



УДК 577.2
<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.47.3>

Нанопрайминг семян сои с применением марганецсодержащего нанокompозита в арабиногалактановой матрице

А. И. Перфильева¹, Н. С. Забанова^{1,2*}

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

²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

E-mail: pavnatser@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследований по изучению стимуляции прорастания семян сои *Glycine max* (L.) под влиянием нанопрайминга химически синтезированным нанокompозитом (НК) на основе марганецсодержащих наночастиц и водорастворимого полисахарида арабиногалактана. Изучено влияние нанокompозита гидроксида марганца и сульфатированного арабиногалактана (НК $Mn(OH)_2/AGc$, 4,8 % Mn) на всхожесть, биометрические характеристики (масса и длина корня и гипокотыля) и биохимические показатели (содержание активных форм кислорода, активность антиоксидантных ферментов, количество продуктов перекисного окисления липидов) проростков семян сои, инфицированных фитопатогеном *Pectobacterium carotovorum*. Обсуждаются перспективы использования нанокompозита $Mn(OH)_2/AGc$ для ростостимуляции культурных растений и повышения сопротивляемости фитопатогенам.

Ключевые слова: арабиногалактан, марганец, наночастицы, нанокompозиты, семена, соя, проростки, *Pectobacterium carotovorum*, биометрические характеристики, диеновые конъюгаты.

Благодарности. Авторы благодарны Н. В. Дорофееву за предоставление семян сои в качестве объекта исследований. Исследование выполнено на средства федеральной программы № 0277-2021-0004 (121031300011-7), финансируемой Минобрнауки России в рамках базового проекта «Изучение молекулярных механизмов физиологических процессов и аллелопатии в растительно-микробных отношениях».

Для цитирования: Перфильева А. И., Забанова Н. С. Нанопрайминг семян сои с применением марганецсодержащего нанокompозита в арабиногалактановой матрице // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2024. Т. 47. С. 3–14. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.47.3>

Research article

Nanopriming of Soybean Seeds Using a Manganese-Containing Nanocomposite in a Matrix of Sulfated Arabinogalactan

A. I. Perfileva¹, N. S. Zabanova^{1,2*}

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

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

E-mail: pavnatser@mail.ru

© Перфильева А. И., Забанова Н. С., 2024

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

Abstract. The results of studies on the stimulation of soybean seed germination under the influence of nanoprimering with a chemically synthesized nanocomposite (NC) based on manganese-containing nanoparticles and a water-soluble polysaccharide arabinogalactan are presented. The study was carried out on the phytopathosystem: soybean seeds *Glycine max* (L) – phytopathogenic bacterium *Pectobacterium carotovorum*. Phytopathogenic bacterium *P. carotovorum* causes the infectious disease soft rot in various plant species from vegetables to trees and shrubs. After nanoprimering (treatment $Mn(OH)_2/AGs$ NC), seed germination, biometric characteristics (mass and length of the root and hypocotyl) and biochemical parameters of soybean seedlings (content of reactive oxygen species (ROS), activity of antioxidant enzymes, amount of lipid peroxidation products) were analyzed. It was shown that the infection of seeds with *P. carotovorum* led to a decrease in their germination, 50 % of the seeds did not germinate. In addition, seedlings obtained from infected seeds had reduced all biometric characteristics compared to the control. Infection of seeds with *P. carotovorum* showed an increase in the amount of ROS in root tissues and caused a significant increase in peroxidase activity in the roots of soybean seedlings. A significant increase in diene conjugates (DC) was noted in the tissues of the roots of the hypocotyl in this variant. The nanocomposite of manganese hydroxide and sulfated arabinogalactan ($Mn(OH)_2/AGs$ NC, 4,8 % Mn) removed the negative effect of the phytopathogen *P. carotovorum*. Morphometric characteristics of seed sprouts after nanoprimering were characterized by an increase in biomass compared to the control. Thus, after nanoprimering with $Mn(OH)_2/AGs$ NC, the length and weight of the root in uninfected seeds increased. The most pronounced stimulating effect of nanoprimering was expressed in sprouts obtained from infected seeds. The length weight of the hypocotyl and the length of the root in infected seeds significantly increased after nanoprimering of infected seeds. The precursor NC – $MnSO_4 \times 5H_2O$ did not affect the germination and sprouting of seeds both infected with *P. carotovorum* and free from infection. Nanoprimering of infected seeds reduced the formation of ROS in seedling tissues. It was found that after nanoprimering, peroxidase activity increased significantly in soybean roots compared to the control. This effect can be explained by the antioxidant effect of Mn NPs. Nanoprimering of infected seeds reduced the amount of DC in root tissues to the control level. Thus, the mechanisms of interaction of NC with the studied phytopathosystem are represented by an increase in seed germination under the influence of NC, stimulation of morphometric parameters of seedlings, as well as an effect on the components of the antioxidant system. The obtained results and our previous studies on the antibacterial effect of $Mn(OH)_2/AGs$ against phytopathogens *Clavibacter sepedonicus* demonstrate the great potential of using $Mn(OH)_2/AGs$ in practical agriculture, in particular for application in the field of stimulating plant growth and increasing their resistance to phytopathogens.

Keywords: arabinogalactan, manganese, nanoparticles, nanocomposites, seeds, soybeans, seedlings, *Pectobacterium carotovorum*, biometric characteristics, diene conjugates.

