Серия «Биология. Экология»
2024. Т. 50. С. 12–27
Онлайн-доступ к журналу:
http://izvestiabio.isu.ru/ru

ИЗВЕСТИЯ
Иркутского государственного университета

Научная статья

УДК 577.2
https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.50.12

Влияние селенсодержащих нанокомпозитов в природных полимерных матрицах на продуктивность картофеля в условиях полевого эксперимента

А. И. Перфильева, И. А. Граскова*

Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия
E-mail: alla.light@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты пятилетних полевых испытаний по влиянию нанокомпозитов селена (НК Se) в матрицах на основе трёх различных природных полимеров (арабиногалактан, крахмал, каррагинан) на продуктивность картофеля. Эффективность предпосевной обработки клубней НК Se проанализирована по показателям продуктивности (средняя масса клубня и количество клубней, полученных с растения в конце вегетации), а также доле в структуре урожая хозяйственно важных (товарных и семенных) и поражённых гнилями клубней. Обсуждается влияние межгодовой специфики климатических условий разных вегетационных сезонов на эффективность применения НК.

Ключевые слова: картофель, полевой эксперимент, селен, арабиногалактан, крахмал, каррагинан, наночастицы, нанокомпозиты, биометрические характеристики, продуктивность.

Благодарности. Исследование выполнено на средства федеральной программы № FWSS-2025-0002, финансируется Минобрнауки РФ в рамках базового проекта «Роль эндо- и ризосферной микробиоты в регуляции адаптационного потенциала растений».

Для цитирования: Перфильева А. И., Граскова И. А. Влияние селенсодержащих нанокомпозитов в природных полимерных матрицах на продуктивность картофеля в условиях полевого эксперимента // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2024. Т. 50. С. 12–27. https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.50.12

Research article

Effect of Selenium-Containing Nanocomposites in Natural Polymer Matrices on Potato Productivity Under Field Experiment Conditions

A. I. Perfileva, I. A. Graskova*

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

Abstract. Field trials were conducted to study the effect of selenium nanocomposites (NC Se) in natural polymer matrices on potato productivity. Gala potato tubers were sprayed with selenium NC 2 weeks before planting: arabinogalactan-based (NC Se/AG), starch-based (NC Se/St) and carrageenan-based (NC Se/Car). The tubers were then planted in natural field conditions. Standard agrotechnical methods of potato cultivation were used during the growing season. After 90 days of vegeta-

© Перфильева А. И., Граскова И. А., 2024

*Полные сведения об авторах см. на последней странице статьи.
For complete information about the authors, see the last page of the article.

tion, productivity was analyzed based on the following indicators: average tuber weight and number of tubers, tubers obtained from experimental plants, crop structure and number of rotten tubers. The experiments were carried out for 5 seasons, from 2020 to 2024. The results showed that NC Se does not have a negative effect on potato productivity. In some years, an increase in productivity in the form of an increase in tuber biomass and their number was noted when treating with NC Se/AG and NC Se/Car. Thus, NC Se/AG significantly increased the number of tubers in the first and third years of testing. NC Se/St increased the number of tubers only in the second year of testing (2021). Treatment with NC Se/AG in the first, second and fifth years of testing increased the weight of potato tubers. NC Se/Car increased the weight of potato tubers in the last year of testing. When combining all the data for 5 years, it was found that only NC Se/AG had a significant stimulating effect on the average weight of a tuber obtained from one plant compared to the control. At the same time, no significant effect of NC on the number of tubers obtained from one plant was found. Every year, each NC treatment showed an increase in the yield structure of economically important tubers (commercial and seed). In 2022, the aboveground biomass of potatoes was estimated. Treatment with NC Se stimulated the number of stems in potato plants. The presented results demonstrate that the NC Se/AG nanocomposite reduced the number of rotten potato tubers. NC Se/AG can be considered as a promising compound for growth stimulation of cultivated plants and increasing resistance to phytopathogens.

Keywords: potato, field experiment, selenium, arabinogalactan, starch, carrageenan, nanoparticles, nanocomposites, biometric characteristics, productivity.

For citation: Perfileva A.I., Graskova I.A. Effect of Selenium-Containing Nanocomposites in Natural Polymer Matrices on Potato Productivity Under Field Experiment Conditions. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2024, vol. 50, pp. 12-27. https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.50.12 (in Russian)

Введение

Селен (Se) – микроэлемент, повсеместно встречающийся в окружающей среде, имеющий большое значение для здоровья человека. Он является компонентом многих важных ферментов (таких как глутатионпероксидаза, тиоредоксинредуктаза и йодтирониндейодиназа) в организме и играет жизненно важную роль в поддержании нормального метаболизма [Biological activity … , 2023, Exploring the potential … , 2023, Opportunities for the use … , 2023]. Основным источником Se для человека и животных считается растительная пища [Opportunities for the use … , 2023]. Селен как микроэлемент имеет решающее значение для поддержания физиологических процессов растений [The role … , 2023]: он стимулирует их рост, улучшает качество урожая, повышает антиоксидантную способность и оказывает благотворное влияние на устойчивость растений к различным стрессам окружающей среды, таким как холод, засуха, ультрафиолетовое излучение, засоление почвы и высокие температуры [Feng, Wei, Tu … , 2013, Uses of selenium … , 2021]. Селенсодержащие вещества активно используют в качестве удобрений для регулирования роста сельскохозяйственных культур и производства продуктов, богатых селеном. Многообещающей альтернативой традиционным неорганическим видам Se являются наночастицы Se (НЧ Se), которые обладают более высокой биодоступностью и меньшей токсичностью, чем селенат и селенит [Ferro, Florindo, Santos … , 2021; Speciation analysis ... , 2022; The role … , 2023]. Ранее было показано, что НЧ Se являются биостимуляторами, антиоксидантами и подавляют фитопатогены [Синтез нанобиокомпозитов селена ... , 2018; Selenium nanocomposites ... , 2021; Effect of nanopriming ... ,

2023; Opportunities for the use … , 2023]. Согласно нашим предыдущим данным, нанокомпозиты (НК) на основе НЧ Se оказывают бактерицидное, бактериостатическое и антибиопленочное влияние на фитопатогенные бактерии *Clavibacter sepedonicus* [Создание антимикробного наноселенового … , 2017] и *Pectobacterium carotovorum* [Effect of nanopriming ... , 2023], выраженное фунгицидное воздействие на гриб *P. phytophthora* [Effect of natural polysaccharide … , 2021]. При этом в условиях *in vitro* в этих же концентрациях НК стимулируют рост и развитие картофеля, как здорового, так и заражённого *C. sepedonicus* [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Selenium nanocomposites in ... , 2021]. Положительно повлияли НК как на внешний вид растений *in vitro* (биометрические характеристики), так и на их биохимический статус (содержание пигментов, количество активных форм кислорода, активность антиоксидантных ферментов и интенсивность перекисного окисления липидов) [Selenium nanocomposites ... , 2021]. Было показано, что после обработки растений картофеля *in vitro* (в исследуемых концентрациях) селенсодержащими нанокомпозитами Se в их тканях не накапливался [Воздействие наноразмерного селена ... , 2019; Биологическая активность нанокомпозита ... , 2019; Биологическая активность ... , 2020]. Однако при использовании наноформ Se возникает вопрос, насколько они будут эффективны в условиях полевого опыта. Часто результаты лабораторных исследований не подтверждаются в естественных условиях культивирования растений в силу влияния множественных факторов среды. В связи с этим в настоящей работе нами исследуются биологические проявления влияния химически синтезированных НК селена, представляющих собой плотно упакованные в матрицы природного происхождения (арабиногалактан, крахмал и каррагинан) НЧ Se, на продуктивность картофеля в условиях Восточной Сибири.

