



УДК 57.017.64

DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2020.32.3>

Влияние нанокompозита селена и арабиногалактана на колонизацию растений картофеля *in vitro* возбудителем кольцевой гнили

А. И. Перфильева¹, О. А. Ножкина¹, И. А. Граскова¹, Н. С. Забанова^{1,2},
И. В. Клименков^{2,3}, Г. П. Александрова⁴, Б. Г. Сухов⁴

¹Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Иркутский институт химии им. А. Е. Фаворского СО РАН, г. Иркутск, Россия

E-mail: pavnatser@mail.ru

Аннотация. В рамках исследований воздействия нановеществ на рост и развитие растений изучено влияние химически синтезированного нанокompозитного соединения селена (6,4 %) со стабилизирующим природным полимером арабиногалактаном (НК Se/Ag) на процессы колонизации растений картофеля *in vitro* возбудителем кольцевой гнили – грамположительной бактерией *Clavibacter sepedonicus* (Cms) (штамм Ac-1405). Оценено влияние НК Se/Ag на интенсивность заражения возбудителем тканей корня и разных зон вегетативной части растений картофеля, определена динамика синтеза активных форм кислорода (АФК) и образования продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в тканях растения. Впервые с применением сканирующей микроскопии визуализированы бактерии Cms в тканях растений картофеля *in vitro*.

Ключевые слова: картофель, нанокompозит, селен, *Clavibacter sepedonicus*, перекисное окисление липидов, колонизация, сканирующая электронная микроскопия.

Для цитирования: Влияние нанокompозита селена и арабиногалактана на колонизацию растений картофеля *in vitro* возбудителем кольцевой гнили / А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, И. А. Граскова, Н. С. Забанова, И. В. Клименков, Г. П. Александрова, Б. Г. Сухов // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2020. Т. 32. С. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2020.32.3>

Введение

Нанотехнологии активно внедряются в различные аспекты человеческой деятельности. С учётом того, что современные климатические изменения приводят к расширению ареала многих фитопатогенов на северные и восточные территории [Ayliffe, Sørensen, 2019; Newbery, Qi, Fitt, 2016], разработки новых агентов для защиты растений являются актуальными. С целью решения этой задачи рассматривается возможность применения нановеществ [Нанотехнологии и пестициды ... , 2019]. В литературе встречаются разнообразные сведения о влиянии препаратов, содержащих наночастицы (НЧ), на растения. Как правило, исследования проводят на НЧ металлов. Например, имеются данные о положительном воздействии НЧ серебра на

рост и развитие растений [Yan, Chen, 2019; Soybean interaction with ... , 2019]. Показано, что влияние НЧ оксида цинка на растения зависит от концентрации. Низкие концентрации НЧ ZnO (10 и 25 мг/л) усиливают прорастание семян и улучшают рост рассады *Vicia faba*, в то время как более высокие концентрации (100 и 200 мг/л) обладают фитотоксичностью. Этот эффект объясняют увеличением митотического индекса, значительными нарушениями клеточного цикла, а также изменением экспрессии генов, кодирующих ферменты [Youssef, Elamawi, 2018]. НЧ оксида церия являются стабильными и нерастворимыми в биологических системах и, вероятно, поэтому были обнаружены только в корнях растений, что было показано на соевых бобах *Glycine max*. Зафиксировано как положительное, так и отрицательное влияние НЧ CeO₂, действующих либо в качестве антиоксиданта, либо в качестве производителя АФК в тканях растений сои. В экспериментах с репой *Brassica rapa* показано, что реакция растения на НЧ CeO₂ варьирует в зависимости от размера частиц и стадии роста растительного организма [Cerium oxide nanoparticles ... , 2016]. НЧ железа, например Fe₂O₃, обладали, как правило, положительно влияли на прирост биомассы растений [Effects of nano-iron ... , 2010] и содержание хлорофилла [Sheykhbaglou, Sedghi, Fathi-Achachlouie, 2018]. В исследованиях на пшенице показано, что для НЧ CuO проявляется бóльшая токсичность у частиц меньшего размера [Fate of CuO ... , 2013]. Было выявлено, что НЧ CuO вызывают окислительный стресс [Effects of copper ... , 2018]. Известно, что НЧ CuO индуцируют повреждение ДНК у сельскохозяйственных растений и растений, произрастающих на полях и лугах [Copper oxide nanoparticle ... , 2012]. Эти НЧ вызывают у растений ингибирование прорастания семян (ячмень, килантро, огурец, салат, рис), уменьшение размеров корней и проростков (люцерна, морковь, соя, пшеница, хлопок), снижение интенсивности процессов фотосинтеза и дыхания (кукуруза, томаты), а также морфологические и ферментативные изменения в тканях растений (рис, соя, пшеница) [Effects of copper ... , 2018].

Исследования НЧ неметаллов в качестве стимуляторов роста и развития растений представляют очевидный интерес. Большинство имеющихся работ, посвященных действию наноселена, свидетельствуют о его положительном влиянии на растения. Так, показано, что экзогенное опрыскивание наноселеном растений базилика *Ocimum basilicum* L., например, НЧ селена, также повышает его антиоксидантный потенциал [The modified qualities ... , 2015], усиливает рост растений табака *Nicotiana tabacum* L. [Effects of selenium ... , 2015] и арахиса *Arachis hypogaea* L. [Evaluation of cytotoxicity ... , 2019]. Предполагают, что увеличение роста высших растений после воздействия на них НЧ селена происходит благодаря повышению продуктивности фотосинтеза [Selenium improves photosynthesis ... , 2015]. Показано также изменение жирно-кислотного профиля липидов в клетках растений под влиянием НЧ селена [Evaluation of cytotoxicity ... , 2019].

Ранее нами исследовался ряд нанокompозитов (НК) селена и серебра в нативных матрицах в качестве агентов для регуляции численности фитопа-

тогенных бактерий [Synthesis of selenium ... , 2018; Silver-containing nanocomposites ... , 2018; The biological activity ... , 2019]. Изученные НК представляют собой НЧ селена или серебра, стабилизированные природными полимерами (арабиногалактаном, выделенным из древесины лиственницы сибирской *Larix sibirica*, картофельным крахмалом, каррагинаном, гуминовыми кислотами). В качестве фитопатогена использовали грамположительную бактерию *Clavibacter sepedonicus* (*Cms*), вызывающую кольцевую гниль картофеля [Eichenlaub, Gartemann, 2011; Re-classification of *Clavibacter* ... , 2018]. Высокой антибактериальной активностью по отношению к *Cms* характеризовался наноккомпозит селена и арабиногалактана НК Se/Ag с содержанием селена 6,4 % [Synthesis of selenium ... , 2018; Development of antimicrobial ... , 2017]. Кроме того, этот НК не оказывал негативного воздействия на растения картофеля при визуальном наблюдении в динамике [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Наноккомпозиты селена ... , 2019]. Однако детально влияние НК Se/Ag на взаимодействие картофеля с бактерией *Cms* пока оставалось невыясненным.

