



УДК 577.2

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.41.19>

## Ростостимулирующая активность медьсодержащих нанокompозитов в природных полимерных матрицах

А. Р. Харасова<sup>1</sup>, Т. В. Липчанская<sup>1</sup>, О. А. Ножкина<sup>2</sup>, А. В. Сидоров<sup>1,3</sup>,  
Т. В. Конькова<sup>4</sup>, А. И. Перфильева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Иркутский государственный медицинский университет Минздрава России, г. Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Институт химической кинетики и горения им В. В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск, Россия

E-mail: [alla.light@mail.ru](mailto:alla.light@mail.ru)

**Аннотация.** Исследована биологическая активность двух химически синтезированных нанокompозитов (НК) оксида меди(I) ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) на основе природных полимерных матриц арабиногалактана (НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$ ) и крахмала (НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$ ) с целью оценки перспектив разработки нового ростостимулятора для растений. Проанализированы результаты экспериментов по изучению влияния НК на показатели роста (длина и масса стеблей, биомасса корней) проростков сои и содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях их стеблей, а также на прирост стеблей и число листьев, биомассу надземной части растений и корней картофеля сорта «Луговской» *in vitro*, инфицированных возбудителем кольцевой гнили – бактерией *Clavibacter sepedonicus* и контрольных, и содержание диеновых конъюгатов (ДК) в тканях их листьев и корней.

**Ключевые слова:** арабиногалактан, крахмал, наночастицы, оксид меди(I), нанокompозиты, соя, картофель, биометрические характеристики, диеновые конъюгаты.

**Благодарности.** Авторы благодарны Н. В. Дорофееву за предоставление семян сои в качестве объекта для экспериментов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке проекта РФФИ № 20-53-44002.

**Для цитирования:** Ростостимулирующая активность медьсодержащих нанокompозитов в природных полимерных матрицах / А. Р. Харасова, Т. В. Липчанская, О. А. Ножкина, А. В. Сидоров, Т. В. Конькова, А. И. Перфильева // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2022. Т. 41. С. 19–34. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.41.19>

Research article

## Growth-Stimulating Activity Of Copper-Containing Nanocomposites In Natural Polymer Matrices

A. R. Kharasova<sup>1</sup>, T. V. Lipchanskaya<sup>1</sup>, O. A. Nozhkina<sup>2</sup>, A. V. Sidorov<sup>1,3</sup>,  
T. V. Konkova<sup>4</sup>, A. I. Perfiljeva<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Irkutsk State Medical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>4</sup>V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics and Combustion SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract.** The biological activity of two chemically synthesized nanocomposites (NC) of copper(I) oxide (Cu<sub>2</sub>O) based on natural polymer matrices of arabinogalactan (AG) and starch (ST) was studied in order to develop a new growth stimulator for plants. The results of experiments on studying the effect of NC on the growth rates (length and weight of stems, biomass of roots) of soybean seedlings and the content of diene conjugates (DC) in the tissues of their stems, as well as on the growth of stems and the number of leaves, the biomass of the aerial parts of plants and roots of the potato variety “Lugovskoy” in vitro, infected with the causative agent of ring rot – the bacterium *Clavibacter sepedonicus* and controls, and the content of DC in the tissues of their leaves and roots. The results of the study of the growth-stimulating effect on plants of Cu<sub>2</sub>O/AG and Cu<sub>2</sub>O/ST showed that only NC Cu<sub>2</sub>O/AG has this effect. Microscopy of potato root tissues using fluorescent dyes showed that when processing potatoes with NC Cu<sub>2</sub>O /AG, its roots do not die, the cells remain viable. The effect of the nanocomposite copper oxide-starch Cu<sub>2</sub>O/ST on soybean seedlings was expressed in a decrease in the growth and weight of the stems, a neutral effect on the length and weight of the roots, and an increase in the content of DC in their tissues. The same kind of effect was also registered on microclonal potato plants. On the contrary, the nanocomposite of copper oxide – arabinogalactan Cu<sub>2</sub>O/AG stimulated an increase in the length and weight of the stems of soybean seedlings, as well as the biomass of roots and significantly reduced the level of DC in their tissues. A negative effect on the growth and development of potatoes, as well as the status of the redox system of potatoes, both infected with the *Cms* pathogen and free from infection, was not established: the level of DC in its tissues did not increase. The experiments performed indicate the prospects of using the nanocomposite copper oxide – arabinogalactan Cu<sub>2</sub>O/AG of arabinogalactan as a means for combating bacterial pathogens of agricultural crops.