Материалы и методы

Нанокомпозиты селена. В исследовании использовались НК на основе арабиногалактана (НК Se/Аг, 5,92 % Se), на основе крахмала (НК Se/Кр, 1,46 % Se) и на основе каппа-каррагинана (НК Se/Кар, 3,67 % Se). Арабиногалактан (Аг) сибирской (Wood Chemistry Ltd., Россия) был получен из лиственницы и очищен от примесей и флавоноидов в полиамидной колонке. Для синтеза НК Se/Кар использовали каррагинан (Кар) (калий-натриевую соль сульфатированного ангидрополисахарида) типа WR-78 (CP Kelco ApS, Дания). Для синтеза НК Se/Кр использовали крахмал (Кр) из картофеля в качестве водорастворимого реагента (Sigma-Aldrich, США). Диоксид селена (99,8 %, Sigma-Aldrich, США) в качестве прекурсора селена и L-аскорбиновая кислота в качестве восстановителя (99,0 %, Sigma-Aldrich, США) были использованы для синтеза НК Se/Аг и НК Se/Кар. Для синтеза НК Se/Кр использованы бис(2-фенилэтил)диселенофосфинат натрия [Rapid and convenient ... , 2010] в качестве прекурсора селена и водный раствор перекиси водорода (30 %, Sigma-Aldrich, США) в качестве окислителя. Синтез НК Se/Аг и НК Se/Кар осуществляли на основе Аг (для НК Se/Аг) и Кар (для НК Se/Кар), SeO_2 и аскорбиновой кислоты при комнатной температуре.

Все полученные НК хорошо диспергировались в воде. Их водные коллоидные суспензии доводили до концентрации 0,000625 % Se (6,25 мкг/мл) и использовали в экспериментах с картофелем. Такая концентрация была выбрана на основе наших предыдущих исследований антибактериальной активности этих НК Se (показана эффективность против фитопатогенных бактерий *C. sepedonicus*) [Selenium nanocomposites ... , 2021].

В эксперименте клубни картофеля *Solanum tuberosum* L. сорта Гала весной опрыскивали водными растворами НК. Количество распылённого нанокомпозита составляло 0,105 мг/л для НК Se/Ag, 0,428 мг/л – для НК Se/Kp, и 0,170 мг/л – для НК Se/Kap, что соответствует содержанию селена 6,25 мкг/мл в конечной концентрации раствора. Клубни картофеля опрыскивали со всех сторон с помощью пульверизатора с расходом 0,4 л/т клубней. Далее клубни проращивали в темноте при комнатной температуре и через две недели высаживали в поле. Опыты закладывали на участке площадью 100 м^2 (20×5 м) вблизи г. Иркутска на типичной для юга Восточной Сибири серой лесной почве со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса – 7–8 % (С); общего азота – 0,13 %; подвижного фосфора (P_2O_5) – 159 мг/кг; обменного калия (K_2O) – 139 мг/кг; pH KCl – 5,6. В целом по плодородию почва характеризовалась как слабокислая, достаточно богатая гумусом. Почва суглинистая, сильноокультуренная, с влажностью 10 % и плотностью 1,39 г/см^3. Все опыты проводили на естественном инфекционном фоне в трёх полях по три делянки (повторности) на поле с рандомизированным планом делянок. Опытные посевы проводили в течение пяти сезонов подряд с 2020 по 2024 г. Применялись общепринятые для региона агротехнические приемы возделывания сельскохозяйственных культур: участки возделывания периодически пропалывались и окучивались без дополнительного полива и внесения удобрений в естественных условиях резко континентального климата Восточной Сибири. После окончания вегетации (90 сут) анализировали массу и количество полученных клубней с опытных растений, а также структуру урожая и количество гнилых клубней. Для определения структуры урожая клубни были ранжированы по весу согласно стандартам[1] на четыре категории: крупные клубни массой более 150 г; товарные клубни массой 85–150 г; семенные клубни – 50–80 г; 4 – мелкие клубни с массой менее 50 г.

Полученные результаты статистически обработаны с использованием программ Excel из пакета MS Office 2017 и SigmaPlot v. 12.5 (SYSTAT Software, США). Для проверки нормальности распределения данных использовался тест Шапиро – Уилка. Данные, полученные в эксперименте, статистически сравнивались с контролем с использованием непараметрического U-критерия Манна – Уитни.

[1] ГОСТ 33996-2016. Картофель семенной. Технические условия и методы определения качества. М. : Стандартинформ, 2017. 32 с.; ГОСТ 7176-2017. Картофель продовольственный. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2018. 12 с.

Результаты

На первом этапе исследования был выполнен анализ изменений показателей продуктивности картофеля при влиянии НК селена. В табл. 1 представлены результаты влияния НК селена на количество клубней, полученных с одного растения. Обнаружено, что НК Se/Аг в первый и третий годы испытаний достоверно увеличивал число клубней. НК Se/Кр увеличивал количество клубней только во второй год испытаний. Обработка НК Se/Кар оказывала неоднозначное влияние: под влиянием обработки в первый год опыта наблюдалось увеличение числа клубней, в четвёртый год – снижение, а во второй, третий и пятый годы испытаний достоверного эффекта не выявлено (табл. 1).

Таблица 1

Влияние предпосевной обработки нанокомпозитами (НК) селена на урожайность картофеля (число клубней, полученных с одного растения, M±SE)

Год	Вариант опыта			
	Контроль	НК Se/Аг	НК Se/Кр	НК Se/Кар
2020	6,4±2,3	11,0±3,1*	6,7±2,4	12,0±3,2*
2021	5,2±1,4	4,2±1,1	9,0±2,3*	7,3±1,8
2022	6,6±2,0	8,9±3,3*	9,3±4,2	7,0±2,9
2023	8,7±3,8	8,0±2,9	11,1±7,4	5,8±2,8*
2024	10,7±7,9	9,2±5,8	9,9±4,6	9,6±3,0

Примечание: * – критерий Стьюдента ($p < 0,05$).

Установлено, что обработка НК Se/Аг в первый, второй и пятый годы испытаний увеличивала массу клубней картофеля, НК Se/Кр не оказывал достоверного влияния, а НК Se/Кар увеличил показатель в пятый год испытаний, в предыдущие годы воздействия не отмечалось (табл. 2). По-видимому, выявленные различия по влиянию каждого НК на показатели продуктивности картофеля в разные годы могут быть обусловлены межгодовой разностью погодных условий.