For citation: Perfilova A.I., Zabanova N.S. Nanoprimering of Soybean Seeds Using a Manganese-Containing Nanocomposite in a Matrix of Sulfated Arabinogalactan. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2024, vol. 47, pp. 3–14. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2024.47.3> (in Russian)

Введение

В настоящее время всё активнее распространяются заболевания культурных растений, проявляющиеся в виде гнилей. Одним из фитопатогенов, вызывающих такие болезни, является граммотрицательная подвижная бактерия *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* (ранее называвшаяся *Erwinia carotovora* subsp. *carotovora*). Этот патоген вызывает инфекционную болезнь мягкой гнили у различных видов культурных растений, в том числе у овощей (китайская капуста, салат, редис, картофель, помидоры и лук), в период послеуборочной обработки [Inactivation of *Pectobacterium* ... , 2018]. Причиной мацерации растительной ткани является продуцирование *P. carotovorum* различных ферментов, разрушающих клеточную стенку растений, включая пектиназы, полигалактуроназу, целлюлазы и протеазы

[Innovative biosynthesis ... , 2022]. Эти ферменты и способность бактерии образовывать биоплёнки являются факторами вирулентности, способствующими мацерации растительных органов и тканей. *P. carotovorum* обладает сильной выживаемостью, широко распространена и может находиться в почве или растениях в качестве сапрофитов более года [Effects of rharontigenin ... , 2022]. Симптомы поражения *P. carotovorum* включают увядание растений, сосуды чернеют на листьях, стеблях и черешках, по которым распространяется возбудитель заболевания. На этапе цветения начинается постепенное увядание сердцевины стебля, начиная с корня, что приводит к надламыванию стебля и гибели растений [First report of ... , 2022]. Существуют сведения, что *P. carotovorum* способна оказывать негативное влияние на жизнеспособность сои [Diseases caused ... , 2021], что также было показано нами ранее [Effect of nanoprimering ... , 2023]. Это представляется проблемой, поскольку соя играет важную роль в обеспечении глобальной продовольственной безопасности.

В последние годы послеуборочная порча овощей и перекрёстное загрязнение в результате заражения растений *P. carotovorum* вызывают большую озабоченность, учитывая значительные экономические потери для фермеров во всём мире. Однако исследований об эффективных стратегиях защиты сельскохозяйственных растений от *P. carotovorum* недостаточно [Effects of rharontigenin ... , 2022], а большинство используемых пестицидов направлены на регуляцию численности фитопатогенных грибов, а не бактерий.

Увеличивается исследовательский интерес к использованию новых экологически безопасных агентов для повышения выживаемости растений при поражении *P. carotovorum*. Альтернативой пестицидам является seed priming – протравливание семян различными праймерами (гидропрайминг, осмопрайминг, термопрайминг, бипрайминг и хемопрайминг [Nanotechnology potential ... , 2021; Nano-priming: Impression on ... , 2022]) – инновационная технология, которая помогает улучшить всхожесть семян, рост и урожайность растений за счёт обеспечения устойчивости к различным стрессам [Nanotechnology potential ... , 2021]. Интересно исследование марганецсодержащих наносоединений в качестве агентов нанопрайминга, поскольку они обладают антиоксидантным эффектом против активных форм кислорода (АФК) [Haque, Tripathy, Ranjan Patra, 2021], производимых в растительной клетке при биотическом стрессе и способных запускать её гибель [ROS scavenging Mn₃O₄ ... , 2018]. Ранее нами было показано, что нанопрайминг инфицированных бактерией семян сои наноккомпозитом на основе наночастиц (НЧ) селена и полисахарида арабиногалактана (НК Se/Ag) обладает бактерицидным эффектом в отношении *P. carotovorum*. Кроме того, НК Se/Ag снимал негативный эффект заражения семян сои *P. carotovorum* [Effect of nanoprimering ... , 2023].

Цель настоящей работы – исследовать влияние нанопрайминга с применением марганецсодержащего НК в отношении инфицированных патогеном *P. carotovorum* семян сои.

Материалы и методы

Нанокompозит. НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{AGc}$ (4,8 % Mn) был синтезирован в Институте химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (г. Новосибирск) по ранее описанной методике [Novel nanobiocomposites ... , 2021].

Культивирование бактерий. В работе использовали грамотрицательную бактерию *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum*, штамм VKM В-1274, полученную из Всероссийской коллекции микроорганизмов. Бактерии культивировали на мясопептонном агаре (МПА), для экспериментов бактерии выращивали на мясопептонном бульоне (МПБ).

Дизайн эксперимента. Для изучения влияния НК на интенсивность прорастания семян проведена серия опытов на проростках сои *Glycine max* (L.) сорта «Саяна» с повышенной устойчивостью к низким температурам воздуха и почвы в фазе всходов и повышенной урожайностью в длиннодневных условиях недостаточного теплоснабжения и холодового стресса [Холодоустойчивый сорт ... , 2021].

Семена дезинфицировали в 96%-ном этаноле 1 мин, в 3%-ной перекиси водорода 20 мин. После трёхкратного отмывания семена для инфицирования погружали в бактериальную суспензию *P. carotovorum* на 2 ч, контроль помещали в МПБ. Далее для осуществления нанопрайминга семена 30 мин замачивали в растворе НК в концентрации 0,000625 % НЧ Mn, контроль аналогичное время выдерживали в воде. Кроме того, для исследования эффекта прекурсора НК на изучаемые параметры свободные от инфекции и заражённые семена инкубировали 30 мин в водном растворе $\text{MnSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ (концентрация соответствовала концентрации НК по конечному содержанию марганца в растворе). Далее семена обсушивали и высаживали на увлажнённую фильтровальную бумагу в чашки Петри. Семена проращивали в термостате при 26 °С. Спустя 6 сут. анализировали длину и массу стебля и корня, а также осуществляли биохимические исследования. На каждый вариант использовали по 30 семян. Эксперименты проведены в трёх биологических повторностях.