**Keywords:** arabinogalactan, starch, nanoparticles, copper(I) oxide, nanocomposites, soy, potato, biometric characteristics, diene conjugates.

---

**For citation:** Kharasova A.R., Lipchanskaya T.V., Nozhkina O.A., Sidorov A.V., Konkova T.V., Perfileva A.I. Growth-Stimulating Activity of Copper-Containing Nanocomposites in Natural Polymer Matrices. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2022, vol. 41, pp. 19-34. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2022.41.19> (in Russian)

---

## Введение

Широкое внедрение нанотехнологий во многие сферы науки и производства в медицине выразилось в применении нанотехнологичного материала для изготовления протезов, в качестве противоопухолевых средств с целевой доставкой лекарственных препаратов [Rare earth smart ... , 2021; Applications of nanotechnology ... , 2019; Implications of nanotechnology ... , 2021]. В производстве – это изготовление продуктивного и малозатратного оборудования [Synthesis and processing ... , 2022; A survey on ... , 2021]. В сельском хозяйстве – применение в качестве ростостимуляторов растений и пестицидов нового поколения [Singh, Handa, Manchanda, 2021; Noble metal nanoparticles ... , 2022]. Чрезвычайно высокий интерес к наночастицам (НЧ) металлов и оксидов металлов в сельском хозяйстве обусловлен фактом обеднения природных ресурсов, а также тем, что НЧ являются высокоэффективными антимикробными агентами [Synthesis and processing ... , 2022].

Изучено действие на растения разнообразных нанокмпозитов (НК) на основе НЧ тяжёлых металлов (ТМ). Так, НЧ серебра (Ag) влияют на вегетацию и продуктивность растений, увеличивают массу корней рапса [Влияние

высокодисперсных частиц ... , 2013], активируют прорастание семян босвеллии [Взаимодействие наночастиц ... , 2016], пшеницы [Silver nanobioscomposites ... , 2018] и увеличивают содержание аскорбиновой кислоты, нужной для прорастания семян спаржи [Yan, Chen, 2019]. На арабидопсисе показано, что НЧ Ag влияют на экспрессию генов в клетке растений, в частности кодирующих синтез фитогормонов [The current aspects ... , 2019]. НЧ марганца (Mn) повышают устойчивость растений к абиотическим стрессам, стимулируя рост [Can abiotic stresses ... , 2019]. НЧ железа (Fe) в низких концентрациях способствуют росту растений, увеличивают число хлоропластов и качество укладки гран в них, что ведёт к повышению интенсивности фотосинтеза. Однако высокие концентрации НЧ Fe нежелательно сказываются на растении, поскольку большинство НЧ Fe агрегируют с клеточными стенками, а также транспортируются по апопластам в корни, что, вероятно, может блокировать перенос питательных веществ [New insights into ... , 2018]. НЧ цинка (Zn) усиливают скорость роста, увеличивают массу надземной и подземной частей растения [Influence of zinc ... , 2021]. Было показано, что НЧ оксида цинка (ZnO) увеличивают количество антиоксидантов при абиотическом стрессе, снижают выработку активных форм кислорода (АФК) и продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) на проростках бобов мунг (*Vigna radiata* L.) [Zinc oxide nanoparticles ... , 2022]. Низкие концентрации НЧ ZnO могут повышать эффективность растений по извлечению ТМ из загрязнённой почвы и воды с помощью нанофиторемедиации [Hussain, Hadi, Rongliang, 2021].

Известно, что медь играет немаловажную роль в биохимических процессах растений, принимая участие в фотосинтезе, отвечает за устойчивость растений к бактериальным и грибковым заболеваниям, содержится в медьсодержащих ферментах и определяет их активность [Чурилова, Чурилов, Полещук, 2020]<sup>1</sup>. НК Cu, инкапсулированные в полисахарид, выделенный из травы горца птичьего, используют для предпосевной обработки семян. Другие виды НК Cu также известны как стимуляторы роста и иммунитета у растений [A review on ... , 2019].

Цель работы – исследование медьсодержащих наноконкомпозитов в полисахаридной матрице арабиногалактана и крахмала в качестве ростостимуляторов растений. Исследование выполнено на модельных объектах – растениях картофеля *in vitro* и семенах сои.

### **Материалы и методы**

*Медьсодержащие наноконкомпозиты.* НК были синтезированы в Институте химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского СО РАН (г. Новосибирск).

НК медь-арабиногалактан (Cu<sub>2</sub>O/АГ) синтезировали по следующей методике. К раствору 1 г арабиногалактана в 6 мл воды при интенсивном пере-

---

<sup>1</sup> Чурилова В. В., Чурилов Г. И., Полещук С. Д. Средство для препосевной обработки семян сельскохозяйственных растений и способ его применения: пат. Рос. Федерации 2020106854. № RU 2735268C1; заявл. 13.02.2020; опубл. 29.10.2020. Бюл. № 31.