Таблица 2

Влияние предпосевной обработки нанокомпозитами (НК) селена на урожайность картофеля (масса клубней, полученных с одного растения, медиана [$Q1$; $Q3$])

Год	Вариант опыта			
	Контроль	НК Se/Аг	НК Se/Кр	НК Se/Кар
2020	55,0 [35,0; 80,0]	75,0 [50,0; 90,0]*	65,0 [40,0; 75,0]	50,0 [45,0; 70,0]
2021	50,0 [32,5; 65,5]	32,5 [23,0; 45,3]*	44,5 [26,8; 64,8]	42,0 [18,5; 67,0]
2022	82,0 [42,3; 140,0]	78,0 [31,0; 111,0]	72,0 [44,5; 135,0]	81,5 [34,5; 130,0]
2023	42,7 [23,4; 65,7]	47,5 [22,3; 76,1]	45,2 [27,0; 61,3]	35,0 [20,7; 47,9]
2024	34,8 [23,6; 55,0]	48,8 [32,3; 67,3]*	41,7 [22,9; 59,1]	47,6 [34,3; 67,8]*

Примечание: * – критерий Краскела – Уоллиса ($p \leq 0,05$).

Анализ объединённых первичных данных за пять лет эксперимента показал, что не выявлено достоверного воздействия НК на количество клубней, полученных с одного растения (рис., *а*). НК Se/Аг оказывал достоверное

стимулирующее влияние на средний вес полученных с одного растения клубней по сравнению с контролем (рис., *б*).

Согласно данным гидрометеорологического мониторинга, в течение 2020 г. на территории Иркутской области преобладала положительная аномалия температуры воздуха [Погодные сюрпризы … , 2021]. Лето было тёплым и продолжительным, выпадение осадков в течение сезона и их распределение носили неравномерный характер: с начала второй декады июня до середины июля сохранялась аномально жаркая сухая погода, во второй же половине летнего периода отмечались частые обильные дожди.

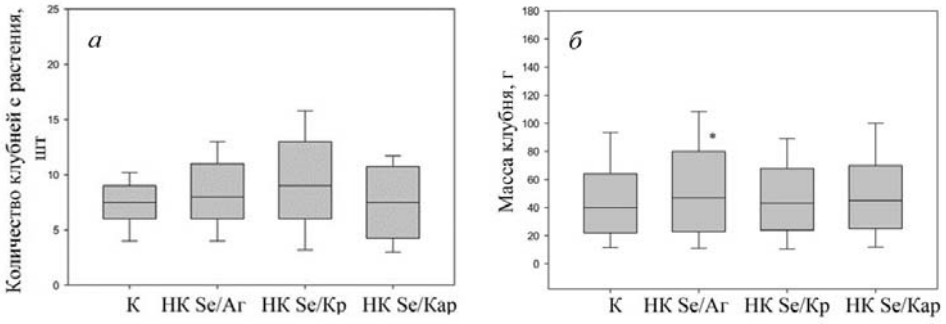

Рис. Влияние предпосевной обработки НК селена на массу клубней (*а*) и количество клубней картофеля, полученных с одного растения (*б*), по объединённым данным пятилетнего эксперимента. * – значимые различия с контролем при $p \leq 0{,}05$ на основе теста Краскела – Уоллиса

2021 г. был насыщен аномальными явлениями погоды. В отдельные периоды фиксировались рекордные значения по количеству осадков и температуре воздуха. Лето характеризовалось неблагоприятными для возделывания культурных растений погодными условиями: из-за холодной весны оно наступило на две недели позже обычного, в июне отмечены частые интенсивные дожди, июль был жарким и сухим с очень низким количеством осадков, август – дождливым и холодным. Лето 2022 г. отличалось контрастами как в температурном режиме, так и в режиме осадков, вполне нормальными для резко континентального климата. В июне количество наблюдавшихся жарких дней превышало средние многолетние данные. Июль был холодным и дождливым. Август характеризовался невысокими температурами воздуха и дождливостью. Начало лета 2023 г. характеризовалось относительно невысокими температурами, характерный для лета температурный режим сформировался только в конце июля, обусловив рекордно тёплый август. Неблагоприятными для растений факторами этим летом стали жара и повышенная влажность. В 2024 г. лето началось практически на месяц раньше календарных сроков, высокие температуры воздуха отмечались в течение всего сезона, особенно ночные температуры в июле. В середине лета отмечено повышенное количество осадков в виде гроз.

Анализ климата летних сезонов 2020–2024 гг. на территории проведения полевых экспериментов показал, что наиболее благоприятные погодные условия для возделывания картофеля наблюдались в 2020 г. Именно в этот год обработка НК Se/Аг и НК Se/Кар стимулировала увеличение и массы клубней и их числа с одного растения. В неблагоприятном для возделывания картофеля 2021 г. положительный эффект НК не проявлялся вовсе. Летом 2022 г. с контрастными погодными условиями обработка НК Se/Аг увеличивала количество клубней с одного растения.

Помимо морфометрической оценки продуктивности картофеля был также проведён клубневой анализ урожая (табл. 3).

Таблица 3

Влияние предпосевной обработки нанокомпозитами (НК) селена на структуру урожая картофеля

Категория клубней, %	Вариант опыта																			
	Контроль					НК Se/Аг					НК Se/Кр					НК Se/Кар				
	Год эксперимента																			
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Крупные	27	0,5	21	0	1	10	0	16	1	3	17,5	0,5	23	2	0	32	1	18	0	1
Товарные	35	11	30	13	14	40	9	32	17	20	33,5	11	23	13	10	36	14	35	5	18
Семенные	20	21,5	20	29	20	23	23	19	30	25	24	28	19	28	30	16,5	19	16	21	29
Мелкие	18	66	29	58	65	27	68	33	52	52	25	60,5	35	57	60	15,5	66	31	74	52

Примечание: 1 – 2020 г., 2 – 2021 г., 3 – 2022 г., 4 – 2023 г., 5 – 2024 г.

Выявлено, что обработка НК не приводила к увеличению доли мелких клубней в структуре урожая, наоборот, обработка НК Se/Аг в 2020, 2021, 2023 и 2024 гг. повышала количество товарных и семенных клубней в структуре урожая по сравнению с контролем. Число крупных клубней повышалось по сравнению с контролем под воздействием НК Se/Аг в 2024 г., НК Se/Кар – в 2020 г., НК Se/Кр – в 2021 г. Обработки также способствовали увеличению количества семенных и товарных клубней в структуре урожая. В 2024 г. количество семенных клубней по сравнению с контролем повышалось при всех типах обработок.

