. – № 4. – С. 53–58.
20. Азизбекян, С. Г. Наноплант – новое отечественное микроудобрение / С. Г. Азизбекян, В. И. Домаш // *Наше сельское хозяйство. Агрономия*. – 2015. – № 7. – С. 68–72.
21. Yurkevich, E. S. Study of toxicological properties of microfertilizers Nanoplant in experiments *in vitro* / E. S. Yurkevich, M. V. Anisovich, S. G. Azizbekyan // *Bionanotox 2018: 9th International congress “Biomaterials and Nanobiomaterials: Recent Advances Safety – Toxicology and Ecology Issues”*, May 06–13, 2018, Heraklion, Greece. – P. 45–46.
22. Study of the toxicological properties of microfertilizers / M. M. Vasilyeva [et al.] // *Publ. Health Toxicol*. – 2021. – P. 24. <https://doi.org/10.18332/pht/142259>
23. Anisovich, M. I. Investigation of the change in the toxicological properties of microelements in the synthesis of nanofertilizer / M. I. Anisovich // *NanoTox 2018: 9th International conference on nanotoxicology “New tools in risk assessment of nanomaterials”*, September 18–21, 2018, Neuss, Germany. – 2018. – P. 97.
24. Межгосударственный стандарт. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – М. : Стандартинформ, 2007. – 7 с.
25. The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress / M. T. El-Saadony [et al.] // *Saudi J. Biol. Sci*. – 2021. – Vol. 28, N 8. – P. 4461–4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>
26. Kalboush, Z. A. Biogenic silica nanoparticles, synthesis, characterization and antifungal activity against two rice pathogenic fungi / Z. A. Kalboush, W. E. Gabr, A. A. Hassan // *Egypt. J. Agric. Res*. – 2017. – Vol. 95, N 2. – P. 543–558. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2017.148458>

27. Асанова, А. А. Изменение ростовых показателей овса посевного *Avena sativa* под воздействием наночастиц диоксида титана и кремния / А. А. Асанова, В. И. Полонский // Вестн. Красноярск. гос. аграр. ун-та. – 2019. – № 8. – С. 3–9.
28. Ростостимулирующая активность нанокмозитов селена в природных полимерных матрицах при прорастании семян культурных растений / В. Н. Нурминский [и др.] // Докл. Рос. акад. наук. науки о жизни. – 2020. – Т. 495, № 1. – С. 607–611.
29. Биологические эффекты наночастиц селена и селенита натрия на клеточные культуры многоколосника морщинистого / А. А. Кузовкова [и др.] // Факторы экспериментальной эволюции организмов: сб. науч. тр. / НАН Украины, Укр. о-во генетиков и селекционеров им. Н. И. Вавилова. – Киев, 2013. – Т. 12. – С. 260–264.
30. Бруй, И. Г. Нанозащита от стрессов / И. Г. Бруй, С. Г. Азизбеян, В. И. Домаш // Наше сельск. хоз-во. – 2018. – № 7. – С. 58–61.
31. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth / V. D. Rajput [et al.] // *Biology*. – 2021. – Vol. 10, N 8. – Art. 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
32. The influence of silicon oxide nanoparticles on morphometric parameters of monocotyledons and dicotyledons in soil and climatic conditions of Western Siberia, as well as on microbiological soil properties / N. Tereshchenko [et al.] // *BioNanoScience*. – 2017. – Vol. 7. – P. 703–711. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0419-x>
33. Немцова, Е. В. Влияние аморфного диоксида кремния и его золя на параметры роста некоторых зерновых культур / Е. В. Немцова // Ежегодник НИИ фонд. и прикл. исслед. – 2018. – № 1. – С. 41–44.
34. Немцова, Е. В. Влияние диоксида кремния «Ковелос-сорб» на параметры роста *Rhododendron Roseum* (Loisel.) Rehder в культуре *in vitro* / Е. В. Немцова, А. В. Харин, И. А. Разлуга // Вестн. Нижегород. гос. ун-та. – 2020. – № 1. – С. 48–55.
35. Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. / A. M. El-Badri [et al.] // *J. Nanobiotech.* – 2022. – Vol. 20, N 1. – P. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01370-4>
36. Effect of fluoride and cadmium stress on the uptake and translocation of fluoride and cadmium and other mineral nutrition elements in radish in single element or cotaminated sizerow / Y. Chen [et al.] // *Environment. Experim. Botany*. – 2017. – Vol. 134. – P. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.002>
37. Шелепова, О. В. Агроэкологическое значение фтора / О. В. Шелепова, Ю. А. Потатуева // *Агрехимия*. – 2003. – № 9. – С. 78–87.