Цель настоящей работы – изучить влияние НК селена на основе арабиногалактана с высоким содержанием НЧ селена (6,4 %) на колонизацию растений картофеля *in vitro* возбудителем кольцевой гнили *Clavibacter sepedonicus*.

Материалы и методы

Синтез НК Se/Ag проводили в водном растворе арабиногалактана путём создания НЧ селена методом окисления пероксидом водорода бис(2фенилэтил)диселенофосфината натрия. Содержание Se в НК составило 6,4 %. Подробно процесс синтеза описан ранее [Антиоксидантное средство ... , 2015¹; Конфокальная микроскопия ... , 2015; Nanobiosocomposite based ... , 2015]. Для экспериментов, представленных в настоящей работе, использовали водный раствор наноккомпозита, в котором содержание селена составляло 0,000625 %.

В экспериментах использовали растения картофеля *in vitro* сорта Лукьяновский, восприимчивого к *Cms* [The role of ... , 1999]. Микрклональное размножение пробирочных растений осуществляли с помощью черенкования на агаризованной питательной среде Мурасиге – Скуга (Sigma, США). Растения культивировали в факторостатных условиях в течение 20 сут. при 26 °С и освещённости 5–6 кЛк.

Использовали штамм возбудителя кольцевой гнили картофеля *Cms* Ac-1405 (получен из Всероссийской коллекции микроорганизмов, г. Пущино). Бактерии *Cms* выращивали на среде с глюкозой, пептоном и дрожжевым экстрактом (GPY) [Roopen, van Vuurde, 1991; Analysis of the ... , 1993].

¹ Антиоксидантное средство с гепатопротекторным эффектом на основе наноструктурированного селена и способы его получения и применения: пат. Рос. Федерации 2557992 / Карлова Е. А., Сухов Б. Г., Колесникова Л. И., Власов Б. Я., Артемьев А. В., Лесничая М. В., Погодаева Н. Н., Ильина О. П., Сайванова С. А., Кузнецов С. В., Трофимов Б. А.; заявл. 30.12.2013; опубл. 27.07.2015.

Определение содержания первичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) – диеновых конъюгатов (ДК) в тканях картофеля проводили по методике Ю. А. Владимирова и А. И. Арчакова [1972] с использованием гексана и изопропанола непосредственно сразу и спустя 15, 30 и 60 мин после внесения раствора НК Se/Ag в среду роста картофеля *in vitro*.

Интенсивность колонизации растений картофеля определяли с помощью микробиологических высевов. В среду инкубации растений картофеля вносили НК Se/Ag, через 1 ч заражали *Cms* путём внесения 1 мл бактериальной суспензии (титр $4 \cdot 10^9$ КОЕ/мл) в 10 мл среды роста картофеля. Растения инкубировали 2 сут. в факторостатных условиях. Далее растения стерилизовали 10 мин в растворе 10%-ного гипохлорита натрия с добавлением двух капель детергента «Твин-80» (Sigma, США), трижды промывали стерильной водой. Затем растения делили на зоны: корни, стебель, верхушечная зона. Каждую пробу отдельно растирали, полученный гомогенат многократно разбавляли и высевали на среду YPGA. Чашки инкубировали при температуре 26 °C в темноте 7 сут., далее определяли количество колониеобразующих единиц (КОЕ).

Образцы растительной ткани исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Quanta 200 (FEI Company, США) с предварительным напылением слоя золота на вакуумной напылительной установке SCD-004 (Balzers, Швейцария).

Полученные данные подвергали статистической обработке с использованием программы MS Excel 2010.

Результаты и обсуждение

Ранее нами было показано, что НК Se/Ag не только не оказывает негативного эффекта на биометрические показатели растений картофеля, как здорового, так и инфицированного *Cms*, но даже стимулирует прирост растений, образование листьев, а также биомассу корней [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Наноконпозиты селена ... , 2019]. Однако взаимодействие картофеля и *Cms* при влиянии НК недостаточно исследовано в деталях. Известно, что селен играет важную роль для растений в качестве микроэлемента. Он является кофактором ферментов, участвующих в важнейших клеточных и организменных процессах, кроме того, задействован в регуляции ответов клетки на стрессовые воздействия [A critical review ... , 2018]. При избытке в растительном организме селен способен замещать серу в некоторых ферментах. Такие события приводят к нарушениям в структуре аминокислот, а соответственно, и белков, снижению активности ферментов, нарушению синтеза хлорофилла и глутатиона, а также усилению ассимиляции нитратов [Gupta, Gupta, 2017].

На первом этапе исследований, представленных в настоящей работе, мы изучили влияние НК Se/Ag на содержание ДК. Было обнаружено, что количество ДК в тканях корня возрастало в течение периода наблюдения (1 ч), в тканях стебля их содержание не изменялось по сравнению с контролем (рис. 1).

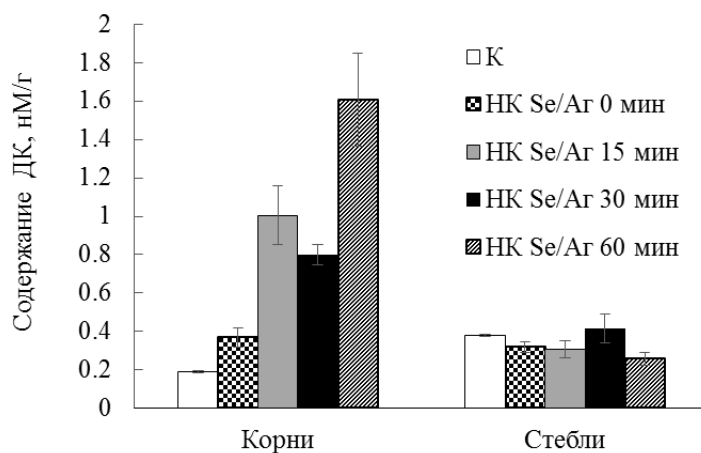


Рис. 1. Содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях картофеля *in vitro* при воздействии НК Se/Ag. К – контроль. Представлены средние значения \pm стандартное отклонение, $n = 3$