Анализ структуры урожая, полученного в течение пяти сезонов полевых экспериментов, продемонстрировал отсутствие негативного эффекта НК Se. Предпосадочная обработка клубней НК не увеличивала количество мелких клубней. Ежегодно каждая обработка НК показывала увеличение в структуре урожая доли хозяйственно важных клубней. Так, НК Se/Аг в 2020 и 2022 гг. увеличивал долю товарных, а в 2020 и 2021 гг. – семенных клубней. Обработка НК Se/Кр стимулировала образование семенных в 2020 и 2021 гг. и товарных клубней в 2022 г. Обработка НК Se/Кар способствовала приросту крупных клубней в структуре урожая в 2020 г. и товарных клубней в 2021 и 2022 гг. (см. табл. 1). Эффект сопровождающейся активизацией физиологических процессов стимуляции корнеобразования под влиянием НЧ уже был описан ранее [Landa … , 2021; Thiruvengadam, Chi, Kim … , 2024]. НЧ Se увеличивали биомассу корней *Melissa officinalis* [Selenium improves photosynthesis … , 2015]. Также в условиях полевого опыта было показано, что НЧ Se

способны повышать количество товарных плодов у перца чили *Capsicum annuum*, увеличивая в клетках тканей листа количество хлоропластов и толщину их тилакоидной мембраны [Synergistic influence … , 2024], а обработка НЧ Se фасоли обыкновенной *Phaseolus vulgaris* приводит к повышению веса и количества листьев с одного растения и на 30 % увеличивает количество семян [Nanofungicides with selenium … , 2023]. Опрыскивание риса *Oryza sativa* в естественных условиях вегетации НЧ Se показало рост ценности зёрен за счёт повышения содержания в них Se, Zn, Fe и белка при одновременном снижении содержания фитиновой кислоты [Mitigating cadmium exposure … , 2024]. В горшечном эксперименте продемонстрировано, что применение НЧ эпигаллокатехин галлата Se улучшает качество чая *Camellia sinensis*, снижая в его листьях содержание полифенолов и увеличивая содержание свободных аминокислот [Epigallocatechin gallate (EGCG) … , 2024]. При этом во всех указанных исследованиях было продемонстрировано снижение окислительного стресса в тканях растения под влиянием НЧ Se, повышение активности антиоксидантных ферментов и увеличение содержания фотосинтетических пигментов. Именно эти свойства НЧ Se открывают большие перспективы их использования при возделывании культурных растений [Selenium nanoparticles … , 2021].

Урожай 2021–2024 гг. был проанализирован на наличие гнилых клубней (табл. 4). Результаты показали, что в большинстве случаев гниению подвергались наиболее крупные клубни. В варианте с НК Se/Аг гнилых клубней было меньше, чем в контроле (2021, 2023, 2024 гг.), либо они отсутствовали вовсе (см. табл. 4).

Таблица 4

Доля гнилых клубней в экспериментальных урожаях картофеля, %

Год эксперимента	Вариант опыта			
	Контроль	НК Se/Аг	НК Se/Кр	НК Se/Кар
2021	20	17,5	21	28
2022	0	0	1,2	5,7
2023	25	17	4	13
2024	15	14	8	15

НК Se/Кр и НК Se/Кар способствовали увеличению доли товарных и семенных клубней в структуре урожая (см. табл. 3), при этом в 2021 и 2022 гг. число гнилых клубней в этих вариантах было больше, чем в контроле (см. табл. 4). В 2023 и 2024 гг. обработка НК Se/Кр привела к снижению количества гнилых клубней по сравнению с контролем. Такие результаты могут быть обусловлены антибактериальным и фунгицидным эффектами НЧ Se [A review … , 2023; Nano-chitosan-coated … , 2025].

В 2022 г. нами была оценена надземная биомасса растений картофеля в полевом опыте. Установлено, что обработка НК селена стимулировала количество стеблей у растений картофеля. Число веток у одного растения в контроле составляло 2,7±0,3, в варианте с НК Se/Аг – 3,1±0,3, в варианте с НК Se/Кр – 3,6±0,5, в варианте с НК Se/Кар – 3,4±0,4. В процессе вегетации ле-

том 2022 г. биомасса надземной части (число веток) у растений, выросших из обработанных клубней, оказалась выше, чем в контроле, на 15–33 %.

Стимуляция развития биомассы надземных органов под воздействием НЧ широко описана в публикациях. Увеличение надземной биомассы способствует усилению интенсивности фотосинтеза, что приводит к повышению содержания сахаров и аминокислот в тканях растений. Кроме того, повышение биомассы растений под влиянием НЧ Se может быть связано с изменением микробиома ризосферы, увеличением в нём количества бактерий группы PGPR (plant growth-promoting rhizobacteria), способствующих росту растений. Такие события положительно влияют на продуктивность растений. Использование внекорневых наноудобрений на основе Mn-Zn-Fe НЧ при посеве тыквы *Cucurbita pepo* L. приводило к повышению урожайности до 53 % по сравнению с контролем [Template-free microwave … , 2020]. Обработка семян пшеницы *Triticum aestivum* НЧ Fe_3O_4 ускоряла рост проростков благодаря повышению интенсивности фотосинтеза и дыхания, антиоксидантной активности и улучшению доступности минералов (Fe и P) [Underlying mechanisms … , 2021]. На остром перце *C. annuum* продемонстрировано, что НЧ Fe способствуют росту растений, изменяя организацию листьев и увеличивая количество хлоропластов и укладку гран, а также регулируя развитие сосудистых пучков. НЧ Fe могут поглощаться корнями, а затем транспортироваться в центральный цилиндр в биодоступных формах, где они транслоцируются и утилизируются листьями и стеблями [New insights … , 2018]. Соединения наноселена также стимулируют увеличение биомассы растений. Например, у растений *M. officinalis*, выросших после обработки НЧ Se, наблюдалась увеличенная биомасса, активация боковых почек и стимуляция развития боковых корней [Selenium improves photosynthesis … , 2015]. Показано увеличение биомассы побегов и плодов томатов *Solanum lycopersicum* под влиянием внекорневой обработки НЧ Se [Comparative efficacy … , 2020]. В другом исследовании на томатах помимо увеличения биомассы под влиянием легированных НЧ Se было обнаружено увеличение разнообразия и количества почвенных бактериальных сообществ, особенно типа *Actinobacteria*, синтезирующих ряд стимулирующих рост растений веществ [Molecular mechanisms … , 2024]. Биомасса побегов саженцев цикория обыкновенного *Cichorium intybus* повышалась при внекорневом внесении НЧ Se к растениям [Nitric oxide … , 2021]. НЧ Se в концентрациях 1 мг/л и 4 мг/л увеличивали накопление биомассы рассады горькой дыни *Momordica charantia* [Red elemental selenium … , 2020]. Исследования продемонстрировали, что опрыскивание листьев НЧ Se 3,0 и 4,5 мг/мл вызывает увеличение высоты растений у овсяницы тростниковой *Festuca arundinacea* [Nutritional parameters … , 2022]. Опрыскивание листьев пшеницы НЧ Se в условиях засоления показало повышение урожая, полученного с растения [Modulations of wheat … , 2024]. Растения рапса *Brassica napus* L., обработанные НЧ на основе селена и мелатонина, обладали увеличенной флуоресценцией хлорофилла листьев, увеличенной биомассой и сниженным количеством АФК [Mitigation effects of … , 2022]. На проростках этой же культуры показано,

что прайминг семян НЧ Se увеличивал биомассу проростков [Mitigation of the growth … , 2022]. Растения индийского тмина *Trachyspermum ammi* повышали биомассу и уровень фотосинтеза при воздействии НЧ Se [Selenium nanoparticles … , 2024]. Внекорневая подкормка коричневого риса *O. sativa* НЧ Se ускоряла рост растений и улучшала качество зерна за счёт увеличения урожайности, биомассы и содержания Se [Foliage application … , 2020].