Биохимические исследования. После снятия биометрических показателей проростки сои использовали для биохимических исследований. Изучали следующие показатели: содержание АФК в тканях корня и тканях гипокотыля проростка, активность пероксидазы в тканях корня и тканях гипокотыля проростка и количество диеновых конъюгатов (ДК). Содержание АФК оценивали спектрофотометрически с использованием красителя ксиленоловый оранжевый [Early signalling events ... , 2001]. Активность пероксидазы определяли по методу Бояркина [Boyarkin, 1951]. Первичные продукты перекисного окисления липидов (ПОЛ) – ДК в тканях побегов и корней проростков сои исследовали с использованием гексана и изопропанола [Владимиров, Арчаков, 1972].

Полученные результаты статистически обработаны с использованием процессора Excel из пакета MS Office 2016 и программы SigmaPlot v.12.5 (SYSTAT Software, США). Для проверки нормальности образца ис-

пользовался тест Шапиро – Уилка. Данные, полученные в эксперименте, статистически сравнивались с контролем с использованием непараметрического критерия Краскела – Уоллиса, поскольку не все данные соответствовали нормальности и параметрическим критериям Стьюдента.

Результаты

Через 7 дней проращивания семян сои и после замачивания в течение 30 мин в водном растворе $Mn(OH)_2/AGc$ НК визуально оценивали всхожесть семян (рис.) и такие биометрические показатели проростков, как длина и масса корня и гипокотыля (табл. 1).

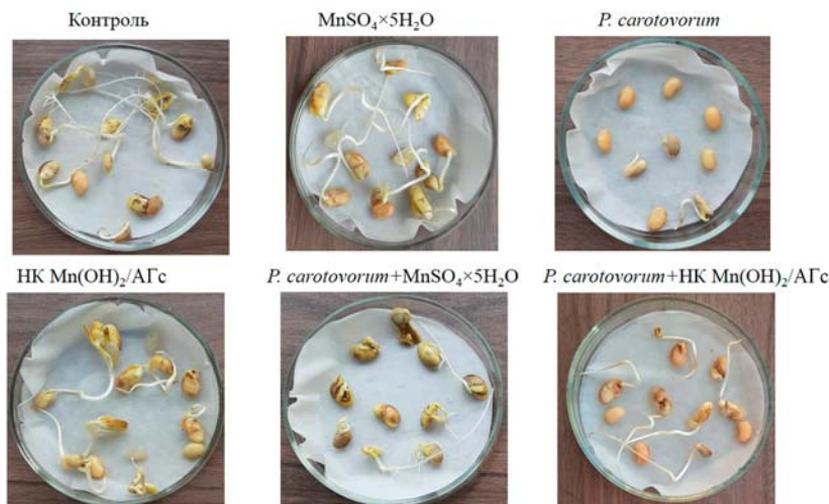


Рис. Влияние $MnSO_4 \times 5H_2O$, заражения *P. carotovorum* и нанопрайминга НК $Mn(OH)_2/AGc$ на всхожесть семян сои после 7 сут проращивания

Таблица 1
Влияние $MnSO_4 \times 5H_2O$, заражения *P. carotovorum* и нанопрайминга НК $Mn(OH)_2/AGc$ на биометрические показатели проростков семян сои

Способ обработки	Масса, г		Длина, см	
	Гипокотиль	Корни	Гипокотиль	Корни
Контроль	0,04 [0,02; 0,01]	0,03 [0,02; 0,01]	2,36 [0,9; 0,6]	4,31 [2,7; 1,8]
$MnSO_4 \times 5H_2O$ (а)	0,05 [0,03; 0,01]	0,02 [0,02; 0,04]	2,07 [0,8; 0,8]	4,25 [3; 1,6]
НК $Mn(OH)_2/AGc$ (б)	0,05 [0,02; 0,02]	0,04 [0,02; 0,01]*	2,54 [0,9; 0,6]	5,89 [1,4; 0,8]*
<i>P. carotovorum</i> (в)	0,02 [0,01; 0,01]*	0,02 [0,01; 0,01]*	1,30 [0,4; 0,6]*	1,78 [0,8; 0,6]*
<i>P. carotovorum</i> + $MnSO_4 \times 5H_2O$ (г)	0,02 [0,02; 0,01]	0,02 [0,01; 0,01]	1,00 [0,4; 0,8]	1,52 [0,8; 0,8]
<i>P. carotovorum</i> + НК $Mn(OH)_2/AGc$ (д)	0,03 [0,1; 0,0001]*	0,02 [0,01; 0,01]	1,87 [0,4; 0,3]*	3,31 [1,2; 1,2]*

Примечания для табл. 1 и 2: (а) контроль и проростки, обработанные $MnSO_4 \times 5H_2O$; (б) контроль и проростки, обработанные $Mn(OH)_2/AGc$; (в) контроль и проростки, обработанные *P. carotovorum*; (г) проростки, заражённые *P. carotovorum* и обработанные $MnSO_4 \times 5H_2O$; (д) проростки, заражённые *P. carotovorum* и обработанные $Mn(OH)_2/AGc$. Диапазон значений представлен в квадратных скобках как интерквартильные значения между 25-м и 75-м перцентилем; * – достоверные отличия от контроля при $p \leq 0,05$ по критерию Краскела – Уоллиса и критерию Стьюдента.