Сразу же после внесения НК отмечалось незначительное повышение уровня ДК в тканях корня картофеля. Спустя 15 мин после внесения НК в среду роста растений содержание ДК в тканях корня увеличивалось в 5 раз по сравнению с контролем. Спустя 30 мин с момента обработки НК количество ДК в корнях было соизмеримо с их уровнем после 15 мин с момента обработки. Еще большее увеличение содержания ДК в тканях корня (в 8 раз по сравнению с контролем) отмечалось спустя 1 ч после внесения НК в среду роста растений. Вероятно, в течение часа с момента внесения НК содержание АФК в клетках корня картофеля росло. Такое событие способно спровоцировать биохимическое повреждение клеток – ПОЛ.

Содержание продуктов ПОЛ некоторые исследователи предлагают применять как характеристику оценки степени повреждения клеток растений при стрессе [Петухов, Христин, Петухова, 2018]. Кроме того, АФК являются сигнальными молекулами и активируют защитные программы растительной клетки при стрессах различной природы [Liebthal, Dietz, 2017; Reactive oxygen species... , 2017; Noctor, Reichheld, Foyer, 2018]. Действительно, ранее нами было показано, что НК Se/Ag увеличивает содержание АФК в тканях корня картофеля, как зараженного *Cms*, так и свободного от инфекции [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Наноконпозиты селена ... , 2019].

Полученные данные свидетельствуют о способности НК Se/Ag изменять течение биохимических процессов в клетках растения. Повышенное содержание АФК в картофеле может ингибировать колонизацию растений патогеном. Это предположение было проверено с помощью высевов растительного гомогената из различных зон картофеля (корни, стебли, верхушечная зона) на питательную среду. Растения картофеля обрабатывали НК, инкубировали 1 ч, поскольку за это время возрастает уровень АФК в

тканях картофеля. Далее растения заражали *Sms* и спустя 2 сут. коинкубации после полной колонизации патогеном [Перфильева, Рымарева, 2013] осуществляли микробиологические высевы гомогената, полученного из тканей картофеля. Выявлено, что в растениях, заражённых *Sms* и не обработанных НК, численность бактерий (число КОЕ) в тканях корня и стебля была весьма высокой, соотносимой со значениями для бактерий, высеянных из среды культивирования картофеля. В верхушечной зоне таких растений бактерии находились в меньшем количестве (рис. 2). В варианте обработки картофеля НК с последующим заражением *Sms* обнаружено, аналогично предыдущему варианту, высокое значение числа КОЕ в пробах из среды культивирования, зоны корней и стеблей картофеля. Однако высевы гомогената из верхушечной зоны содержали вчетверо меньшее количество бактерий по сравнению с растениями, не подвергнутыми обработке НК.

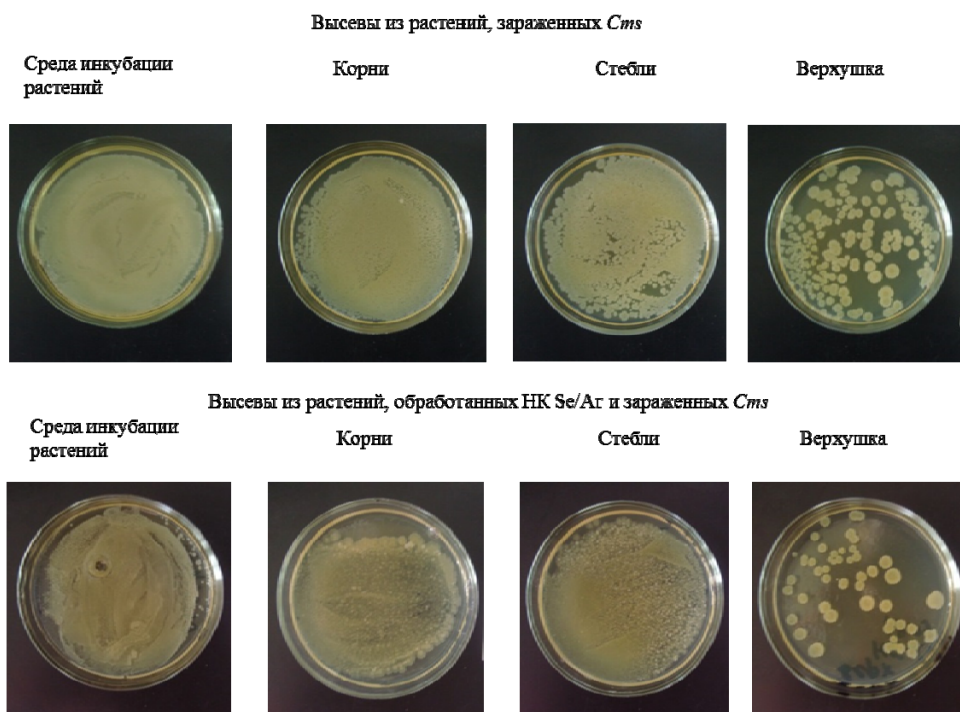


Рис. 2. Результаты микробиологических высевов бактерий *Sms* из растений картофеля, обработанных НК Se/Ag и заражённых возбудителем кольцевой гнили

При помощи СЭМ были визуализированы бактерии *Sms* в тканях растений картофеля *in vitro*, заражённых возбудителем кольцевой гнили и обработанных НК (рис. 3). Бактерии в большом количестве наблюдались в тканях из корневой зоны растений вне зависимости от обработок. В тканях корня наблюдалось многочисленное скопление бактерий, одинарных и парно соединённых клеток. При исследовании стеблей выяснилось, что наибольшее количество бактерий наблюдалось в зоне вблизи междоузлий.

Там встречались преимущественно одинарные клетки бактерий. В листьях чётко визуализировались одиночные палочковидные бактерии *Cms* и V-образно соединённые клетки, что является идентификационным признаком этого микроорганизма.

