

УДК 57.017.64

## РОСТОСТИМУЛИРУЮЩАЯ АКТИВНОСТЬ НАНОКОМПОЗИТОВ СЕЛЕНА В ПРИРОДНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТРИЦАХ ПРИ ПРОРАСТАНИИ СЕМЯН КУЛЬТУРНЫХ РАСТЕНИЙ

© 2020 г. В. Н. Нурминский<sup>1</sup>, А. И. Перфильева<sup>1,\*</sup>, И. С. Капустина<sup>1</sup>,  
И. А. Граскова<sup>1</sup>, Б. Г. Сухов<sup>2</sup>, академик РАН Б. А. Трофимов<sup>2</sup>

Поступило 03.05.2020 г.

После доработки 04.08.2020 г.

Принято к публикации 04.08.2020 г.

В работе исследовали ростостимулирующую активность в отношении растений редиса, сои и картофеля трех наноконкомпозитов (НК) селена в различных матрицах: на основе арабиногалактана (НК Se/Аг, 6.4% Se), крахмала (НК Se/Кр, 2% Se) и каррагинана (НК Se/Кар, 12% Se). Показано, что НК селена стимулируют рост корней при прорастании семян растений. Обнаружено, что исследуемые НК воздействовали как на уровень перекисного окисления липидов, так и на активность антиоксидантного фермента глутатионпероксидазы (ГПО). Обработка семян редиса НК снижает содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях корня. Показано, что замачивание семян в растворе НК Se/Аг способствует повышению активности ГПО в тканях корня редиса на 40%. Стимуляция роста корней сои под влиянием НК Se/Кар также может быть связана с активизацией ГПО. Кроме того, у картофеля этот НК приводил к стимуляции прорастания, однако это, вероятно, обусловлено активацией иных антиоксидантных ферментов. Полученные результаты позволяют рассматривать НК Se в качестве потенциальных ростостимуляторов растений.

**Ключевые слова:** наноконкомпозиты, селен, крахмал, арабиногалактан, каррагинан, редис, соя, картофель, диеновые конъюгаты, глутатионпероксидаза, активные формы кислорода

**DOI:** 10.31857/S2686738920060207

Нанотехнологии активно внедряются в различные сферы жизни человека, в частности, в сельское хозяйство. Разрабатываются нанопрепараты для стимуляции роста и развития растений, их защиты от патогенов [1]. Ранее нами было показано, что наноконкомпозиты (НК) селена – комплексы наночастиц (НЧ) селена с полимерными матрицами природного происхождения – обладают антибактериальным эффектом и не оказывают негативного влияния на растения картофеля *in vitro*, а в некоторых случаях даже стимулируют их рост и развитие [2–4]. Следует также отметить, что важным аспектом применения химических агентов в агрохимии является наличие у них ростостимулирующей активности в отношении сельскохозяйственных культур.

Помимо картофеля, относящегося к семейству пасленовых, среди всех возделываемых полевых культур в мире весьма широкое распространение имеют представители семейства крестоцветных и бобовых. Так, например, большие посевные площади на различных континентах засаживаются редисом. Съедобная часть редиса находится в непосредственном контакте с почвой, где чаще всего происходит загрязнение и аккумуляция химических веществ. В связи с этим, редис является удобным модельным объектом для получения новых сведений о биологической активности веществ, в частности, о токсичности НЧ для растений [5, 6]. Из бобовых культур большой популярностью пользуется соя, эта культура лидирует по объемам возделывания в мире, благодаря высокому содержанию белка, а также широкому потреблению человеком и животными [7].

В настоящей работе представлены новые данные о влиянии НК селена в природных полимерных матрицах на прорастание семян редиса, сои и картофеля с целью разработки эффективного и экологически безопасного ростостимулятора сельскохозяйственных растений.