Результаты исследования показали, что замачивание семян в водном растворе $MnSO_4 \times 5H_2O$ не оказывало эффекта на прорастание семян сои (см. рис., табл. 1). НК $Mn(OH)_2/AGc$ оказывали как стимулирующее, так и оздоравливающее действие на всхожесть семян. Биопраймирование семян сои бактериальной суспензией *P. carotovorum* увеличивало количество непроросших семян по сравнению с контролем на 70 %. НК $Mn(OH)_2/AGc$ также оказывали стимулирующее влияние на ростовые характеристики НК по массе и длине корней. Заражение семян *P. carotovorum* приводило к достоверному снижению всех ростовых показателей, измеренных у проростков сои. Однако нанопраймирование заражённых семян НК $Mn(OH)_2/AGc$ снижало негативное влияние фитопатогена на рост и развитие проростков сои (см. табл. 1). Нанопрайминг достоверно стимулировал увеличение длины корня и гипокотыля, а также массы гипокотыля заражённых семян по сравнению с заражением без нанопрайминга. Измерения биохимических показателей в тканях корней и гипокотылей сои представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние НК $Mn(OH)_2/AGc$ на биохимические показатели проростков сои

Способ обработки	Накопление H_2O_2 , у. е.		Активность пероксидазы, у. е.		Содержание ДК, нмоль/г сырой массы $\times 10^6$	
	Гипокотиль	Корни	Гипокотиль	Корни	Гипокотиль	Корни
Контроль	0,92 [0,4;0,3]	0,77 \pm 0,05	0,85 \pm 0,03	0,74 [0,06; 0,07]	1,06 [0,02; 0,02]	1,15 [0,08; 0,09]
НК $Mn(OH)_2/AGc$ (б)	0,70 [0,2;0,2]	0,56 \pm 0,1	0,78 \pm 0,05	1,10 [0,11; 0,06]*	0,533 [0,02; 0,03]*	1,10 [0,3; 0,3]
<i>P. carotovorum</i> (в)	0,72 [0,3;0,3]	1,27 \pm 0,2*	0,93 \pm 0,03	0,97 [0,17; 0,19]*	0,71 [0,02; 0,02]*	4,02 [2,1; 2,7]*
<i>P. carotovorum</i> + НК $Mn(OH)_2/AGc$ (д)	0,74 [0,06;0,05]	0,84 \pm 0,05	0,91 \pm 0,03	0,91 [0,13; 0,17]	0,88 [0,09; 0,16]	1,12 [0,08; 0,05]

Количество АФК является показателем стрессовой нагрузки на растительный организм. Поэтому на начальном этапе было проанализировано влияние заражения и нанопрайминга на содержание АФК в тканях проростков сои. Обнаружено, что нанопрайминг снижал количество АФК в тканях проростков, выросших из незаражённых семян (см. табл. 2). Заражение семян *P. carotovorum* показало увеличение количества АФК в тканях корней. Нанопрайминг заражённых семян уменьшал образование АФК в тканях проростков. В связи с тем, что $MnSO_4 \times 5H_2O$ не оказывал никакого влияния на биометрические характеристики проростков сои, биохимические исследования в тканях, полученных в этом варианте проростков, не проводились.

Антиоксидантные ферменты являются маркерами стресса, как биотического, так и абиотического. Поэтому активность пероксидазы использовали в качестве биохимического показателя стрессовой реакции проростков. Установлено, что после нанопрайминга активность пероксидазы значительно возросла в корнях сои по сравнению с контролем (см. табл. 2). Заражение

семян *P. carotovorum* вызывало достоверное повышение активности пероксидазы в корнях (см. табл. 2).

Содержание ДК при нанопрайминге достоверно снижалось в тканях гипокотилия под влиянием $Mn(OH)_2/AGc$. При заражении наблюдалось значительное повышение уровня ДК в тканях корней по сравнению с контролем. Нанопрайминг заражённых семян снижал содержание ДК в тканях корней до уровня контроля (см. табл. 2).

Обсуждение

Эксперименты показали, что НК $Mn(OH)_2/AGc$ повышает всхожесть как неинфицированных, так и подверженных заражению патогеном *P. carotovorum* семян сои. Этот эффект может быть связан как с поверхностным обеззараживанием семян НК, так и с проникновением НК внутрь семян [Nanoparticles in plants ... , 2023] и влиянием на качественный и количественный состав их микробиома. НЧ Mn и НЧ MnO перспективны для нанопрайминга семян благодаря высокой способности проникать в семена, влиять на мембранный транспорт, усиливать диффузию H_2O и O_2 внутрь семени, облегчать поглощение и использование питательных веществ семян. Всё это повышает всхожесть семян, увеличивает биомассу корня, стебля и побегов, а также урожайность [Research progress ... , 2023]. Повышение всхожести семян под влиянием марганецсодержащих НЧ было показано на пшенице: НЧ повышали всхожесть зерна пшеницы *Triticum aestivum* L. на 15 %, а также общее содержание хлорофилла и каротиноидов, увеличивавшееся на 61 и 38 % соответственно при воздействии НЧ Mn. Более высокое поглощение микроэлементов Fe и Mn побегами привело к увеличению урожайности на 14 и 18 % соответственно [Ce-Mn ferrite nanocomposite ... , 2021].