Ранее нами было показано, что НК Se/Ag демонстрирует положительный эффект, повышая прирост даже у зараженных растений картофеля. При этом не наблюдалось «эффекта вытягивания» растений. Первые две недели коинкубации НК Se/Ag стимулировал образование листьев как у заражённых, так и у здоровых растений. Наноккомпозит увеличивал как образование корней (в среднем на 35 % по сравнению с контролем), так и прирост надземной части у здорового картофеля по сравнению с контролем. Заражение растений бактерией *Cms* значительно снижало исследуемые показатели, однако обработка НК Se/Ag уменьшала негативное влияние заражения на массу корней и вегетативной части растений [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Наноккомпозиты селена ... , 2019]. Визуально растения, подвергнутые обработке НК, выглядели более жизнеспособными. Кроме того, ранее полученные нами результаты свидетельствуют о наличии бактерицидного, бактериостатического и антибиопленочного эффектов НК Se/Ag по отношению к *Cms* [Development of antimicrobial ... , 2017; Synthesis of selenium ... , 2018; Наноккомпозиты селена ... , 2019].

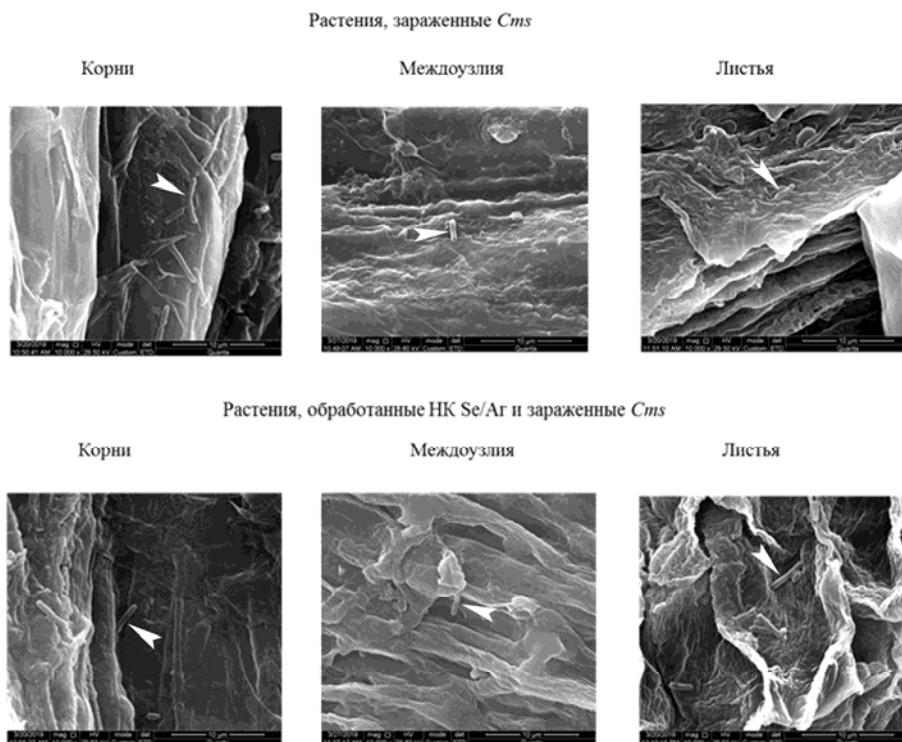


Рис. 3. Бактерии *Cms* (обозначены стрелкой) в тканях растений картофеля, заражённых возбудителем кольцевой гнили и обработанных НК Se/Ag. СЭМ, увеличение в 10 тыс. раз

Результаты колонизации растений патогеном демонстрируют, что в эксперименте с описанными условиями обработка НК существенно не влияет на количество бактерий внутри картофеля. Вероятно, после внесения бактериальной суспензии в среду роста картофеля, где находился НК, погибли не все бактерии *Sms*. По-видимому, часть бактерий из инокулята проникла в корни, откуда они начали распространяться с током ксилемы, активно колонизируя растение. Обработка НК снижает интенсивность колонизации растений только в верхушечной зоне: вероятно, титр проникших в неё микроорганизмов ниже и против такого количества *Sms* растение сохраняет способность бороться. НК Se/Ag способствует этому процессу благодаря повышению иммунного статуса растений. При этом картина патогенеза менее выражена, растения выглядят жизнеспособными и даже имеют повышенную биомассу, что является важным для картофеля.

Заключение

Результаты исследования демонстрируют способность нанокompозита Se/Ag вызывать биохимические изменения в растительных клетках. В частности, обработка им растений приводит к повышению содержания АФК и, как следствие, увеличению содержания продуктов ПОЛ. Вероятно, благодаря этим эффектам НК Se/Ag способен активировать защитные механизмы растений для борьбы со стрессом. Обработка НК в целом не повлияла на картину распространения патогена по растению, хотя интенсивность колонизации *Sms* верхушечной зоны оказалась ниже, чем у необработанных растений. Это, вероятно, свидетельствует о том, что сила воздействия НК Se/Ag на колонизировавший растение патоген зависит от концентрации последнего.

Работа выполнена с использованием коллекций ЦКП «Биоресурсный центр» СИФИБР СО РАН и оборудования ЦКП «Ультрамикроанализ» ЛИИ СО РАН. Исследование поддержано программой грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых учёных – кандидатов наук (проект № МК-1220.2019.11).

Список литературы

Владимиров Ю. А., Арчаков А. И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М. : Наука, 1972. 252 с.

Воздействие наноразмерного селена на возбудитель кольцевой гнили и картофель *in vitro* / И. А. Граскова, А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, А. В. Дьякова, В. Н. Нурминский, И. В. Клименков, А. П. Судаков, Т. М. Бородина, Г. П. Александрова, М. В. Лесничая, Б. Г. Сухов, Б. А. Трофимов // Химия растительного сырья. 2019. № 3. С. 345–354.

Конфокальная микроскопия в изучении влияния оригинальных проферментных наногликоконъюгатов элементного селена на регенерацию опорных тканей / И. А. Шурьгина, Л. В. Родионова, М. Г. Шурыгин, Б. Г. Сухов, С. В. Кузнецов, Л. Г. Попова, Н. Н. Дремина // Известия РАН. Серия физическая. 2015. Т. 79, № 2. С. 280–282. <https://doi.org/10.7868/S0367676515020271>

Нанокompозиты селена с полисахаридными матрицами стимулируют рост картофеля *in vitro*, инфицированного возбудителем кольцевой гнили / А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, И. А. Граскова, А. В. Дьякова, А. Г. Павлова, Г. П. Александрова,

Б. Г. Сухов, Б. А. Трофимов // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489, № 3. С. 325–330. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893325-330>

Нанотехнологии и пестициды (дайджест публикаций за 2011–2017 гг.) / С. Г. Жемчужин, Ю. Я. Спиридонов, И. Ю. Клейменова, Г. С. Босак // Агрехимия. 2019. № 5. С. 89–96.