<sup>1</sup> Сибирский институт физиологии и биохимии растений Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> Иркутский институт химии Сибирского отделения Российской академии наук им. А.Е. Фаворского, г. Иркутск, Россия

\*e-mail: [alla.light@mail.ru](mailto:alla.light@mail.ru)

**Таблица 1.** Влияние НК селена в природных матрицах на длину и массу побега и корня редиса, сои и длину и массу проростков картофеля.  $M \pm SE$ . \* – достоверные отличия от контроля,  $p < 0.05$ ,  $n = 3$ 

	Вариант	Длина побега, см	Длина корня, см	Масса побега, г	Масса корня, г
Редис	Контроль	1.85 ± 0.06	8.11 ± 0.23	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00
	НК Se/Ag	1.71 ± 0.06	8.90 ± 0.21*	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00
	НК Se/Kp	1.89 ± 0.06	8.84 ± 0.21*	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00
	НК Se/Кар	1.78 ± 0.05	8.86 ± 0.24*	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.00
Соя	Контроль	2.07 ± 0.12	2.13 ± 0.14	0.07 ± 0.00	0.05 ± 0.00
	НК Se/Ag	1.90 ± 0.09	2.54 ± 0.14	0.06 ± 0.00	0.05 ± 0.00
	НК Se/Kp	3.64 ± 0.21*	4.02 ± 0.33*	0.10 ± 0.01*	0.06 ± 0.00
	НК Se/Кар	3.57 ± 0.21*	6.16 ± 0.51*	0.10 ± 0.01*	0.10 ± 0.01*
Картофель	Контроль	2.04 ± 0.10	–	0.27 ± 0.02	–
	НК Se/Ag	2.20 ± 0.11	–	0.32 ± 0.02	–
	НК Se/Kp	1.90 ± 0.08	–	0.26 ± 0.02	–
	НК Se/Кар	3.12 ± 0.15*	–	0.46 ± 0.04*	–

Нанокмозиты селена получены путем химического синтеза в Иркутском институте химии СО РАН. Они представляют собой НЧ селена, стабилизированные природными полимерами (арабиногалактаном; картофельным крахмалом; каррагинаном). Синтез НК селена с арабиногалактаном (НК Se/Ag) проводили окислением бис(2-фенилэтил)фосфинодиселенофосфината натрия пероксидом водорода в водном растворе арабиногалактана [8]. Синтез НК селена с крахмалом (НК Se/Kp) осуществляли на основе готового препарата крахмала [2]. НК селена с каррагинаном (НК Se/Кар) производили на основе готового препарата каррагинана [9]. Все используемые НК селена хорошо растворимы в воде.

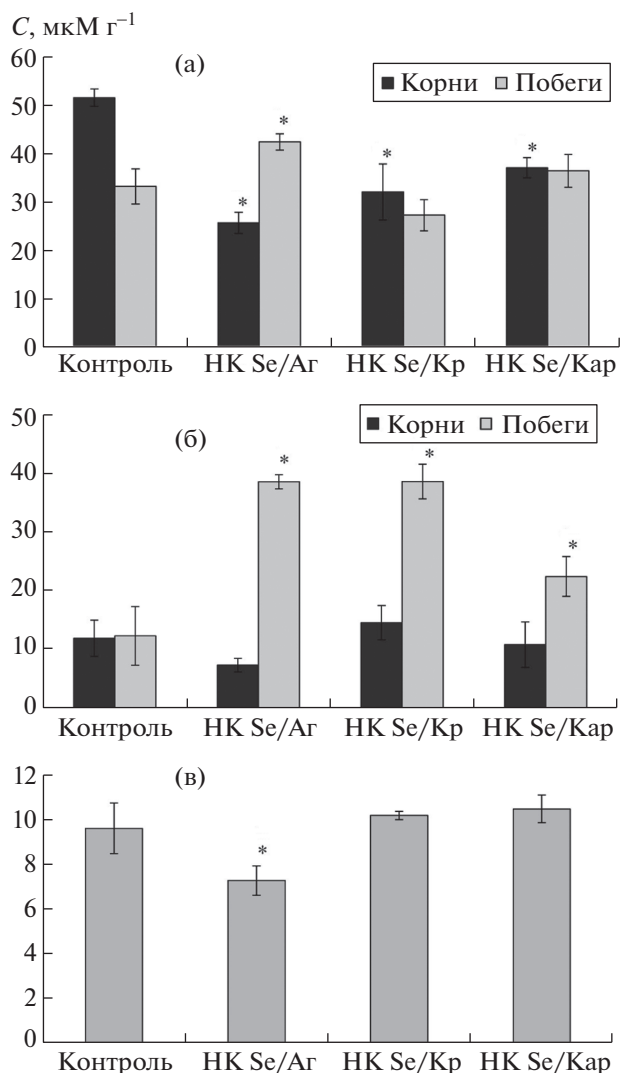
В работе исследована ростостимулирующая активность НК селена по их влиянию на биометрические (длина/масса побега и корня) и биохимические (содержание диеновых конъюгатов (ДК), активность антиоксидантного фермента глутатионпероксидазы (ГПО)) показатели проростков трех культур. В исследованиях использовали семена редиса *Raphanus sativus* L.: var. *radicula* Pers., сорт “18 дней”, характеризующийся скороспелостью и высоким выходом товарной продукции; семена сои *Glycine max* (L.) Merril, сорт “Черемшанка”, относящийся к скороспелым и высокопродуктивным линиям, возделываемым в Сибири; клубни картофеля *Solanum tuberosum* L., сорт “Гала”, скороспелый, высокоурожайный.