Морфометрические характеристики проростков семян после нанопрайминга НК $Mn(OH)_2/AGc$ характеризовались увеличением биомассы по сравнению с контролем. При этом наиболее ярко стимулирующий эффект нанопрайминга выражался у проростков, полученных от инфицированных семян. Так, после нанопрайминга НК $Mn(OH)_2/AGc$ повышались длина и масса корня у неинфицированных семян и длина корня у заражённых семян. Длина и масса гипокотилия достоверно увеличивались после нанопрайминга инфицированных семян. Полученные данные подтверждаются литературными сведениями о стимулирующем эффекте марганецсодержащих НЧ на биометрические параметры растений. Так, НЧ FeO_x , НЧ MnO_x и биметаллические НЧ MnO_x/FeO_x оказывали положительное влияние на рост растений, в частности на скорость прорастания семян, рост корней и увеличение биомассы проростков кукурузы [Green biosynthesis ... , 2020]. Показано, что смесь различных НЧ MnO_x , главным образом гаусманита (Mn_3O_4), бернессита ($Na_{0,25}MnO_{2,07} \cdot 0,66H_2O$) и фейткнехита (β - $MnOOH$), а также оксидов железа (FeO_x) не только менее токсична, чем их ионные аналоги, но и существенно стимулирует рост рассады салата *Lactuca sativa* на 12–54 % [Liu, Zhang, Lal, 2016].

Прекурсор НК $\text{MnSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ не оказал влияния на всхожесть и прорастание заражённых пектобактерией и свободных от инфекции семян. Такой эффект, по-видимому, объясняется низкой концентрацией $\text{MnSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ в водном растворе.

Биохимические параметры свидетельствуют, что нанопрайминг НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{АГс}$ в тканях корней неинфицированных проростков приводил к повышению активности пероксидазы в тканях корней. Показано влияние металлсодержащих НЧ, в том числе НЧ Mn, на активность антиоксидантных ферментов [Venzhik, Deryabin, 2023]. Усиление антиоксидантной активности в растительной клетке под влиянием НЧ происходит в результате следующих процессов: каталитической активности НЧ, влияния НЧ на экспрессию генов компонентов антиоксидантной системы, фотосинтетического аппарата, стрессового ответа и микроРНК, регуляции фотосинтетических процессов за счёт плазмонного резонанса и активации антиоксидантной системы через сигнальные функции АФК и продуктов ПОЛ [Venzhik, Deryabin, 2023]. Так, у пшеницы активность супероксиддисмутазы и пероксидазы положительно коррелировала с концентрацией вносимых к растению НЧ Mn [Ce-Mn ferrite nanopocomposite ... , 2021]. НЧ Mn_3O_4 , MnO и MnO_2 обладают ферментоподобными активностями, позволяющими им инактивировать АФК [Intrinsic superoxide dismutase ... , 2016; Manganese dioxide nanozymes ... , 2017; ROS scavenging Mn_3O_4 ... , 2018]. На животных клетках было показано, что НЧ MnO проявляют супероксиддисмутазную активность [Intrinsic superoxide dismutase ... , 2016]. НЧ Mn_3O_4 обладают ферментативной активностью супероксиддисмутазы и каталазы, а также могут улавливать гидроксильные радикалы [ROS scavenging Mn_3O_4 ... , 2018]. Диеновые конъюгаты являются показателем степени разрушения клеточной стенки – процесса ПОЛ. В наших исследованиях НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{АГс}$ снижал число ДК в тканях гипокотили и в тканях корней у проростков, выросших из незаражённых семян. Такой эффект может быть объяснён антиоксидантным эффектом НЧ Mn [ROS scavenging Mn_3O_4 ... , 2018; A manganese oxide ... , 2019; Biogenic synthesis ... , 2020].

Таким образом, механизмы взаимодействия НК с исследуемой фитопатосистемой представлены увеличением всхожести семян под влиянием НК, стимуляцией морфометрических показателей проростков, а также влиянием на компоненты антиоксидантной системы. Антиоксидантная активность НЧ Mn связана с тем, что они могут оказывать влияние на сигнальные пути в растительной клетке, регулировать экспрессию антиоксидантных ферментов, а также сами по себе обладают ферментативной активностью. Описанные механизмы снижали негативный эффект инфицирования семян патогеном на прорастание семян и развитие проростков сои.

Заключение

Результаты, представленные в настоящей работе, описывают эффект марганецсодержащего НК при патогенезе фитопатогенной бактерии *P. carotovorum*. Нанопрайминг НК $\text{Mn}(\text{OH})_2/\text{АГс}$ стимулировал рост про-

ростков сои, полученных как из здоровых, так и из инфицированных *P. carotovorum* семян. Такой эффект может быть связан с антиоксидантными эффектами НЧ марганца, так как НК $Mn(OH)_2$ /АГс повышает активность антиоксидантных ферментов и снижает количество ДК в тканях проростков сои. Полученные результаты демонстрируют большой потенциал использования $Mn(OH)_2$ /АГс в практическом сельском хозяйстве, в частности для применения в области стимуляции роста растений и повышения их сопротивляемости фитопатогенам.