Перфильева А. И., Рымарева Е. В. Действие моноацетата натрия на колонизацию растений картофеля *in vitro* возбудителем кольцевой гнили // Защита и карантин растений. 2013. № 3. С. 49–50.

Петухов А. С., Хритохин Н. А., Петухова Г. А. Перекисное окисление липидов в клетках растений в условиях городской среды // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26, № 1. С. 82–90. <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-82-90>

A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health / Natasha, M. Shahid, N. K. Niazi, S. Khalid, B. Murtaza, I. Bibi, M. I. Rashid // Environ. Pollut. 2018. Vol. 234. P. 915–934. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.019>

Analysis of the toxicity of purothionins and hordothionins for plant pathogenic bacteria / D. E. Florack, B. Visser, P. M. de Vries, J. W. L. van Vuurde, W. J. Stiekema // Neth. J. Plant Pathol. 1993. Vol. 99, N 5–6. P. 259–268.

Ayliffe M., Sørensen C. K. Plant nonhost resistance: paradigms and new environments // Curr. Opin. Plant. Biol. 2019. Vol. 50. P. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.03.011>

Cerium oxide nanoparticles and bulk cerium oxide leading to different physiological and biochemical responses in *Brassica rapa* / X. Ma, Q. Wang, L. Rossi, W. Zhang // Environ. Sci. Technol. 2016. Vol. 50. P. 6793–6802. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04111>

Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models / D. H. Atha, H. Wang, E. J. Petersen, D. Cleveland, R. D. Holbrook, P. Jaruga, M. Dizdaroglu, B. Xing, B. C. Nelson // Environ. Sci. Technol. 2012. Vol. 46. P. 1819–1827. <https://doi.org/10.1021/es202660k>

Development of antimicrobial nano-selenium biocomposite for protecting potatoes from bacterial phytopathogens / A. I. Perfilova, S. M. Moty'leva, K. Yu. Arsent'ev, I. V. Klimenkov, I. A. Graskova, B. G. Sukhov, B. A. Trofimov // Nanotechnologies in Russia. 2017. Vol. 12, N 8–9. P. 90–95.

Effects of copper nanoparticles (CuO NPs) on crop plants: A mini review / V. D. Rajput, T. Minkina, S. Suskova, S. Mandzhieva, V. Tsitsuashvili, V. Chaplugin, A. Fedorenko // BioNanoScience. 2018. Vol. 8. P. 36–42. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0466-3>

Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean / R. Sheykhbaglou, M. Sedghi, M. T. Shishevan, R. S. Sharifi // Not. Sci. Biol. 2010. Vol. 2. P. 112–113.

Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) / C. Jiang, C. Zu, J. Shen, F. Shao, T. Li // Acta. Soc. Bot. Pol. 2015. Vol. 84. P. 71–77. <https://doi.org/10.5586/asbp.2015.006>

Eichenlaub R., Gartemann K. H. The *Clavibacter michiganensis* subspecies: molecular investigation of gram-positive bacterial plant pathogens // Annu. Rev. Phytopathol. 2011. Vol. 49. P. 445–464. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095258>

Evaluation of cytotoxicity, biochemical profile and yield components of groundnut plants treated with nano-selenium / H. A. Hussein, O. M. Darwesh, B. B. Mekki, S. M. El-Hallouty // Biotechnol. Rep. (Amst). 2019. Vol. 12, N 24. P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00377>

Fate of CuO and ZnO nano- and microparticles in the plant environment / C. O. Dimkpa, D. E. Latta, J. E. McLean, D. W. Britt, M. I. Boyanov, A. J. Anderson // Environ. Sci. Technol. 2013. Vol. 47. P. 4734–4742. <https://doi.org/10.1021/es304736y>

Gupta M., Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants // Front. Plant. Sci. 2017. Vol. 7. P. 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>

Liebthal M., Dietz K. J. The fundamental role of reactive oxygen species in plant stress response // *Methods in Molecular Biology*. 2017. Vol. 1631. P. 23–39. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7136-7_2

Nanobiocomposite based on selenium and arabinogalactan: Synthesis, structure, and application / L. V. Rodionova, I. A. Shurygina, B. G. Sukhov, L. G. Popova, M. G. Shurygin, A. V. Artem'ev, N. N. Pogodaeva, S. V. Kuznetsov, N. K. Gusarova, B. A. Trofimov // *Russ. J. Gen. Chem.* 2015. Vol. 85. P. 485–487. <https://doi.org/10.1134/S1070363215020218>

Newbery F., Qi A., Fitt B. D. Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications // *Curr. Opin. Plant. Biol.* 2016. Vol. 32. P. 101–109. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.07.002>

Noctor G., Reichheld J.-P., Foyer C. H. ROS-related redox regulation and signaling in plants // *Semin. Cell Dev. Biol.* 2018. Vol. 80. P. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.semdb.2017.07.013>

Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination / F. K. Choudhury, R. M. Rivero, E. Blumwald, R. Mittler // *Plant J.* 2017. Vol. 90. N 5. P. 856–867. <https://doi.org/10.1111/tpj.13299>

Re-classification of *Clavibacter michiganensis* subspecies on the basis of whole-genome and multi-locus sequence analyses / X. Li, J. Tambong, K. X. Yuan, W. Chen., H. Xu, C. A. Lévesque, S. H. De Boer // *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.* 2018. Vol. 68. N 1. P. 234–240. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002492>

Roozen N. J. M., van Vuurde J. W. L. Development of a semi-selective medium and an immunofluorescence colonystaining procedure for the detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* in cattle manure slurry // *Neth. J. Plant Pathol.* 1991. Vol. 97, N 5. P. 321–334.