## References

1. Savary S., Ficke A., Aubertot J. N., Clayton H. Crop losses due to diseases and their implications for global food production losses and food security. *Food Security*, 2012, vol. 4, no. 11, pp. 519–537. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0200-5>
2. Wegulo S. N., Baenziger P. S., Nopso J. H., Bockus W. W., Hallen-Adams H. Management of Fusarium head blight of wheat and barley. *Crop Protection*, 2015, vol. 73, no. 8, pp. 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2015.02.025>
3. Ovsyankina A. V. Root rot of grain. *Teoriya i praktika bor'by s parazitarnymi boleznyami* [Theory and practice of combating parasitic diseases], 2012, no. 13, pp. 300–303 (in Russian).
4. Gikas G. D., Parlakidis P., Mavropoulos T., Vryzas Z. Particularities of fungicides and factors affecting their fate and removal efficacy: a review. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 7, pp. 1050–1073.
5. Wu H., Li Z. Recent advances in nano-enabled agriculture for improving plant performance. *Crop*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.06.002>
6. Graskova I. A., Perfil'eva A. I., Nozhkina O. A., D'yakova A. V., Nurminskii V. N., Klimentov I. V. [et al.]. The effect of nanoscale selenium on the causative agent of ring rot and potatoes *in vitro*. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 2019, no. 3, pp. 345–354 (in Russian).
7. Datnoff L. E., Seebold K. W., Correa-V F. J. Chapter 10 The use of silicon for integrated disease management: reducing fungicide applications and enhancing host plant resistance. *Studies in Plant Science*, 2001, vol. 8, no. 1, pp. 171–184.
8. Wang H., Zhang J., Yu H. Elemental selenium at nano size possesses lower toxicity without compromising the fundamental effect on selenoenzymes: comparison with selenomethionine in mice. *Free Radical Biology and Medicine*, 2007, vol. 42, no. 10, pp. 1524–1533. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2007.02.013>
9. Mosa M. A., El-Abeid S. E., Khalifa M. A., Elsharouny T. H., El-Baz S. M., Ahmed A. Y. Smart pH responsive system based on hybrid mesoporous silica nanoparticles for delivery of fungicide to control Fusarium crown and root rot in tomato. *Plant Pathology*, 2022, vol. 104, no. 7, pp. 979–992. <https://doi.org/10.1007/s42161-022-01122-1>
10. Holz T. M., Dorneles K. R., Brunetto A. E., Segundo J. B. M., Delevatti H. A., Souza G. M., Dallagnol L. J. Effect of silicon and fungicide on photosynthetic responses in barley leaves challenged by *Bipolaris sorokiniana*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2022, vol. 120, pp. 101–149. <https://doi.org/10.1016/j.pmp.2022.101849>
11. Cooke J., DeGabriel J. L., Hartley S. E. The functional ecology of plant silicon: geoscience to genes. *York Environmental Sustainability Institute*, 2016, vol. 20, pp. 15–30. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12711>
12. Faride A., Majd A., Jonoubi P., Najafi F. Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, vol. 127, pp. 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
13. Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus. *Herbarium of the Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus*. Available at: <https://herbarium-msk.botany.by/collection-mushrooms> (accessed 08.15.2022) (in Russian).

14. Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus. *Catalog of the Belarusian collection of non-pathogenic microorganisms*. Available at: [https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous\\_fungi/Bipolaris/sorokiniana/BIM\\_F-464.html](https://mbio.bas-net.by/bim/ru/filamentous_fungi/Bipolaris/sorokiniana/BIM_F-464.html) (accessed 08.15.2022) (in Russian).
15. Mattila Y., Hussien T., Gavrilova O., Gagkaeva T. Morphological and molecular variation between *Fusarium avenaceum*, *Fusarium arthrosporioides* and *Fusarium anguioides* strains. *Pathogens*, 2018, vol. 7, no. 4, art. 94. <https://doi.org/10.3390/pathogens7040094>
16. *Interstate standard. Seeds of agricultural crops. Germination methods*. Moscow, Standartinform Publ., 2011. 31 p. (in Russian).
17. Rokitskii P. F. *Biological statistics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1973. 320 p. (in Russian).
18. Azizbekyan S. G., Nabiullin A. R., Domash V. I. Study of the effectiveness of microfertilizers based on nanoparticles of bioelements. *Nanotekhnika [Nanotechnology]*, 2012, no. 4, pp. 70–71 (in Russian).
19. Valueva S. V., Azizbekyan S. G., Kuchinskii M. P., Nabiullin A. R., Sukhanova T. E. Morphology and biological activity of nanosystems based on selenium nanoparticles. *Nanotekhnika [Nanotechnology]*, 2012, no. 4, pp. 53–58 (in Russian).
20. Azizbekyan S. G., Domash V. I. Nanoplant – a new domestic microfertilizer. *Nashe sel'skoe khozyaistvo. Agronomiya [Our agriculture. Agronomy]*, 2015, no. 7, pp. 68–72 (in Russian).
21. Yurkevich E. S., Anisovich M. V., Azizbekyan S. G. Study of toxicological properties of microfertilizers Nanoplant in experiments in vitro. *Bionanotox 2018: 9th International congress "Biomaterials and Nano-biomaterials: Recent Advances Safety – Toxicology and Ecology Issues"*, May 06–13, 2018, Heraklion, Greece, 2018, pp. 45–46.
22. Vasilyeva M. M., Ilykova I. I., Anisovich M. V., Hamolka T. N., Azizbekyan S. G., Yurkevich H. S., Ioda V. I. Study of the toxicological properties of microfertilizers. *Public Health Toxicology*, 2021, p. 24. <https://doi.org/10.18332/pht/142259>
23. Anisovich M. I. Investigation of the change in the toxicological properties of microelements in the synthesis of nanofertilizer. *NanoTox 2018: 9th International conference on nanotoxicology "New tools in risk assessment of nanomaterials"*, September 18–21, 2018, Neuss, Germany, 2018, p. 97.
24. *Interstate standard. Harmful substances. Classification and general safety requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 7 p. (in Russian).
25. El-Saadony M. T., Saad A. M., Najjar A. A., Alzahrani S. O., Alkhatib F. M., Shafi M. E. [et al.]. The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2021, vol. 28, no. 8, pp. 4461–4471. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.04.043>
26. Kalboush Z. A., Gabr W. E., Hassan A. A. Biogenic silica nanoparticles, synthesis, characterization and antifungal activity against two rice pathogenic fungi. *Egyptian Journal of Agricultural Research*, 2017, vol. 95, no. 2, pp. 543–558. <https://doi.org/10.21608/EJAR.2017.148458>
27. Asanova A. A., Polonskii V. I. Changes in growth indicators of avena sativa under the influence of titanium dioxide and silicon dioxide nanoparticles. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University]*, 2019, no. 8, pp. 3–9 (in Russian).
28. Nurminskii V. N., Perfil'eva A. I., Kapustina I. S., Graskova I. A., Sukhov B. G., Trofimov B. A. Growth-stimulating activity of selenium nanocomposites in natural polymer matrices during the germination of seeds of cultivated plants. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk. Nauki o zhizni [Reports of the Russian Academy of Sciences. Life Sciences]*, 2020, vol. 1, no. 495, pp. 607–611 (in Russian).
29. Kuzovkova A. A., Mazur T. V., Azizbekyan S. G., Reshetnikov V. N. biological effects of selenium and sodium selenite nanoparticles on cell cultures of polygonum rugosa. *Fakty eksperimental'noi evolyucii organizmov: sb. nauch. tr. [Factors of experimental evolution of organisms: collection of scientific papers]*. Kiev, Logos, 2013, no. 12, pp. 260–264 (in Russian).
30. Brui I. G., Azizbekyan S. G., Domash V. I. Nanoprotection against stress. *Nashe sel'skoe khozyaistvo [Our agriculture]*, 2018, no. 7, pp. 58–61 (in Russian).
31. Rajput V. D., Minkina T., Feizi M., Kumari A., Khan M., Mandzhieva S. [et al.]. Effects of silicon and silicon-based nanoparticles on rhizosphere microbiome, plant stress and growth. *Biology*, 2021, vol. 10, no. 8, art. 791. <https://doi.org/10.3390/biology10080791>
32. Tereshchenko N., Zmeeva O., Makarov B., Kravets A., Svetlichny V., Lapin I., Zotikova A., Petrova L., Yunusova T. The influence of silicon oxide nanoparticles on morphometric parameters of monocotyledons and dicotyledons in soil and climatic conditions of Western Siberia, as well as on microbiological soil properties. *BioNanoScience*, 2017, vol. 7, pp. 703–711. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0419-x>
33. Nemtsova E. V., Kharin A. V., Razlugo I. A., Vykhor' T. P. Influence of amorphous silicon dioxide and its sol on the growth parameters of some grain crops. *Ezhegodnik NII fundamental'nykh i prikladnykh issledovaniy [Yearbook of the Research Institute of Fundamental and Applied Research]*, 2018, no. 1, pp. 41–44 (in Russian).
34. Nemtsova E. V., Kharin A. V., Razlugo I. A. Influence of silicon dioxide "Kovelos-sorb" on the growth parameters of *Rhododendron Roseum* (Loisel.) Rehder in *in vitro* culture. *Vestnik Nizhnevartovskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Nizhnevartovsk State University]*, 2020, no. 1, pp. 48–55 (in Russian).
35. El-Badri A. M., Hashem A. M., Batool M., Sherif A., Nishawy E., Ayaad M. [et al.]. Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. *Journal of Nanobiotechnology*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1186/s12951-022-01370-4>