Список литературы

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

Холодоустойчивый сорт сои северного экотипа Саяна / С. В. Зеленцов, Е. В. Мошненко, М. В. Трунова, Л. А. Бубнова, Е. Н. Будников, А. В. Лукомец, В. Г. Савиченко, Н. В. Дорофеев, Н. Б. Катышева, А. В. Поморцев // Масличные культуры. 2021. Вып. 1 (185). С. 95–102. <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-1-185-95-102>

A manganese oxide nanozyme prevents the oxidative damage of biomolecules without affecting the endogenous antioxidant system / N. Singh, M. A. Savanur, S. Srivastava, P. D'Silva, G. Mugesh // *Nanoscale*. 2019. Vol. 11. P. 3855–3863. <https://doi.org/10.1039/C8NR09397K>

Biogenic synthesis, antioxidant and antimicrobial activity of silver and manganese dioxide nanoparticles using *Cussonia zuluensis* Strey / N. T. Mahlangeni, J. Magura, R. Moodley, H. Baijnath, H. Chenia // *Chem. Pap.* 2020. Vol. 74. P. 4253–4265. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01244-9>

Boyarkin A. N. A quick method for determining the activity of peroxidase // *Biochemistry*. 1951. Vol. 16. P. 352–357.

Ce-Mn ferrite nanocomposite promoted the photosynthesis, fortification of total yield, and elongation of wheat (*Triticum aestivum* L.) / A. Zarinkoob, S. Esmailzadeh Bahabadi, A. Rahdar, P. Hasanein, H. Sharifan // *Environ. Monit. Assess.* 2021. Vol. 193. P. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09506-z>

Diseases caused by *Pectobacterium* and *Dickeya* species around the world. Ch. 7 // Plant diseases caused by *Dickeya* and *Pectobacterium* species / J. M. van der Wolf, I. Acuña, S. H. De Boer, M. B. Brurberg, G. Cahill, A. O. Charkowski, T. Coutinho, T. Davey, M. W. Dees, Y. Degefu, B. Dupuis, J. G. Elphinstone, J. Fan, E. Fazelisanagri, T. Fleming, N. Gerayeli, V. Gorshkov, V. Helias, Y. le Hingrat, S. B. Johnson, A. Keiser, I. Kellenberger, X. (S.) Li, E. Lojkowska, R. Martín, J. I. Perminow, O. Petrova, A. Motyka-Pomagruk, S. Rossmann, S. Schaerer, W. Sledz, I. K. Toth, L. Tsrör, J. E. van der Waals, P. de Werra, I. Yedidia; F. van Gijsegem, J. M. van der Wolf, I. K. Toth (eds.). Geneva: Springer Nature, 2021. P. 215–261. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61459-1_7

Early signalling events in the apoplastic oxidative burst in suspension cultured French bean cells involve cAMP and Ca^{2+} / L. V. Bindschedler, F. V. Minibayeva, S. L. Gardner, C. Gerrish, D. R. Davies, G. P. Bolwell // *New Phytologist*. 2001. Vol. 151. P. 185–194. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00170.x>

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

Effects of rhapontigenin as a novel quorum-sensing inhibitor on exoenzymes and biofilm formation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and its application in vegetables / B. Li, J. Huang, Y. Yi, S. Liu, R. Liu, Z. Xiao, C. Li // *Molecules*. 2022. Vol. 27. 8878. <https://doi.org/10.3390/molecules27248878>

First report of *Pectobacterium versatile* causing blackleg of potato in Serbia / S. Markovic, S. Milic Komic, A. Jelušić, R. Ilicic, F. Bagi, S. Stankovic, T. Popovic // *Plant Dis.* 2022. Vol. 106. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1128-PDN>

Green biosynthesis of single and bimetallic nanoparticles of iron and manganese using bacterial auxin complex to act as plant bio-fertilizer / G. M. de França Bettencourt, J. Degenhardt,