Selenium improves photosynthesis and protects photosystem II in pear (*Pyrus bretschneideri*), grape (*Vitis vinifera*), and peach (*Prunus persica*) / T. Feng, S. Chen, D. Gao, G. Liu, H. Bai, A. Li, L. Peng, Z. Ren // *Photosynthetica*. 2015. Vol. 53. P. 609–612. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0118-1>

Sheykhbaglou R., Sedghi M., Fathi-Achachlouie B. The effect of ferrous nano-oxide particles on physiological traits and nutritional compounds of soybean (*Glycine max* L.) seed // *An. Acad. Bras. Cienc.* 2018. Vol. 90. P. 485–494. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820160251>

Silver-containing nanocomposites of humic substances, agents for healing of potatoes from the ring rot / I. A. Graskova, A. I. Perfilieva, O. A. Nozhkina, B. G. Sukhov, G. P. Aleksandrova, B. A. Trofimov // *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 2018. Vol. 483. P. 321–324. <https://doi.org/10.1134/S0012496618060078>

Soybean interaction with engineered nanomaterials: A literature review of recent data / V. Coman, I. Oprea, L. F. Leopold, D. C. Vodnar, C. Coman // *Nanomaterials*. 2019. Vol. 9, N 9. P. 1248. <https://doi.org/10.3390/nano9091248>

Synthesis of selenium and silver nanobiocomposites and their influence on phytopathogenic bacterium *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* / A. I. Perfilieva, O. A. Nozhkina, I. A. Graskova, A. V. Sidorov, M. V. Lesnichaya, G. P. Aleksandrova, G. Dolmaa, I. V. Klimenkov, B. G. Sukhov // *Russ. Chem. Bull.* 2018. Vol. 67. P. 157–163.

The biological activity of a selenium nanocomposite encapsulated in carrageenan macromolecules with respect to ring rot pathogenesis of potato plants / O. A. Nozhkina, A. I. Perfilieva, I. A. Graskova, A. V. Dyakova, V. N. Nurminsky, I. V. Klimenkov, T. V. Ganenko, T. N. Borodina, G. P. Aleksandrova, B. G. Sukhov, B. A. Trofimov // *Nanotechnologies in Russia*. 2019. Vol. 14, N 5–6. P. 74–81.

The modified qualities of basil plants by selenium and/or ascorbic acid / Z. O. Ardebili, N. O. Ardebili, S. Jalili, S. Safiallah // *Turk. J. Bot.* 2015. Vol. 39. P. 401–407. <https://doi.org/10.3906/bot-1404-20>

The role of extracellular pH-homeostasis in potato resistance to ring-rot pathogen / A. S. Romanenko, A. A. Riffel, I. A. Graskova, M. A. Rachenko // *Phytopathol.* 1999. Vol. 147, N 11–12. P. 679–686. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.1999.00450.x>

Yan A., Chen Z. Impacts of silver nanoparticles on plants: A focus on the phytotoxicity and underlying mechanism // *Int. J. Mol. Sci.* 2019. Vol. 20, N 5. P. 1003. <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>

Youssef M. S., Elamawi R. M. Evaluation of phytotoxicity, cytotoxicity, and genotoxicity of ZnO nanoparticles in *Vicia faba* // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. Vol. 27. P. 1–13. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3250-1>

Effect of Selenium-Arabinogalactan Nanocomposite on the Colonization of Potato Plants *in vitro* by the Ring Rot Pathogen

A. I. Perfilova¹, O. A. Nozhkina¹, I. A. Graskova¹, N. S. Zabanova^{1,2}, I. V. Klimenkov^{2,3}, G. P. Aleksandrova⁴, B. G. Sukhov⁴

¹*Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation*

³*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

⁴*A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

Abstract. It has been previously shown that the chemically synthesized nanocomposite of selenium with arabinogalactan (NC Se/AG) is characterized by antibacterial effect upon the agent of ring rot – gram-positive bacterium *Clavibacter sepedonicus* (*Cms*), with the NC Se/AG having no negative effect on potato plants. In the present paper, it has been found that, 1 hour after the treatment of the NC Se/AG, a substantial elevation of lipid peroxidation products was observed in potato root tissues. This supports earlier results on the increase in reactive oxygen species (ROS) production in potato root tissues under the influence of NC Se/AG. It is proposed that the increased ROS content in potato may inhibit pathogen colonization of plants. This has been tested by seeding homogenised plant tissues of various potato zones (roots, stems, shoot apex zone) onto the nutrient medium. In plants infected with *Cms* and untreated with the NC, the number of colony forming units (CFUs) of *Cms* has been shown to be numerous both in potato culture medium and in root and stem tissues. In shoot apex zone of such plants, it has been revealed, bacteria also present, but in smaller quantities. Similar data have been obtained by seeding homogenised tissues from roots and stems of potato plants treated with the NC followed by infection with *Cms*. However, seeding from shoot apex zones of the plants has been given 4 times less CFUs than from potato plants not treated with the NC. The effect of the NC Se/AG upon the pathogen colonization of plants appears to depend on the titre of the microorganism. In shoot apex zone of plants, characterized with small number of CFUs of *Cms*, the pathogen growth has been decreased. For the first time, *Cms* bacteria in potato plant tissues *in vitro* have been visualized with the aid of scanning microscopy.

Keywords: Potato, nanocomposite, selenium, *Clavibacter sepedonicus*, lipid peroxidation, colonization, scanning electron microscopy.

For citation: Perfilova A.I., Nozhkina O.A., Graskova I.A., Zabanova N.S., Klimenkov I.V., Aleksandrova G.P., Sukhov B.G. Effect of Selenium-Arabinogalactan Nanocomposite on the Colonization of Potato Plants *in vitro* by the Ring Rot Pathogen. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2020, vol. 32, pp. 3–17. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2020.32.3> (in Russian)