36. Chen Y., Wang S., Nan Z., Ma J., Zhang F., Li Y., Zhang Q. Effect of fluoride and cadmium stress on the uptake and translocation of fluoride and cadmium and other mineral nutrition elements in radish in single element or cotaminated sierozem. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, vol. 134, pp. 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.11.002>

37. Shelepova O. V., Potatueva Yu. A. Agro-ecological significance of fluorine. *Agrokimiya* [Agrochemistry], 2003, no. 9, pp. 78–87 (in Russian).

### Информация об авторах

*Курнушко Анна Сергеевна* – мл. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: annkurnushko@mail.ru

*Скуратович Татьяна Александровна* – канд. биол. наук, вед. науч. сотрудник. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 2200072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: tskuratovich@yandex.by

*Бекиш Юлия Николаевна* – канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: ybekish81@gmail.com

*Азизбекян Сергей Гургенович* – ст. науч. сотрудник. Институт физико-органической химии НАН Беларуси (ул. Сурганова, 13, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: s.az@mail.ru

*Молчан Ольга Викторовна* – канд. биол. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт экспериментальной ботаники им. В. Ф. Купревича НАН Беларуси (ул. Академическая, 27, 220072, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga\_molchan@mail.ru

### Information about the authors

*Anna S. Kurnushko* – Junior Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 2200072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: annkurnushko@mail.ru

*Tatiana A. Skuratovich* – Ph. D. (Biol.), Leading Researcher. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 2200072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tskuratovich@yandex.by

*Yuliya N. Bekish* – Ph. D. (Chem.), Senior Researcher. Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ybekish81@gmail.com

*Siarhei G. Azizbekyan* – Senior Researcher. Institute of Physical and Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (13, Surganov Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: s.az@mail.ru

*Olga V. Molchan* – Ph. D. (Biol.), Associate Professor, Head of the Laboratory. V. F. Kuprevich Institute of Experimental Botany of the National Academy of Sciences of Belarus (27, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga\_molchan@mail.ru