- L. A. Zevallos Torres, V. O. de Andrade Tanobe, C. R. Soccol // *Biocatal. Agric. Biotechnol.* 2020. Vol. 30. 101822. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101822>
- Haque S., Tripathy S., Ranjan Patra C. Manganese-based advanced nanoparticles for biomedical applications: future opportunity and challenges // *Nanoscale.* 2021. Vol. 13. P. 16405–16426. <https://doi.org/10.1039/D1NR04964J>
- Inactivation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* on Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*) by wash treatments with phenolic compounds / M. Kang, S. Kim, J. Y. Lee, S. Yoon, S. H. Kim, J. Ha // *LWT.* 2018. Vol. 93. P. 229–236. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.045>
- Innovative biosynthesis, artificial intelligence-based optimization, and characterization of chitosan nanoparticles by *Streptomyces microflavus* and their inhibitory potential against *Pectobacterium carotovorum* / N. El-A. El-Naggar, S. I. Bashir, N. H. Rabei, W. E. I. A. Saber // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. 21851. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25726-w>
- Intrinsic superoxide dismutase activity of MnO nanoparticles enhances the magnetic resonance imaging contrast / R. Ragg, A. M. Schilman, K. Korschelt, C. Wieseotte, M. Klueker, M. Viel, L. Völker, S. Preiß, J. Herzberger, H. Frey, K. Heinze, P. Blümler, M. N. Tahir, F. Nataliof, W. Tremel // *J. Mater. Chem. B.* 2016. Vol. 4. P. 7423–7428. <https://doi.org/10.1039/c6tb02078j>
- Liu R. Q., Zhang H. Y., Lal R. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or nanonutrients? // *Water Air Soil Pollut.* 2016. Vol. 227. P. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2738-2>
- Manganese dioxide nanozymes as responsive cytoprotective shells for individual living cell encapsulation / W. Li, Z. Liu, C. Liu, Y. Guan, J. Ren, X. Qu // *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 2017. Vol. 56. P. 13661–13665. <https://doi.org/10.1002/anie.201706910>
- Nanoparticles in plants: Uptake, transport and physiological activity in leaf and root / X. Wang, H. Xie, P. Wang, H. Yin // *Materials.* 2023. Vol. 16. 3097. <https://doi.org/10.3390/ma16083097>
- Nano-priming: Impression on the beginner of plant life / N. Kandhol, V. P. Singh, N. Ramawat, R. Prasad, D. K. Chauhan, S. Sharma, R. Grillo, S. Sahi, J. Peralta-Videa, D. K. Tripathi // *Plant Stress.* 2022. Vol. 5. 100091. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100091>
- Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture / A. do Espirito Santo Pereira, H. C. Oliveira, L. Fernandes Fraceto, C. Santaella // *Nanomaterials.* 2021. Vol. 11. 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>
- Novel nanobiocomposites based on natural polysaccharides as universal trophic low-dose micronutrients / S. S. Khutishvili, A. I. Perfileva, O. A. Nozhkina, M. S. Karepova, T. V. Ganenko, B. G. Sukhov, K. V. Krutovsky // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22. 12006. <https://doi.org/10.3390/ijms222112006>
- Research progress in green synthesis of manganese and manganese oxide nanoparticles in biomedical and environmental applications – A review / X. Zhang, A. Sathiyaseelan, K. V. Naveen, Y. Lu, M. H. Wang // *Chemosphere.* 2023. Vol. 337. 139312. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139312>
- ROS scavenging Mn₃O₄ nanozymes for *in vivo* anti-inflammation / J. Yao, Y. Cheng, M. Zhou, S. Zhao, S. Lin, X. Wang, J. Wu, S. Li, H. Wei // *Chem. Sci.* 2018. Vol. 9. P. 2927–2933. <https://doi.org/10.1039/c7sc05476a>
- Venzhik Y. V., Deryabin A. N. Regulation of pro-/antioxidant balance in higher plants by nanoparticles of metals and metal oxides // *Russ. J. Plant Physiol.* 2023. Vol. 70, N 2. P. 133–147. <https://doi.org/10.1134/S1021443722602312>

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)
- Zelentsov S. V., Moshnenko E. V., Trunova M. V., Bubnova L. A., Budnikov E. N., Lukomets A. V., Savichenko V. G., Dorofeev N. V., Katysheva N. B., Pomortsev A. V. Kholodoustoichiviyi sort soi severnogo ekotipa Sayana [A Cold-Resistant Soybean Cultivar Of The Northern Ecotype Sayana]. *Oil crops*, 2021, is. 1 (185), pp. 95–102. (in Russian). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-1-185-95-102>

Singh N., Savanur M.A., Srivastava S., D'Silva P., Mugesh G. A manganese oxide nanozyme prevents the oxidative damage of biomolecules without affecting the endogenous antioxidant system. *Nanoscale*, 2019, vol. 11, pp. 3855-3863. <https://doi.org/10.1039/C8NR09397K>

Mahlangeni N.T., Magura J., Moodley R., Baijnath H., Chenia H. Biogenic synthesis, antioxidant and antimicrobial activity of silver and manganese dioxide nanoparticles using *Cussonia zuluensis* Strey. *Chem. Pap.*, 2020, vol. 74, pp. 4253-4265. <https://doi.org/10.1007/s11696-020-01244-9>

Boyarkin A.N. A quick method for determining the activity of peroxidase. *Biochemistry*, 1951, vol. 16, pp. 352-357.

Zarinkoob A., Esmacilzadeh Bahabadi S., Rahdar A., Hasanein P., Sharifan H. Ce-Mn ferrite nanocomposite promoted the photosynthesis, fortification of total yield, and elongation of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environ. Monit. Assess.*, 2021, vol. 193, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09506-z>

van der Wolf J.M., Acuña I., De Boer S.H., Brurberg M.B., Cahill G., Charkowski A.O., Coutinho T., Davey T., Dees M.W., Degefu Y., Dupuis B., Elphinstone J.G., Fan J., Fazelisnagri E., Fleming T., Gerayeli N., Gorshkov V., Helias V., le Hingrat Y., Johnson S.B., Keiser A., Kellenberger I., Li X.(S.), Lojkowska E., Martin R., Perminow J.I., Petrova O., Motyka-Pomagruk A., Rossmann S., Schaerer S., Sledz W., Toth I. K., Tsrör L., van der Waals J.E., de Werra P., Yedidia I. Diseases caused by *Pectobacterium* and *Dickeya* species around the world. Ch. 7. *Plant diseases caused by Dickeya and Pectobacterium species*. F. van Gijsegem, J. M. van der Wolf, I. K. Toth (eds.). Geneva, Springer Nature, 2021, pp. 215–261. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61459-1_7

Bindschedler L.V., Minibayeva F.V., Gardner S.L., Gerrish C., Davies D.R., Bolwell G.P. Early signalling events in the apoplastic oxidative burst in suspension cultured French bean cells involve cAMP and Ca²⁺. *New Phytologist*, 2001, vol. 151, pp. 185-194. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00170.x>

Perfileva A.I., Kharasova A.R., Nozhkina O.A., Sidorov A.V., Graskova I.A., Krutovsky K.V. Effect of nanoprimering 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/horticulturae904045>