Множество примеров положительных эффектов от применения НЧ Se порождает интерес к выявлению механизмов их влияния на растения. Предполагают, что увеличение роста высших растений под воздействием НЧ Se происходит благодаря повышению продуктивности фотосинтеза [Selenium improves photosynthesis … , 2015]. Показано также изменение жирнокислотного профиля липидов в клетках растений под влиянием НЧ Se [Evaluation of cytotoxicity … , 2019]. Кроме того, выявлено, что НЧ Se влияют на активность антиоксидантных ферментов в различных органах растения: нитратредуктазы в листьях и пероксидазы в корнях [Differential growth … , 2019].

Заключение

Результаты полевых исследований эффекта обработки клубней картофеля НК Se, представленные в данной работе, подтвердили полученные ранее *in vitro* наблюдения об отсутствии отрицательного влияния НК Se на жизнеспособность картофеля. Несмотря на то что погодные условия в сезоны проведения экспериментов не были благоприятными для возделывания картофеля, в работе были получены достоверные результаты. В отдельные годы испытаний предпосадочная обработка картофеля НК Se/Аг увеличивала количество и массу клубней, полученных с растения. Воздействие НК Se/Кр единожды за весь период испытаний повышало количество клубней. Опрыскивание клубней картофеля НК Se/Кар увеличивало массу клубней картофеля в последний год исследования. Воздействие НК на клубни перед посадкой влияло на структуру урожая, повышало количество товарных и семенных клубней по сравнению с контролем. Полученные результаты позволяют заключить, что среди использованных для предпосевной обработки НК Se наиболее эффективным для увеличения биомассы клубней картофеля за вегетационный период оказался НК Se/Аг.

Список литературы

Биологическая активность и безопасность для окружающей среды наночастиц селена, инкапсулированных в макромолекулы крахмала / А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, М. С. Третьякова, И. А. Граскова, И. В. Клименков, Н. П. Судаков, Г. П. Александрова, Б. Г. Сухов // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15, № 1. С. 108–117. https://doi.org/10.1134/S199272232001015X

Биологическая активность нанокомпозита селена, инкапсулированного в макромолекулы каррагинана, по отношению к возбудителю кольцевой гнили и растениям картофеля *in vitro* / О. А. Ножкина, А. И. Перфильева, И. А. Граскова, А. В. Дьякова, В. Н. Нурминский, И. В. Клименков, Т. В. Ганенко, Т. Н. Бородина, Г. П. Александрова, Б. Г. Сухов, Б. А. Трофимов // Российские нанотехнологии. 2019. Т. 14, № 5-6. С. 74–81.

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. P. 345–354. https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034794

Погодные сюрпризы уходящего 2021 года на территории Иркутской области // Иркутское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. 2021. URL: https://www.irmeteo.ru/index.php?id=697

Синтез нанобиокомпозитов селена и серебра и их влияние на фитопатогенную бактерию *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus* / А. И. Перфильева, О. А. Ножкина, И. А. Граскова, А. В. Сидоров, М. В. Лесничая, Г. П. Александрова, Г. Долмаа, И. В. Клименков, Б. Г. Сухов // Известия Академии наук. Серия химическая. 2018. № 1. С. 157–163.

Создание антимикробного наноселенового биокомпозита для защиты картофеля от бактериальных фитопатогенов / А. И. Перфильева, С. М. Мотылева, И. В. Клименков, И. А. Граскова, Б. Г. Сухов, Б. А. Трофимов // Российские нанотехнологии. 2017. Т. 12, № 9–10. С. 90–95.

A review of the antibacterial, fungicidal and antiviral properties of selenium nanoparticles / D. A. Serov, V. V. Khabatova, V. Vodeneev, R. Li, S. V. Gudkov // Materials (Basel). 2023. Vol. 16, N 15. Art. 5363. https://doi.org/10.3390/ma16155363

Biological activity of selenium and its impact on human health / G. Genchi, G. Lauria, A. Catalano, M. S. Sinicropi, A. Carocci // Int. J. Mol. Sci. 2023. Vol. 24, N 3. Art. 2633. https://doi.org/10.3390/ijms24032633

Comparative efficacy of selenate and selenium nanoparticles for improving growth, productivity, fruit quality, and postharvest longevity through modifying nutrition, metabolism, and gene expression in tomato; potential benefits and risk assessment / M. Neysanian, A. Iranbakhsh, R. Ahmadvand, Z. Oraghi Ardebili, M. Ebadi // PLoS One. 2020. Vol. 15, N 12. Art. e0244207. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244207

Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles / A. Babajani, A. Iranbakhsh, Z. O. Ardebili, B. Eslami // Environ. Sci. Poll. Res. 2019. Vol. 26, N 24. P. 24430–24444. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05676-z

Effect of nanopriming with selenium nanocomposites on potato productivity in a field experiment, soybean germination and viability of *Pectobacterium carotovorum* / A. I. Perfileva, A. R. Kharasova, O. A. Nozhkina, A. V. Sidorov, I. A. Graskova, K. V. Krutovsky // Horticulturae. 2023. Vol. 9. Art. 458. https://doi.org/10.3390/horticulturae9040458

Effect of natural polysaccharide matrix-based selenium nanocomposites on *Phytophthora cactorum* and rhizospheric microorganisms / A. I. Perfileva, O. M. Tsivileva, O. A. Nozhkina, M. S. Karepova, I. A. Graskova, T. V. Ganenko, B. G. Sukhov, K. V. Krutovsky // Nanomaterials. 2021. Vol. 11. Art. 2274. https://doi.org/10.3390/nano11092274

Epigallocatechin gallate (EGCG) nanoselenium application improves tea quality (*Camellia sinensis* L.) and soil quality index without losing microbial diversity: A pot experiment under field condition / X. Zhang, X. Yang, J. Ruan, H. Chen // Sci. Total Environ. 2024. Vol. 914. Art. 169923. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169923

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 (24). P. 1–7. https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00377

Exploring the potential function of trace elements in human health: a therapeutic perspective / M. R. Islam, S. Akash, M. H. Jony, M. N. Alam, F. T. Nowrin, M. M. Rahman, M. Thiruvengadam // Mol. Cell Biochem. 2023. Vol. 478. P. 2141–2171 https://doi.org/10.1007/s11010-022-04638-3

Feng R., Wei C., Tu S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses // Environ. Exp. Bot. 2013. Vol. 87. P. 58−68. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002

Ferro C., Florindo H. F., Santos H. A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: from development and characterization to therapeutics // Adv. Healthc. Mater. 2021. Vol. 10(16). Art. 2100598. https://doi.org/10.1002/adhm.202100598

Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) / B. Hussain, Q. Lin, Y. Hamid, M. Sanaullah, L. Di, M. L. U. R. Hashmi, M. B. Khan, Z. He, X. Yang // Sci. Total Environ. 2020. Vol. 712. Art. 136497. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136497

Landa P. Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms // Plant Physiol. Biochem. 2021. Vol. 161. P. 12–24. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.039

Mitigating cadmium exposure risk in rice with foliar nano-selenium: Investigations through Caco-2 human cell line *in vivo* bioavailability assay / B. Hussain, X. Yin, Q. Lin, Y. Hamid, M. Usman, M. L. Hashmi, M. Lu, M. Imran Taqi, Z. He, X. E. Yang // Environ. Pollut. 2024. Vol. 356. Art. 124356. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124356

Mitigation effects of exogenous melatonin-selenium nanoparticles on arsenic-induced stress in *Brassica napus* / M. A. Farooq, F. Islam, A. Ayyaz, W. Chen, Y. Noor, W. Hu, F. Hannan, W. Zhou // Environ. Pollut. 2022. Vol. 292 (Pt. B). Art. 118473. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118473

Mitigation of the salinity stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) productivity by exogenous applications of bio-selenium nanoparticles during the early seedling stage / A. M. El-Badri, M. Batool, I. A. A. Mohamed, Z. Wang, C. Wang, K. M. Tabl, A. Khatab, J. Kuai, J. Wang, B. Wang, G. Zhou // Environ. Pollut. 2022. Vol. 310. Art. 119815. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119815

Modulations of wheat growth by selenium nanoparticles under salinity stress / S. Zafar, Z. Hasnain, S. Danish, M. L. Battaglia, S. Fahad, M. J. Ansari, S. A. Alharbi // BMC Plant Biol. 2024. Vol. 24(1). Art. 35. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04720-6

Molecular mechanisms of growth promotion and selenium enrichment in tomato plants by novel selenium-doped carbon quantum dots / K. Yin, Q. Bao, J. Li, M. Wang, F. Wang, B. Sun, Y. Gong, F. Lian // Chemosphere. 2024. Vol. 364. Art. 143175. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143175

Nano-chitosan-coated, green-synthesized selenium nanoparticles as a novel antifungal agent against *Sclerotinia sclerotiorum*: *in vitro* study / M. M. Desouky, R. H. Abou-Saleh, T. A. A. Moussa, H. M. Fahmy // Sci. Rep. 2025. Vol. 15, N 1. Art. 1004. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79574-x

Nanofungicides with selenium and silicon can boost the growth and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and control alternaria leaf spot disease / N. A. Taha, S. Hamden, Y. A. Bayoumi, T. Elsakhawy, H. El-Ramady, S. Ø. Solberg. Microorganisms. 2023. Vol. 11(3). Art. 728. https://doi.org/10.3390/microorganisms11030728

New insights into the cellular responses to iron nanoparticles in *Capsicum annuum* / J. Yuan, Y. Chen, H. Li, J. Lu, H. Zhao, M. Liu, G. S. Nechitaylo, N. N. Glushchenko // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. Art. 3228. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w

Nitric oxide and selenium nanoparticles confer changes in growth, metabolism, antioxidant machinery, gene expression, and flowering in chicory (*Cichorium intybus* L.): potential benefits and risk assessment / S. Abedi, A. Iranbakhsh, Z. Oraghi Ardebili, M. Ebadi // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2021. Vol. 28(3). P. 3136–3148. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10706-2

Nutritional parameters, biomass production, and antioxidant activity of *Festuca arundinacea* Schreb. conditioned with selenium nanoparticles / U. González-Lemus, G. Medina-Pérez, J. J. Espino-García, F. Fernández-Luqueño, R. Campos-Montiel, I. Almaraz-Buendía, A. Reyes-Munguía, T. Urrutia-Hernández // Plants (Basel). 2022. Vol. 11(17). Art. 2326. https://doi.org/10.3390/plants11172326

Opportunities for the use of selenium nanoparticles in agriculture / J. Song, S. Yu, R. Yang, J. Xiao, J. Liu // NanoImpact. 2023. Art. 100478. https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100478

Rapid and convenient one-pot method for the preparation of alkali metal phosphinodiselenoates / A. V. Artem'ev, S. F. Malysheva, N. K. Gusarova, B. A. Trofimov // Synthesis. 2010. Vol. 14. P. 2463–2467. https://doi.org/10.1055/s-0029-1218786

Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an *in vitro* experiment / S. Rajaee Behbahani, A. Iranbakhsh, M. Ebadi, A. Majd, Z. O. Ardebili // PLoS One. 2020. Vol. 15, N 7. Art. e0235556. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235556

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

Selenium nanocomposites in natural matrices as potato recovery agent / A. I. Perfileva, O. A. Nozhkina, T. V. Ganenko, I. A. Graskova, B. G. Sukhov, A. V. Artem'ev, K. V. Krutovsky // Int. J. Mol. Sci. 2021. Vol. 22(9). Art. 4576. https://doi.org/10.3390/ijms22094576

Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: A Review / M. A. O. Dawood, M. F. E. Basuini, S. Yilmaz, H. M. R. Abdel-Latif, Z. A. Kari, M. K. A. Abdul Razab, H. A. Ahmed, M. Alagawany, M. S. Gewaily // Antioxidants (Basel). 2021. Vol. 10, N 9. Art. 1364. https://doi.org/10.3390/antiox10091364

Selenium nanoparticles induce coumarin metabolism and essential oil production in *Trachyspermum ammi* under future climate CO_2 conditions / F. A. Aloufi, H. AbdElgawad, R. F. Halawani, M. A. Balkhyour, A. H. A. Hassan // Plant Physiol Biochem. 2024. Vol. 211. Art. 108705. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108705

Speciation analysis of selenium nanoparti-cles and inorganic selenium species by dual-cloud point extraction and ICP-MS deter-mination // R. Yang, Q. Li, W. Zhou, S. Yu, J. Liu // Anal. Chem. 2022. Vol. 94(47). P. 16328−16336. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c03018

Synergistic influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation with nanoparticle foliar application enhances chili (*Capsicum annuum* L.) antioxidant enzymes, anatomical characteristics, and productivity under cold-stress conditions / E. G. Sayed, S. F. Desoukey, A. F. Desouky, M. F. Farag, R. I. El-Kholy, S. N. Azoz // Plants (Basel). 2024. Vol. 13, N 4. Art. 517. https://doi.org/10.3390/plants13040517

Template-free microwave-assisted hydrothermal synthesis of manganese zinc ferrite as a nanofertilizer for squash plant (*Cucurbita pepo* L.) / A. Shebl, A. Hassan, D. M. Salama, M. E. Abd El-Aziz, M. S. Abd Elwahed // Heliyon. 2020. Vol. 6. Art. e03596. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03596

The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review / Z. Khan, T. C. Thounaojam, D. Chowdhury, H. Upadhyaya // Plant Growth Regul. 2023. Vol. 100(2). P. 409–433. https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0