Для экспериментов по исследованию влияния НК селена в природных матрицах на прорастание редиса и сои семена дезинфицировали 1 мин в 96% этиловом спирте, затем 20 мин в перекиси водорода. После 3-х кратного отмывания водой семена замачивали 30 мин в растворе НК с концентрацией селена 0.000625%, подобранной нами ранее. Далее семена высаживали на влажную

фильтровальную бумагу в чашки Петри и проращивали 5 сут в темноте при 26°C. Клубни картофеля обрабатывали НК путем опрыскивания, проращивали в темноте 14 сут. Всхожесть культур определяли в соответствии с ГОСТ 12038-84 “Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести”. В конце эксперимента анализировали длину и массу побега и корня, а также биохимические показатели. Определение первичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ), ДК, в тканях побега и корня проростков редиса, сои и картофеля проводили по методике с использованием гексана и изопропанола [10]. Активность ГПО в проростках оценивали по изменению содержания восстановленного глутатиона в пробах до и после инкубации с субстратом в ходе цветной реакции с 5,5'-дитио-бис-2-нитробензойной кислотой [11]. Статистическая обработка данных проведена с применением программы SigmaPlot v.12.5.

Было выявлено, что все исследуемые НК не оказывают негативного влияния на всхожесть исследуемых растений. В контроле и опытных образцах всхожесть была 100%. В литературе имеются примеры как положительного влияния НЧ на прорастание семян (НЧ серебра [6] и НЧ церия [12] стимулировали прорастание семян *Raphanus sativus*), так и отрицательного (НЧ титана замедляли развитие семян *Raphanus sativus* L. *Parvus* [5]).

Не выявлено влияния НК на массу побега и корня редиса, однако все НК достоверно увеличивали длину корней проростков этой культуры (табл. 1). Полученный результат согласуется с литературными данными, свидетельствующими о том, что НЧ способны стимулировать рост корней растений. Показано, что длина корней растений перца *Capsicum annuum*, выращенных на питательной среде с НЧ металлов, была на 7–118%