Li B., Huang J., S. Liu Y.Yi, Liu R., Xiao Z, Li C. Effects of rhamnolipin as a novel quorum-sensing inhibitor on exoenzymes and biofilm formation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* and its application in vegetables. *Molecules*, 2022, vol. 27, 8878. <https://doi.org/10.3390/molecules27248878>

Markovic S., Milic Komic S., Jelušić A., Ilicic R., Bagi F., Stankovic S., Popovic T. First report of *Pectobacterium versatile* causing blackleg of potato in Serbia. *Plant Dis.*, 2022, vol. 106, no. 1. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-21-1128-PDN>

de França Bettencourt G.M., Degenhardt J., Zevallos Torres L.A., de Andrade Tanobe V.O., Soccol C.R. Green biosynthesis of single and bimetallic nanoparticles of iron and manganese using bacterial auxin complex to act as plant bio-fertilizer. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 2020, vol. 30, 101822. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101822>

Haque S., Tripathy S., Ranjan Patra C. Manganese-based advanced nanoparticles for biomedical applications: future opportunity and challenges. *Nanoscale*, 2021, vol. 13, pp. 16405-16426. <https://doi.org/10.1039/D1NR04964J>

Kang M., Kim S., Lee J.Y., Yoon S., Kim S.H., Ha J. Inactivation of *Pectobacterium carotovorum* subsp. *carotovorum* on Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. subsp. *pekinensis*) by wash treatments with phenolic compounds. *LWT*, 2018, vol. 93, pp. 229-236. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.03.045>

El-Naggar N.El-A., Bashir S.I., Rabei N.H., Saber W.E.I.A. Innovative biosynthesis, artificial intelligence-based optimization, and characterization of chitosan nanoparticles by *Streptomyces microflavus* and their inhibitory potential against *Pectobacterium carotovorum*. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12, 21851. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-25726-w>

Ragg R., Schilman A.M., Korschelt K., Wiesotte C., Kluncker M., Viel M., Völker L., Preiß S., Herzberger J., Frey H., Heinze K., Blümler P., Tahir M.N., Natalio F., Tremel W. Intrinsic superoxide dismutase activity of MnO nanoparticles enhances the magnetic resonance imaging contrast. *J. Mater. Chem. B.*, 2016, vol. 4, pp. 7423-7428. <https://doi.org/10.1039/c6tb02078j>

Liu R.Q., Zhang H.Y., Lal R. Effects of stabilized nanoparticles of copper, zinc, manganese, and iron oxides in low concentrations on lettuce (*Lactuca sativa*) seed germination: nanotoxicants or

nanonutrients? *Water Air Soil Pollut.*, 2016, vol. 227, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2738-2>

Li W., Liu Z., Liu C., Guan Y., Ren J., Qu X. Manganese dioxide nanozymes as responsive cytoprotective shells for individual living cell encapsulation. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2017, vol. 56, pp. 13661-3665. <https://doi.org/10.1002/anie.201706910>

Wang X., Xie H., Wang P., Yin H. Nanoparticles in plants: Uptake, transport and physiological activity in leaf and root. *Materials*, 2023, vol. 16, 3097. <https://doi.org/10.3390/ma16083097>

Kandhol N., Singh V.P., Ramawat N., Prasad R., Chauhan D.K., Sharma S., Grillo R., Sahi S., Peralta-Videa J., Tripathi D.K. Nano-priming: Impression on the beginner of plant life. *Plant Stress*, 2022, vol. 5, 100091. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2022.100091>

do Espirito Santo Pereira A., Oliveira H.C., Fernandes Fraceto L., Santaella C. Nanotechnology potential in seed priming for sustainable agriculture. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, 267. <https://doi.org/10.3390/nano11020267>

Khutsishvili S.S., Perfileva A.I., Nozhkina O.A., Karepova M.S., Ganenko T.V., Sukhov B.G., Krutovsky K.V. Novel nanobiocomposites based on natural polysaccharides as universal trophic low-dose micronutrients. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, 12006. <https://doi.org/10.3390/ijms222112006>

Zhang X., Sathiyaseelan A., Naveen K.V., Lu Y., Wang M.H. Research progress in green synthesis of manganese and manganese oxide nanoparticles in biomedical and environmental applications – A review. *Chemosphere*, 2023, vol. 337, 139312. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139312>

Yao J., Cheng Y., Zhou M., Zhao S., Lin S., Wang X., Wu J., Li S., Wei H. ROS scavenging Mn₃O₄ nanozymes for *in vivo* anti-inflammation. *Chem. Sci.*, 2018, vol. 9, pp. 2927-2933. <https://doi.org/10.1039/c7sc05476a>

Venzhik Y.V., Deryabin A.N. Regulation of pro-/antioxidant balance in higher plants by nanoparticles of metals and metal oxides. *Russ. J. Plant Physiol.*, 2023, vol. 70, no. 2, pp. 133-147. <https://doi.org/10.1134/S1021443722602312>

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

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 Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: pavnatser@mail.ru

Information about the authors

Perfileva Alla Innokent'evna

Candidate of Sciences (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

Zabanova Natalya Sergeevna

Candidate of Sciences (Biology),
Senior Research Scientist
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
Associate Professor
Irkutsk State University
1, K.Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: pavnatser@mail.ru

Статья поступила в редакцию **02.10.2023**; одобрена после рецензирования **24.11.2023**; принята к публикации **19.01.2024**
Submitted **October, 02, 2023**; approved after reviewing **November, 24, 2023**; accepted for publication **January, 19, 2024**