References

- Vladimirov Yu.A., Archakov A.I. *Perekisnoe okislenie lipidov v biologicheskikh membranakh* [Lipid peroxidation in biological membranes]. Moscow, Nauka Publ., 1972, 252 p. (in Russian).
- Graskova I.A., Perfil'eva A.I., Nozhkina O.A., D'yakova A.V., Nurminskii V.N., Klimenkov I.V., Sudakov A.P., Borodina T.M., Aleksandrova G.P., Lesnichaya M.V., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Vozdeistvie nanorazmernogo selena na vzbuditel' kol'tsevoi gnili i kartofel' in vitro [The effect of nanoscale selenium on the causative agent of ring rot and potato in vitro]. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya* [Chemistry of plant raw material], 2019, no. 3, pp. 345-354. (in Russian).
- Shurygina I.A., Rodionova L.V., Shurygin M.G., Sukhov B.G., Kuznetsov S.V., Popova L.G., Dremina N.N. Konfokal'naya mikroskopiya v izuchenii vliyaniya original'nykh profermentnykh nanoglikokon"yugatov elementnogo selena na regeneratsiyu opornykh tkanei [Confocal microscopy in studying the effect of original proenzyme nanoglycoconjugates of elemental selenium upon the regeneration of supporting tissues]. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2015, vol. 79, no. 2, pp. 280-282. <https://doi.org/10.7868/S0367676515020271> (in Russian).
- Perfil'eva A.I., Nozhkina O.A., Graskova I.A., D'yakova A.V., Pavlova A.G., Aleksandrova G.P., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Nanokompozity selena s polisaharidnymi matritsami stimuliruyut rost kartofelya in vitro, infitsirovannogo vzbuditelem kol'tsevoi gnili [Selenium nanocomposites having polysaccharid matrices stimulate growth of potato plants in vitro infected with ring rot pathogen]. *Doklady Biological Sciences*, 2019, vol. 489, no. 3, pp. 325-330. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524893325-330> (in Russian)
- Zhemchuzhin S.G., Spiridonov Yu.Ya., Kleimenova I.Yu., Bosak G.S. Nanotekhnologii i pestitsidy (daidzhest publikatsii za 2011–2017 gg.) [Nanotechnology and pesticides (digest of publications for 2011–2017)]. *Agrokimiya*, 2019, no. 5, pp. 89-96. (in Russian).
- Perfil'eva A.I., Rymareva E.V. Deistvie monoiodatsetata natriya na kolonizatsiyu rastenii kartofelya in vitro vzbuditelem kol'tsevoi gnili. *Zashchita i karantin rastenii* [Protection and Quarantine of Plants], 2013, no. 3 pp. 49-50. (in Russian).
- Petukhov A.S., Khritokhin N.A., Petukhova G.A. Perekisnoe okislenie lipidov v kletkakh rastenii v usloviyakh gorodskoi sredy [Lipid peroxidation in plant cells in urban environments]. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2018, vol. 26, no. 1, pp. 82-90. (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2313-2310-2018-26-1-82-90>
- Natasha, Shahid M., Niazi N. K., Khalid S., Murtaza B., Bibi I., Rashid M. I. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human. *Environ. Pollut.*, 2018, vol. 234, pp. 915-934. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.019>
- Florack D.E., Visser B., de Vries P.M., van Vuurde J.W.L., Stiekema W.J. Analysis of the toxicity of purothionins and hordothionins for plant pathogenic bacteria. *Neth. J. Plant Pathol.*, 1993, vol. 99, no. 5-6, pp. 259-268.
- Ayliffe M., Sørensen C. K. Plant nonhost resistance: paradigms and new environments. *Curr. Opin. Plant. Biol.*, 2019, vol. 50, pp. 104-113. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2019.03.011>
- Ma X., Wang Q., Rossi L., Zhang W. Cerium oxide nanoparticles and bulk cerium oxide leading to different physiological and biochemical responses in Brassica rapa. *Environ. Sci. Technol.*, 2016, vol. 50, pp. 6793-6802. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04111>
- Atha D.H., Wang H., Petersen E.J., Cleveland D., Holbrook R.D., Jaruga P., Dizdaroglu M., Xing B., Nelson B.C. Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environ. Sci. Technol.*, 2012, vol. 46, pp. 1819-1827. <https://doi.org/10.1021/es202660k>
- Perfileva A.I., Motyleva S.M., Arsenyev K.Yu., Klimenkov I.V., Graskova I.A., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Development of antimicrobial nano-selenium biocomposite for protecting potatoes from bacterial phytopathogens. *Nanotechnologies in Russia*, 2017, vol. 12, no. 8-9, pp. 90-95.

Rajput V.D., Minkina T., Suskova S., Mandzhieva S., Tsitsuashvili V., Chaplygin V., Fedorenko A. Effects of copper nanoparticles (CuO NPs) on crop plants: A mini review. *BioNanoScience*, 2018, vol. 8, pp. 36-42. <https://doi.org/10.1007/s12668-017-0466-3>

Sheykhbaglou R., Sedghi M., Shishevan M.T., Sharifi R.S. Effects of nano-iron oxide particles on agronomic traits of soybean. *Not. Sci. Biol.*, 2010, vol. 2, pp. 112-113.

Jiang C., Zu C., Shen J., Shao F., Li T. Effects of selenium on the growth and photosynthetic characteristics of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). *Acta. Soc. Bot. Pol.*, 2015, vol. 84, pp. 71-77. <https://doi.org/10.5586/asbp.2015.006>

Eichenlaub R., Gartemann K.H. The *Clavibacter michiganensis* subspecies: molecular investigation of gram-positive bacterial plant pathogens. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 2011, vol. 49, pp. 445-464. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-072910-095258>

Hussein H.A., Darwesh O.M., Mekki B.B., El-Hallouty S.M. Evaluation of cytotoxicity, biochemical profile and yield components of groundnut plants treated with nano-selenium. *Biotechnol. Rep. (Amst)*, 2019, vol. 12, no. 24, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00377>

C.O. Dimkpa, D.E. Latta, J.E. McLean, D.W. Britt, M.I. Boyanov, A.J. Anderson Fate of CuO and ZnO nano- and microparticles in the plant environment. *Environ. Sci. Technol.*, 2013, vol. 47, pp. 4734-4742. <https://doi.org/10.1021/es304736y>

Gupta M., Gupta S. An overview of selenium uptake, metabolism, and toxicity in plants. *Front. Plant. Sci.*, 2017, vol. 7, pp. 1-14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02074>

Liebthal M., Dietz K.J. The fundamental role of reactive oxygen species in plant stress response. *Methods Mol. Biol.*, 2017, vol. 1631, pp. 23-39. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-7136-7_2

Rodionova L.V., Shurygina I.A., Sukhov B.G., Popova L.G., Shurygin M.G., Artem'ev A.V., Pogodaeva N.N., Kuznetsov S.V., Gusarova N.K., Trofimov B.A. Nanobiocomposite based on selenium and arabinogalactan: Synthesis, structure, and application. *Russ. J. Gen. Chem.*, 2015, vol. 85, pp. 485-487. <https://doi.org/10.1134/S1070363215020218>

Newbery F., Qi A., Fitt B.D. Modelling impacts of climate change on arable crop diseases: progress, challenges and applications. *Curr. Opin. Plant. Biol.*, 2016, vol. 32, pp. 101-109. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2016.07.002>

Noctor G., Reichheld J.-P., Foyer C. H. ROS-related redox regulation and signaling in plants. *Semin. Cell Dev. Biol.*, 2018, vol. 80, pp. 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013>

Choudhury F.K., Rivero R.M., Blumwald E., Mittler R. Reactive oxygen species, abiotic stress and stress combination. *Plant J.*, 2017, vol. 90, no. 5, pp. 856-867. <https://doi.org/10.1111/tj.13299>

Li X., Tambong J., Yuan K.X., Chen W., Xu H., Lévesque C.A., De Boer S.H. Re-classification of *Clavibacter michiganensis* subspecies on the basis of whole-genome and multi-locus sequence analyses. *Int. J. Syst. Evol. Microbiol.*, 2018, vol. 68, no. 1, pp. 234-240. <https://doi.org/10.1099/ijsem.0.002492>

Roozen N.J.M., van Vuurde J.W.L. Development of a semi-selective medium and an immunofluorescence colonystaining procedure for the detection of *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* in cattle manure slurry. *Neth. J. Plant Pathol.*, 1991, vol. 97, no. 5, pp. 321-334.