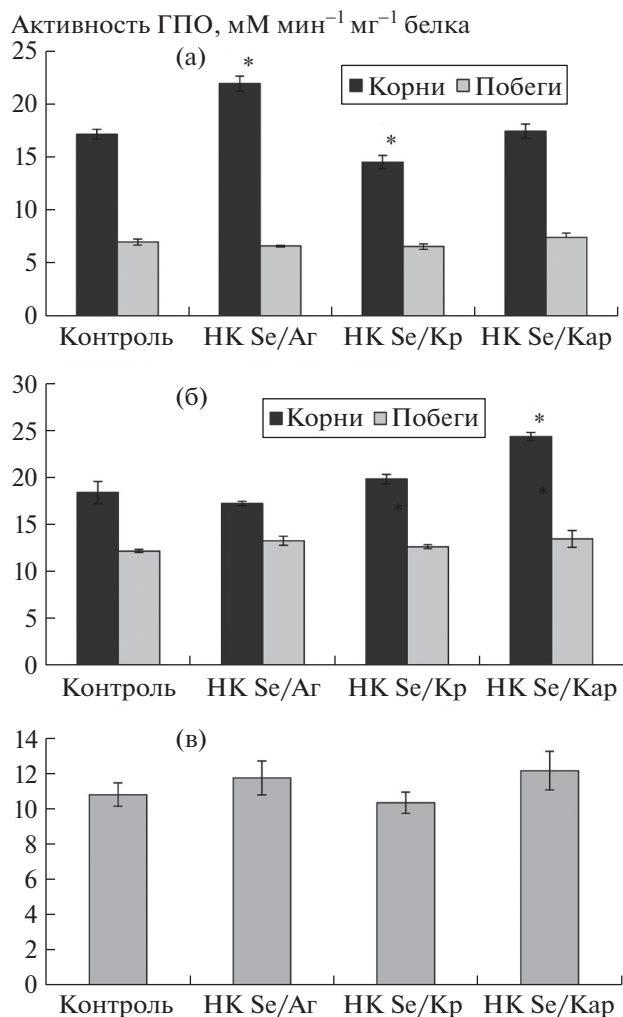
**Рис. 1.** Влияние НК селена в природных матрицах на содержание ДК в тканях корня и побега редиса (а), сои (б) и проростков картофеля (в). С – содержание ДК,  $\mu\text{M g}^{-1}$  сырой массы.  $M \pm SE$ . \* – достоверные отличия от контроля,  $p < 0.05$ ,  $n = 3$ .

больше, чем у контрольных растений [13]. Влияния НК на длину побегов редиса не было обнаружено (табл. 1). Исследования, проведенные на семенах сои, демонстрируют достоверную стимуляцию роста и увеличения массы побегов по сравнению с контролем при обработке семян НК Se/Kp и НК Se/Kar. Кроме того, под влиянием этих НК увеличивалась длина корня сои, а НК Se/Kar также стимулировал рост его биомассы (табл. 1). Эффект воздействия на прорастание клубней картофеля наблюдался только в варианте с НК Se/Kar (табл. 1).

Прорастание семян всегда сопровождается активированием окислительных процессов, поэтому в качестве биохимической характеристики

долгосрочного влияния НК на рост и развитие растений определяли содержание первичных продуктов ПОЛ, а именно ДК, в тканях корня и побега. Известно, что повышение интенсивности процессов ПОЛ наблюдается при биохимическом повреждении клеток, вызванном высоким содержанием активных форм кислорода (АФК). Кроме того, АФК являются молекулами-мессенджерами, запускающими защитные механизмы, повышающие устойчивость клетки к стрессам различной природы [14]. В нашей работе обнаружено, что обработка семян НК приводила к достоверному снижению содержания ДК в тканях корня редиса по сравнению с контролем (рис. 1а). В тканях побега редиса было отмечено повышение содержания ДК относительно контроля, но только при воздействии НК Se/Ag. Не выявлено влияния НК на уровень ДК в тканях корня сои (рис. 1б). Однако все исследуемые НК приводили к увеличению содержания ДК в тканях побега сои. Эффект воздействия на уровень ДК в тканях проростков картофеля был отмечен только в случае НК Se/Ag (снижение по сравнению с контролем, см. рис. 1в). Таким образом, НК Se/Ag оказывает разнонаправленное действие на уровень ПОЛ в растении, понижая его в корнях, но повышая в надземной части. По-видимому, НК Se/Ag приводит к увеличению количества АФК в побегах, что может повышать устойчивость растения к различным стрессовым факторам.