Thiruvengadam M., Chi H. Y., Kim S. H. Impact of nanopollution on plant growth, photosynthesis, toxicity, and metabolism in the agricultural sector: An updated review // Plant Physiol. Biochem. 2024. Vol. 207. Art. 108370. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108370

Underlying mechanisms responsible for restriction of uptake and translocation of heavy metals (metalloids) by selenium via root application in plants / R. Feng, L. Wang, J. Yang, P. Zhao, Y. Zhu, Y. Li, Y. Yu, H. Liu, C. Rensing, Z. Wu, R. Ni, S. Zheng // J. Hazard Mater. 2021. Vol. 15. P. 402. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123570

Uses of selenium nanoparticles in the plant production / I. Bano, S. Skalickova, H. Sajjad, J. Skladanka, P. Horky // Agronomy. 2021. Vol. 11, N 11. Art. 2229. https://doi.org/10.3390/agronomy11112229

References

Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Tretyakova M.S., Graskova I.A., Klimenkov I.V., Sudakov N.P., Alexandrova G.P., Sukhov B.G. Biological activity and environmental safety of selenium nanoparticles encapsulated in starch macromolecules. *Nanotechnologies in Russia*, 2020, vol. 15, no. 1, pp. 96-104. https://doi.org/10.1134/S1995078019030091

Nozhkina O.A., Perfileva A.I., Graskova I.A., Nurminsky V.N., Klimenkov I.V., Dyakova A.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. 255-262. https://doi.org/10.1134/s1995078019030091

Graskova I.A., Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Dyakova A.V., Nurminsky V.N., Klimenkov I.V., Sudakov N.P., Borodina T.M., Aleksandrova G.P., Lesnichaya M.V., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Effect of nanosized selenium on ring rot pathogen and potato *in vitro*. Khimiya Rastitelnogo Syr'ya, 2019, no. 3, pp. 345-354. https://doi.org/10.14258/jcprm.2019034794 (in Russian)

Pogodnye syurprizy ukhodyashchego 2021 goda na territorii Irkutskoi oblasti [Weather surprises of the outgoing year 2021 in the Irkutsk region]. Irkutsk Regional Department of Hydrometeorology and Environmental Monitoring, 2021. Available at: https://www.irmeteo.ru/index.php?id=697 (in Russian)

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, no. 1, pp. 157-163. https://doi.org/10.1007/s11172-018-2052-4

Perfileva A.I., Motyl'eva S.M., Klimenkov I.V., 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. 9-10, pp. 553-558. https://doi.org/10.1134/S1995078017050093

Serov D.A., Khabatova V.V., Vodeneev V., Li R., Gudkov S.V. A review of the antibacterial, fungicidal and antiviral properties of selenium nanoparticles. *Materials (Basel)*, 2023, vol. 16(15), 5363. https://doi.org/10.3390/ma16155363

Genchi G., Lauria G., Catalano A., Sinicropi M.S., Carocci A. Biological activity of selenium and its impact on human health. *Int. J. Mol. Sci.*, 2023, vol. 24(3), 2633. https://doi.org/10.3390/ijms24032633

Neysanian M., Iranbakhsh A., Ahmadvand R., Oraghi Ardebili Z., Ebadi M. Comparative efficacy of selenate and selenium nanoparticles for improving growth, productivity, fruit quality, and postharvest longevity through modifying nutrition, metabolism, and gene expression in tomato; potential benefits and risk assessment. *PLoS One*, 2020, vol. 15(12), e0244207. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244207

Babajani A., Iranbakhsh A., Ardebili Z.O., Eslami B. Differential growth, nutrition, physiology, and gene expression in *Melissa officinalis* mediated by zinc oxide and elemental selenium nanoparticles. Environ. Sci. Poll. Res., 2019, vol. 26, no. 24, pp. 24430-24444. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05676-z

Perfileva A.I., Kharasova A.R., Nozhkina O.A., Sidorov A.V., Graskova I.A., Krutovsky K.V. Effect of nanopriming with selenium nanocomposites on potato productivity in a field experiment, soybean germination and viability of Pectobacterium carotovorum. *Horticulturae*, 2023, vol. 9, 458. https://doi.org/10.3390/horticulturae9040458

Perfileva A.I., Tsivileva O.M., Nozhkina O.A., Karepova M.S., Graskova I.A., Ganenko T.V., Sukhov B.G., Krutovsky K.V. Effect of natural polysaccharide matrix-based selenium nanocomposites on *Phytophthora cactorum* and rhizospheric microorganisms. *Nanomaterials*, 2021b, vol. 11, 2274. https://doi.org/10.3390/nano11092274

Zhang X., Yang X., Ruan J., Chen H. Epigallocatechin gallate (EGCG) nanoselenium application improves tea quality (*Camellia sinensis* L.) and soil quality index without losing microbial diversity: A pot experiment under field condition. *Sci. Total Environ.*, 2024, vol. 914, 169923. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.169923

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, v. 12(24), pp. 1-7. https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00377

Islam M.R., Akash S., Jony M.H., Alam M.N., Nowrin F.T., Rahman M.M., Thiruvengadam M. Exploring the potential function of trace elements in human health: a therapeutic perspective. *Mol. Cell Biochem.*, 2023, vol. 478, pp. 2141-2171. https://doi.org/10.1007/s11010-022-04638-3

Feng R., Wei C., Tu S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses. *Environ. Exp. Bot.*, 2013, vol. 87, pp. 58-68. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.09.002

Ferro C., Florindo H.F., Santos H.A. Selenium nanoparticles for biomedical applications: from development and characterization to therapeutics. *Adv. Healthc. Mater.*, 2021, vol. 10 (16), 2100598. https://doi.org/10.1002/adhm.202100598

Hussain B., Lin Q., Hamid Y., Sanaullah M., Di L., Hashmi M.L.U.R., Khan M.B., He Z., Yang X. Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (Oryza sativa L.). *Sci. Total Environ.*, 2020, vol. 712, 136497. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136497

Landa P. Positive effects of metallic nanoparticles on plants: Overview of involved mechanisms. *Plant Physiol. Biochem.*, 2021, vol. 161, pp. 12-24. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.01.039

Hussain B., Yin X., Lin Q., Hamid Y., Usman M., Hashmi M.L., Lu M., Imran Taqi M., He Z., Yang X.E. Mitigating cadmium exposure risk in rice with foliar nano-selenium: Investigations

through Caco-2 human cell line *in vivo* bioavailability assay. *Environ. Pollut.*, 2024, vol. 356, 124356. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.124356

Farooq M.A., Islam F., Ayyaz A., Chen W., Noor Y., Hu W., Hannan F., Zhou W. Mitigation effects of exogenous melatonin-selenium nanoparticles on arsenic-induced stress in Brassica napus. *Environ. Pollut.*, 2022, vol. 292 (Pt B), 118473. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118473

El-Badri A.M., Batool M., Mohamed I.A.A., Wang Z., Wang C., Tabl K.M., Khatab A., Kuai J., Wang J., Wang B., Zhou G. Mitigation of the salinity stress in rapeseed (*Brassica napus* L.) productivity by exogenous applications of bio-selenium nanoparticles during the early seedling stage. *Environ. Pollut.*, 2022, vol. 310, 119815. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119815