мешивании приливали 2 мл водного раствора  $\text{CuCl}_2$ , содержащего 0,09 г  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , выдерживали 30 мин при 320 К, затем добавляли 5 мл водного раствора, содержащего 0,08 г  $\text{NaBH}_4$  и 0,003 г  $\text{NaOH}$ , выдерживали реакционную смесь 3 ч при интенсивном перемешивании и фильтровали через бумажный фильтр. Целевой продукт выделяли из фильтрата и очищали от низкомолекулярных примесей двухкратным переосаждением из этилового спирта, высушивали в вакууме. Содержание  $\text{Cu}$  в образце НК, определённое методом рентгеновского энергодисперсионного микроанализа (РСМА), составило 7,5 %.

НК медь-крахмал ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$ ) синтезировали следующим образом. К раствору 3 г крахмала (картофельного, сорт «экстра») в 25 мл воды при интенсивном перемешивании приливали 8 мл водного раствора, содержащего 0,8 г  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , выдерживали 30 мин при 320 К, затем добавляли 15 мл водного раствора, содержащего 0,7 г  $\text{NaBH}_4$  и 0,03 г  $\text{NaOH}$ , выдерживали реакционную смесь 3 ч при интенсивном перемешивании и фильтровали через бумажный фильтр. Целевой продукт выделяли из фильтрата и очищали от низкомолекулярных примесей двухкратным переосаждением из этилового спирта, высушивали в вакууме. Содержание  $\text{Cu}$  в образце НК, определённое методом РСМА, составило 20,3 %. Для экспериментов использовали растворы НК, в которых содержание меди в конечной концентрации составляло 0,000625.

Идентификацию кристаллической упаковки  $\text{Cu}_2\text{O}$  проводили рентгенофазовым методом на порошковом рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE (Bruker, Германия).

*Эксперименты с семенами сои.* Для изучения влияния НК на интенсивность прорастания семян проведена серия опытов по влиянию полученных НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  на прорастание семян сои. Исследования проводились 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 теплообеспечения и холодового стресса [Холодоустойчивый сорт сои ... , 2021].

Семена дезинфицировали в 96%-ном этиловом спирте 1 мин, в 3 %-ной перекиси водорода 20 мин. После трёхкратного отмывания семена на 30 мин замачивали в растворе НК. Контрольные семена замачивали в воде, далее обсушивали и высаживали на влажную фильтровальную бумагу в чашки Петри. Спустя 6 сут анализировали длину и массу стебля и корня, а также количество диеновых конъюгатов (ДК) в тканях стебля и корня.

*Культивирование растений картофеля.* Влияние НК  $\text{Cu}_2\text{O}$  изучали на растениях картофеля *in vitro* сорта «Луговской». Микрочлониальное размножение пробирочных растений осуществляли с помощью черенкования на агаризованной питательной среде Мурасиге – Скуга для контрольных растений и на средах, где в составе микросолей сульфат меди был заменён на НК. Растения культивировали в факторостатных условиях в течение 42 сут при 26 °С и освещённости 5–6 клк, еженедельно регистрируя прирост стебля и число листьев.

**Культивирование бактерий.** Объектом исследований выбран бактериальный возбудитель кольцевой гнили *Clavibacter sepedonicus* (*Cms*), штамм Ас-1405 – карантинный вид грамположительной палочкообразной неспорообразующей фитопатогенной бактерии [Bacterial ring rot ... , 2022]. Для роста бактерий использовали питательную среду следующего состава (г/л): дрожжевой экстракт – 5, пептон – 10, глюкоза – 5, NaCl – 5, агар – 7; pH среды 7,2.

**Биохимические исследования.** Растения картофеля *in vitro* переносили в жидкую питательную среду Мурасиге-Скуга, спустя 2 сут в среду вносили водные растворы НК и суспензию *Cms*. Растения инкубировали вместе с НК и с *Cms* 1 ч, затем определяли содержание первичных продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) – ДК в тканях корней и листьев по стандартной методике с использованием гексана и изопропанола [Владимиров, Арчаков, 1972].