Контроль за уровнем ПОЛ в организме осуществляется с участием антиоксидантных ферментов [14]. Важная роль при этом отводится глутатионпероксидазе (ГПО), так как этот фермент участвует в восстановлении органических перекисей, образующихся при ПОЛ. Ранее было показано, что обработка семян НК селена приводит к значительному повышению активности ГПО в тканях томата спустя 50 сут после обработки [15]. В наших исследованиях также была определена активность этого фермента. Оказалось, что в норме активность ГПО примерно в 3 раза выше в корнях, чем в побегах проростков редиса. Показано, что замачивание семян в растворе НК Se/Ag способствовало достоверному повышению активности фермента в корнях на 40% по сравнению с контролем (рис. 2а). Можно отметить следующее: в варианте с обработкой семян НК Se/Ag снижение содержания ДК в корнях было максимальным (на 50% от контроля) в сравнении с другими НК, что согласуется с повышением активности ГПО (рис. 1). Обработка семян редиса НК Se/Kp и НК Se/Kar вызывала достоверное снижение активности ГПО в тканях корня по сравнению с контрольными растениями. Возможно, это связано с влиянием природных полимеров, в которые упакованы НК селена (крахмал и каррагинан), на высвобождение селена внутри растения. Влияние НК на активность фермента в тканях



**Рис. 2.** Влияние НК селена в природных матрицах на активность ГПО в тканях корня и побега редиса (а), сои (б) и проростков картофеля (в).  $M \pm SE$ . \* – достоверные отличия от контроля,  $p < 0.05$ ,  $n = 3$ .

побегов редиса (рис. 2а), также, как и в тканях побегов сои, выявлено не было (рис. 2б). У сои наблюдалось повышение активности ГПО только в тканях корня под влиянием НК Se/Кар. Именно в этом варианте обработки семян сои было отмечено повышение массы корня (табл. 1). По-видимому, детоксикация тканей растения благодаря высокой активности ГПО способствовала увеличению биомассы корня. Активность фермента в тканях проростков картофеля не изменялась под воздействием НК (рис. 2в).

Таким образом, в настоящей работе показано, что НК селена стимулируют рост корней при прорастания семян растений. В зависимости от вида растения этот процесс может быть связан с понижением интенсивности процессов ПОЛ в тканях корня и их активацией в тканях побегов. По-видимому, на редисе этот эффект в случае НК Se/Ag

можно объяснить активацией ГПО, а при использовании НК Se/Кр и НК Se/Кар – других антиоксидантных ферментов. НК Se/Аг, кроме того, вызывает индуцированную системную устойчивость растений редиса и сои, приводя к повышению уровня ПОЛ в тканях побегов. Стимуляция роста корней сои под влиянием НК Se/Кар аналогично может быть обусловлена повышением активности ГПО. У картофеля этот НК также приводил к стимуляции прорастания, однако это, вероятно, связано с активацией иных антиоксидантных ферментов. Эти результаты позволяют рассматривать НК селена в качестве потенциальных ростостимуляторов сельскохозяйственных растений.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием коллекций ЦКП “Биоресурсный центр” Сибирского института физиологии и биохимии растений СО РАН.

Авторы выражают благодарность зав. лабораторией физиолого-биохимической адаптации СИФИБР СО РАН к.б.н. Дорофееву Николаю Владимировичу за предоставление семян редиса и сои для проведения экспериментов.