Zafar S., Hasnain Z., Danish S., Battaglia M.L., Fahad S., Ansari M.J., Alharbi S.A. Modulations of wheat growth by selenium nanoparticles under salinity stress. *BMC Plant Biol.*, 2024, vol. 24(1), 35. https://doi.org/10.1186/s12870-024-04720-6

Yin K., Bao Q., Li J., Wang M., Wang F., Sun B., Gong Y., Lian F.Molecular mechanisms of growth promotion and selenium enrichment in tomato plants by novel selenium-doped carbon quantum dots. *Chemosphere*, 2024, vol. 364, 143175. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143175

Desouky M.M., Abou-Saleh R.H., Moussa T.A.A., Fahmy H.M. Nano-chitosan-coated, green-synthesized selenium nanoparticles as a novel antifungal agent against *Sclerotinia sclerotiorum: in vitro* study. *Sci. Rep.*, 2025, vol. 15, no. 1, 1004. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79574-x

Taha N.A., Hamden S., Bayoumi Y.A., Elsakhawy T., El-Ramady H., Solberg S.Ø. Nanofungicides with selenium and silicon can boost the growth and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and control alternaria leaf spot disease. *Microorganisms*, 2023, vol. 11(3), 728. https://doi.org/10.3390/microorganisms11030728

Yuan J., Chen Y., Li H., Lu J., Zhao H., Liu M., Nechitaylo G.S., Glushchenko N.N. New insights into the cellular responses to iron nanoparticles in Capsicum annuum. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, 3228. https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w

Abedi S., Iranbakhsh A., Oraghi Ardebili Z., Ebadi M. Nitric oxide and selenium nanoparticles confer changes in growth, metabolism, antioxidant machinery, gene expression, and flowering in chicory (*Cichorium intybus* L.): potential benefits and risk assessment. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2021, vol. 28(3), pp. 3136-3148. https://doi.org/10.1007/s11356-020-10706-2

González-Lemus U., Medina-Pérez G., Espino-García J.J., Fernández-Luqueño F., Campos-Montiel R., Almaraz-Buendía I., Reyes-Munguía A., Urrutia-Hernández T. Nutritional parameters, biomass production, and antioxidant activity of *Festuca arundinacea* Schreb. conditioned with selenium nanoparticles. *Plants (Basel)*, 2022, vol. 11 (17), 2326. https://doi.org/10.3390/plants11172326

Song J., Yu S., Yang R., Xiao J., Liu J. Opportunities for the use of selenium nanoparticles in agriculture. *NanoImpact*, 2023, 100478. https://doi.org/10.1016/j.impact.2023.100478

Artem'ev A.V., Malysheva S.F., Gusarova N.K., Trofimov B.A. Rapid and convenient one-pot method for the preparation of alkali metal phosphinodiselenoates. *Synthesis*, 2010, vol. 14, pp. 2463-2467

Rajaee Behbahani S., Iranbakhsh A., Ebadi M., Majd A., Ardebili Z. O. Red elemental selenium nanoparticles mediated substantial variations in growth, tissue differentiation, metabolism, gene transcription, epigenetic cytosine DNA methylation, and callogenesis in bittermelon (*Momordica charantia*); an *in vitro* experiment. *PLoS One*, 2020, vol. 15, no. 7, e0235556. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235556

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. 53, pp. 609-612. https://doi.org/10.1007/s11099-015-0118-1

Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Ganenko T.V., Graskova I.A., Sukhov B.G., Artem'ev A.V., Krutovsky K.V. Selenium nanocomposites in natural matrices as potato recovery agent. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021a, vol. 22(9), 4576. https://doi.org/10.3390/ijms22094576

M.A.O. Dawood, M.F.E. Basuini, S. Yilmaz, H.M.R. Abdel-Latif, Z.A. Kari, M.K.A. Abdul Razab, H.A. Ahmed, M. Alagawany, M.S. Gewaily Selenium nanoparticles as a natural antioxidant and metabolic regulator in aquaculture: A Review. *Antioxidants (Basel)*, 2021, vol. 10, no. 9, 1364. https://doi.org/10.3390/antiox10091364

Aloufi F.A., AbdElgawad H., Halawani R.F., Balkhyour M.A., Hassan A.H.A. Selenium nanoparticles induce coumarin metabolism and essential oil production in *Trachyspermum ammi* under future climate CO_2 conditions. *Plant Physiol. Biochem.*, 2024, vol. 211, 108705. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108705

Yang R., Li Q., Zhou W., Yu S., Liu J. Speciation analysis of selenium nanoparti-cles and inorganic selenium species by dual-cloud point extraction and ICP-MS deter-mination. *Anal. Chem.*, 2022, vol. 94(47), pp. 16328-16336. https://doi.org/10.1021/acs.analchem.2c03018

Sayed E.G., Desoukey S.F., Desouky A.F., Farag M.F., El-Kholy R.I., Azoz S.N. Synergistic influence of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation with nanoparticle foliar application enhances chili (*Capsicum annuum* L.) antioxidant enzymes, anatomical characteristics, and productivity under cold-stress conditions. *Plants (Basel)*, 2024, vol. 13(4), 517. https://doi.org/10.3390/plants13040517

Shebl A., Hassan A., Salama D.M., Abd El-Aziz M.E., Abd Elwahed M.S. Template-free microwave-assisted hydrothermal synthesis of manganese zinc ferrite as a nanofertilizer for squash plant (Cucurbita pepo L). *Heliyon*, 2020, vol. 6, e03596. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03596

Khan Z., Thounaojam T.C., Chowdhury D., Upadhyaya H. The role of selenium and nano selenium on physiological responses in plant: a review. *Plant Growth Regul.*, 2023, vol. 100(2), pp. 409-433. https://doi.org/10.1007/s10725-023-00988-0

Thiruvengadam M., Chi H.Y., Kim S.H. Impact of nanopollution on plant growth, photosynthesis, toxicity, and metabolism in the agricultural sector: An updated review. *Plant Physiol. Biochem.*, 2024, vol. 207, 108370. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.108370

Feng R., Wang L., Yang J., Zhao P., Zhu Y., Li Y., Yu Y., Liu H., Rensing C., Wu Z., Ni R., Zheng S. Underlying mechanisms responsible for restriction of uptake and translocation of heavy metals (metalloids) by selenium via root application in plants. *J. Hazard Mater.*, 2021, vol. 15, p. 402. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123570

Bano I., Skalickova S., Sajjad H., Skladanka J., Horky P. Uses of selenium nanoparticles in the plant production. *Agronomy*, 2021, vol. 11(11), 2229. https://doi.org/10.3390/agronomy11112229

Сведения об авторах

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

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

Information about the authors

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

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

Статья поступила в редакцию **02.12. 2024**; одобрена после рецензирования **10.12.2024**; принята к публикации **13.12.2024**
Submitted **December, 02, 2024**; approved after reviewing **December, 10, 2024**; accepted for publication **December, 13, 2024**