**Микроскопия с использованием красителей.** Определение жизнеспособности тканей корня картофеля *in vitro* осуществляли с использованием метода двойного окрашивания флуоресцентными красителями: флуоресцеин диацетатом (fluorescein diacetate, FDA) в конечной концентрации 50 мкМ (Sigma, Германия) и пропидий йодидом (propidium iodide, PI) в конечной концентрации 7,5 мкМ (Biotium, США) методом двойного окрашивания. Растения картофеля *in vitro* переносили в жидкую питательную среду Мурасиге – Скуга. Спустя 3 сут в среду роста растений вносили водные растворы НК и суспензию *Cms*. Растения инкубировали вместе с НК и *Cms* 3 сут, далее определяли жизнеспособность тканей корня, помещая их в 200 мкл жидкой среды Мурасиге – Скуга и инкубируя с указанными красителями в течение 5 мин при 26 °С. FDA является витальным (прижизненным) красителем и исходно представляет собой нефлуоресцирующее соединение. Флуоресценцию проникшего через клеточные мембраны живой клетки FDA оценивали в зелёном канале с использованием Filter set 10 (EX BP 450–490, BS FT 510, EM BP 565). Флуоресценцию проникшего в мёртвые и погибающие клетки с нарушенной проницаемостью плазматической мембраны PI оценивали в красном канале с использованием Filter set 15 (EX BP 546/12, BS FT 580, EM LP 590). Для количественного подсчёта живых (окрашенных FDA в зелёный цвет) и мёртвых (окрашенных PI в красный цвет или неокрашенных) клеток в каждом эксперименте оценивали 10 случайных полей зрения, полученных с использованием флуоресцентного микроскопа [Yamori, Kogami, Masuzawa, 2005].

Статистическая обработка данных проведена с применением программы Excel (MS Office). Полученные данные статистически сопоставлены с использованием непараметрического U-критерия Манна – Уитни.

### **Результаты и обсуждение**

Исследования биологической активности НК по отношению к семенам сои и растениям картофеля *in vitro* реализованы в серии опытов по влиянию НК Cu<sub>2</sub>O/АГ и Cu<sub>2</sub>O/КР на их прорастание и развитие. Результаты опытов показали, что НК Cu<sub>2</sub>O/АГ усиливал прорастание семян сои и увеличивал

массу стебля проростков, а НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$ , напротив, снижал эти показатели по сравнению с контролем (рис. 1, б, з). Обнаружено, что НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  не оказывал стимулирующего действия на длину корня (рис. 1, а, в). НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  увеличивал массу корня проростков, тогда как НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  не оказывал эффекта на исследуемый показатель (рис. 1, д).