### КОНФЛИКТОВ ИНТЕРЕСОВ

Все авторы декларируют отсутствие каких-либо конфликтов интересов, связанных с рукописью.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации для молодых ученых – кандидатов наук № МК-1220.2019.11 и проектом АААА-А19-119022690046-4.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhao L., Lu L., Wang A., et al. // J. Agric. Food Chem. 2020. V. 68 (7). P. 1935–1947. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b06615>
2. Перфильева А.И., Ножкина О.А., Граскова И.А., и др. // Изв. АН, сер. хим. 2018. № 1. С. 157–163.
3. Перфильева А.И., Ножкина О.А., Граскова И.А., и др. // ДАН. 2019. Т. 489. № 3. С. 325–330.
4. Ножкина О.А., Перфильева А.И., Граскова И.А., и др. // Российские нанотехнологии. 2019. Т. 14. № 5–6. С. 74–81.
5. Manesh R.R., Grassi G., Bergami E., et al. // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018. V. 148. P. 359–366. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.051>
6. Zuverza-Mena N., Armendariz R., Peralta-Videa J.R., et al. // Front. Plant Sci. 2016. V. 7. P. 90. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00090>
7. Diers B.W., Specht J., Rainey K.M., et al. // G3 (Bethesda). 2018. V. 8 (10). P. 3367–3375. <https://doi.org/10.1534/g3.118.200332>

8. Карпова Е.А., Сухов Б.Г., Колесникова Л.И. и др. Антиоксидантное средство с гепатопротекторным эффектом на основе наноструктурированного селена и способы его получения и применения. Патент на изобретение RUS 2557992 30.12.2013.
9. Lesnichaya M.V., Shendrik R., Sukhov B.G. // *J. Lumin.* 2019. V. 211. P. 305–313.  
<https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2019.03.056>
10. Владимиров Ю.А., Арчаков А.И. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах. М.: Наука, 1972. 252 с.
11. Pagila D.E., Valentine W.N. // *Lab. Clin. Med.* 1967. V. 70. P. 158–169.
12. Corral-Diaz B., Peralta-Videa J.R., Alvarez-Parrilla E., et al. // *Plant Physiol. Biochem.* 2014. V. 84. P. 277–285.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.09.018>
13. Нечитайло Г.С., Богословская О.А., Ольховская И.П., и др. // *Российские нанотехнологии.* 2018. Т. 13. № 3–4. С. 57–63.
14. Noctor G., Reichheld J.-P., Foyer C.H. // *Semin. Cell Dev. Biol.* 2018. V. 80. P. 3–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.semcdb.2017.07.013>
15. Hernández-Hernández H., Quiterio-Gutiérrez T., Cadenas-Pliego G., et al. // *Plants (Basel).* 2019. V. 8 (10). P. 355.  
<https://doi.org/10.3390/plants8100355>

## GROWTH-STIMULATING ACTIVITY OF NATURAL POLYMER-BASED NANOCOMPOSITES OF SELENIUM DURING THE GERMINATION OF CULTIVATED PLANT SEEDS

**V. N. Nurminsky<sup>a</sup>, A. I. Perfileva<sup>a, #</sup>, I. S. Kapustina<sup>a</sup>, I. A. Graskova<sup>a</sup>,  
B. G. Sukhov<sup>b</sup>, and Academician of the RAS B. A. Trofimov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>b</sup> *A.E. Favorsky Irkutsk Institute of Chemistry, SB RAS, Irkutsk, Russian Federation*

<sup>#</sup> *e-mail: alla.light@mail.ru*

The growth-stimulating activity of three selenium nanocomposites (NCs) in various matrices based on arabinogalactan (NC Se/AG, 6.4% Se), starch (NC Se/St, 2% Se) and carrageenan (NC Se/Car, 12% Se), against plants of radish, soybean and potato was investigated. It was shown that treatment of plant seeds with NCs stimulated root growth during germination. It was found that the studied NCs affected both the level of lipid peroxidation and the activity of the antioxidant enzyme glutathione peroxidase (GPX). Treatment of radish seeds with NCs stimulated root growth during their germination and reduced the content of diene conjugates (DC) in root tissues. It was shown that soaking seeds in NC Se/AG solution increased the GPX activity in the tissues of the radish root by 40%. Stimulation of soybean root growth under the influence of NC Se/Car can also be associated with the activation of GPX too. Furthermore, in potato plants, this NC led to the stimulation of germination, however, this is probably due to the activation of other antioxidant enzymes. The results obtained allow us to consider Se NCs as potential plant growth stimulants.

**Keywords:** nanocomposites, selenium, starch, arabinogalactan, carrageenan, radish, soybean, potato, diene conjugates, glutathione peroxidase, reactive oxygen species