Feng T., Chen S., Gao D., Liu G., Bai H., Li A., Peng L., Ren Z. Selenium improves photosynthesis and protects photosystem II in pear (*Pyrus bretschneideri*), grape (*Vitis vinifera*), and peach (*Prunus persica*). *Photosynthetica*, 2015, vol. 153, pp. 609-612. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0118-1>

Sheykhbaglou R., Sedghi M., Fathi-Achachlouie B. The effect of ferrous nano-oxide particles on physiological traits and nutritional compounds of soybean (*Glycine max* L.) seed. *An. Acad. Bras. Cienc.*, 2018, vol. 90, pp. 485-494. <http://dx.doi.org/10.1590/0001-3765201820160251>

Graskova I.A., Perfilieva A.I., Nozhkina O.A., Sukhov B.G., Aleksandrova G.P., Trofimov B.A. Silver-containing nanocomposites of humic substances, agents for healing of pota-

toes from the ring rot. *Doklady Biochemistry and Biophysics*, 2018, vol. 483, pp. 321-324. <https://doi.org/10.1134/S0012496618060078>

Coman V., Oprea I., Leopold L.F., Vodnar D.C., Coman C. Soybean interaction with engineered nanomaterials: A literature review of recent data. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, no. 9, p. 1248. <https://doi.org/10.3390/nano9091248>

Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Graskova I.A., Sidorov A.V., Lesnichaya M.V., Aleksandrova G.P., Dolmaa G., Klimenkov I.V., Sukhov B.G. Synthesis of selenium and silver nanobiocomposites and their influence on phytopathogenic bacterium *Clavibacter michiganensis* subsp. *Sepedonicus*. *Russ. Chem. Bull.*, 2018, vol. 67, pp. 157-163.

Nozhkina O.A., Perfileva A.I., Graskova I.A., Dyakova A.V., Nurminsky V.N., Klimenkov I.V., Ganenko T.V., Borodina T.N., Aleksandrova G.P., Sukhov B.G., Trofimov B.A. The biological activity of a selenium nanocomposite encapsulated in carrageenan macromolecules with respect to ring rot pathogenesis of potato plants. *Nanotechnologies in Russia*, 2019, vol. 14, no. 5-6, pp. 74-81.

Ardebili Z.O., Ardebili N.O., Jalili S., Safiallah S. The modified qualities of basil plants by selenium and/or ascorbic acid. *Turk. J. Bot.*, 2015, vol. 39, pp. 401-407. <https://doi.org/10.3906/bot-1404-20>

Romanenko A.S., Riffel A.A., Graskova I.A., Rachenko M.A. The role of extracellular pH-homeostasis in potato resistance to ring-rot pathogen. *Phytopathol.*, 1999, vol. 147, no. 11-12, pp. 679-686. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0434.1999.00450.x>

Yan A., Chen Z. Impacts of silver nanoparticles on plants: A focus on the phytotoxicity and underlying mechanism. *Int. J. Mol. Sci.*, 2019, vol. 20, no. 5, p. 1003. <https://doi.org/10.3390/ijms20051003>

Youssef M. S., Elamawi R. M. Evaluation of phytotoxicity, cytotoxicity, and genotoxicity of ZnO nanoparticles in *Vicia faba*. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2018, vol. 27, pp. 1-13. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-018-3250-1>

Перфильева Алла Иннокентьевна
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 132
e-mail: alla.light@mail.ru

Perfileva Alla Innokent'evna
Candidate of Science (Biology),
Senior Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: alla.light@mail.ru

Ножкина Ольга Александровна
аспирант
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 132
e-mail: smallolga@mail.ru

Nozhkina Olga Aleksandrovna
Graduate Student
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: smallolga@mail.ru

Граскова Ирина Алексеевна
доктор биологических наук,
главный научный сотрудник
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонто-
ва, 132
e-mail: graskova@sifibr.irk.ru

Graskova Irina Alekseevna
Doctor of Sciences (Biology),
Chief Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: graskova@sifibr.irk.ru

Забанова Наталья Сергеевна
кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник
Сибирский институт физиологии
и биохимии растений СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 132
доцент

Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: pavnatser@mail.ru

Zabanova Natalya Sergeevna
Candidate of Science (Biology),
Senior Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Assistant Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: pavnatser@mail.ru

Клименков Игорь Викторович
доктор биологических наук,
ведущий научный сотрудник
Лимнологический институт СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Улан-Баторская, 3
доцент

Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: iklimen@mail.ru

Klimenkov Igor' Viktorovich
Doctor of Sciences (Biology),
Leading Research Scientist
Limnological Institute SB RAS
3, Ulan-Batorskaya st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Assistant Professor
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: iklimen@mail.ru

Александрова Галина Петровна
кандидат химических наук,
старший научный сотрудник
Иркутский институт химии
им. А. Е. Фаворского СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Фаворского, 1
e-mail: alexa@irioch.irk.ru

Alexandrova Galina Petrovna
Candidate of Science (Chemistry),
Senior Research Scientist
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
SB RAS
1, Favorsky st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: alexa@irioch.irk.ru

Сухов Борис Геннадьевич
кандидат химических наук,
ведущий научный сотрудник
Иркутский институт химии
им. А. Е. Фаворского СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Фаворского, 1
e-mail: sukhov@irioch.irk.ru

Sukhov Boris Gennadyevich
Candidate of Science (Chemistry)
Leading Research Scientist
A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry
SB RAS
1, Favorsky st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: sukhov@irioch.irk.ru