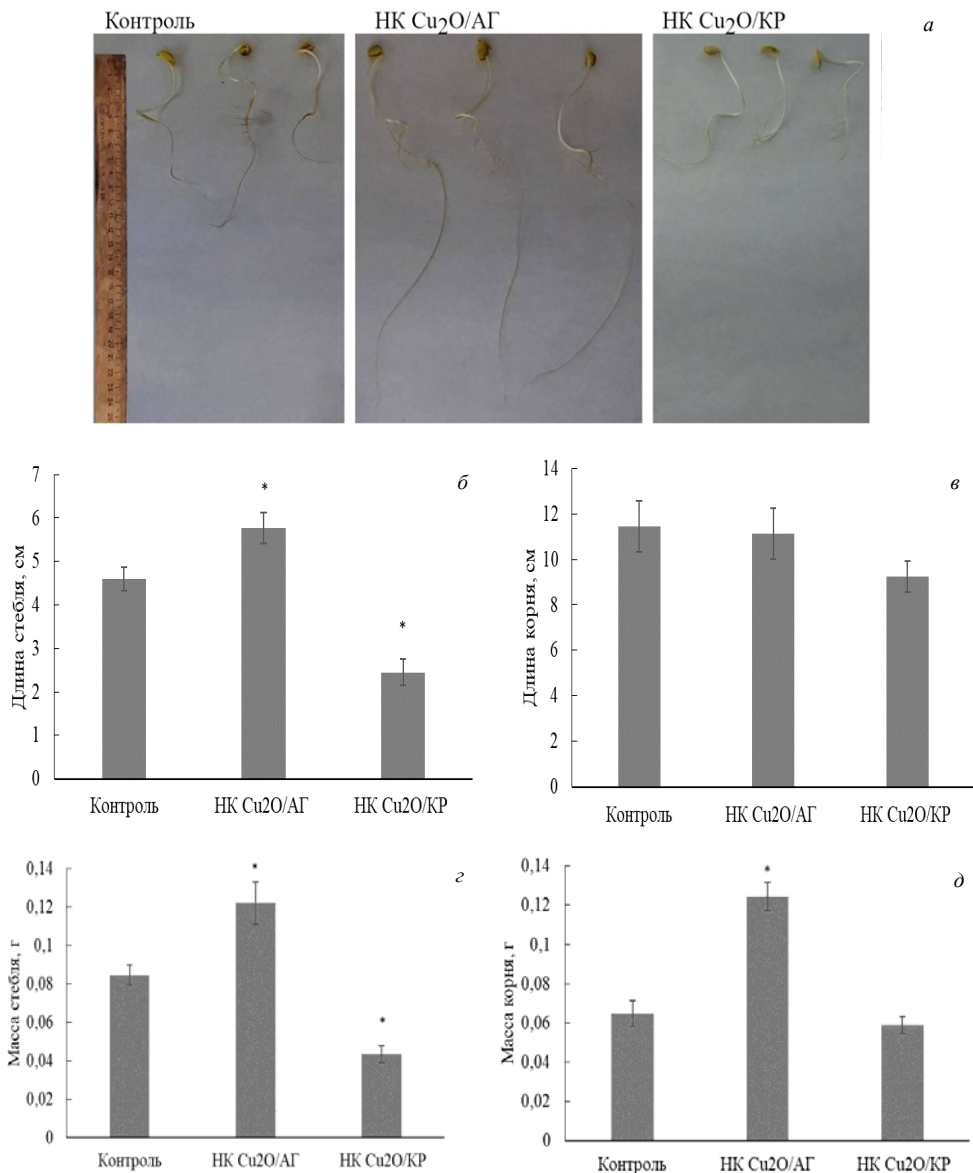


Рис. 1. Влияние медьсодержащих НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  и  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  на развитие проростков сои: а – влияние на прорастание семян сои; б – влияние на длину стебля проростков; в – влияние на длину корня проростков; г – влияние на массу стебля проростков; д – влияние на массу корня проростков. \* –  $p \leq 0,01$ , значение показателя находится в зоне значимости

Исследовано содержание ДК в тканях корня (а) и стебля (б) проростков сои. Следствием окислительного стресса, вызываемого ростом содержания АФК, является активация процессов ПОЛ. Свободные радикалы запускают каскад реакций, приводящий к нарушению барьерных функций биологических мембран и появлению ДК – первичных продуктов ПОЛ, затем вторичных продуктов ПОЛ и заканчивающийся потерей мембран и апоптозом клетки [Abeyrathne, Nam, Dong, 2021]. В описываемом эксперименте было оценено содержание ДК в тканях проростков сои. Выявлено, что НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  незначительно снижал показатель ДК в тканях стебля относительно контрольных образцов, в опытах с НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  влияния на содержание ДК не обнаружено (рис. 2, а). В тканях корня под влиянием НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  содержание ДК по сравнению с контролем повышалось. Возможно, это связано с высоким содержанием НЧ оксида меди(II), в избыточном количестве вызывающих стресс у растения. НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  не вызывал повышения содержания ДК (рис. 2, б).

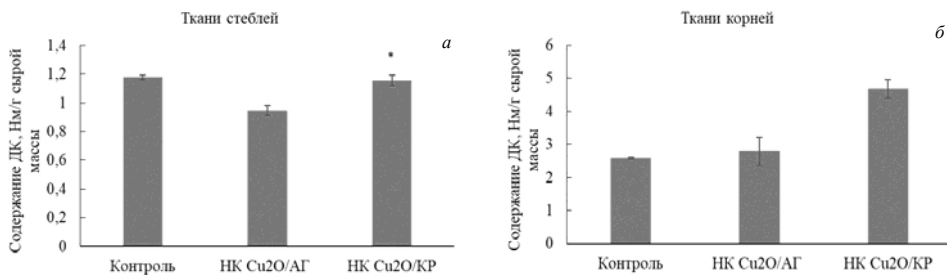


Рис. 2. Влияние НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  и НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  на содержание ДК в тканях стебля (а) и корня (б) проростков сои. \* –  $p \leq 0,01$ , значение показателя находится в зоне значимости

Результаты опытов продемонстрировали стимулирующее действие НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  на прорастание семян сои. Влияние НЧ оксидов ТМ на прорастание семян описывалось ранее: выявлен положительный эффект НЧ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  на прорастание сои, отмечено увеличение биомассы проростков, удлинение корней, повышение содержания хлорофилла и увеличение содержания лигнина в корнях [Soybean interaction ... , 2019]. Также имеются данные об усилении прорастания и роста семян *Glycine max* при воздействии НЧ  $\text{TiO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  [Metal/Metalloid-based ... , 2022].

Наблюдавшееся в нашем исследовании нейтральное действие НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  на прорастание семян сои также известно: воздействие биогенных НЧ  $\text{Ag}$  не приводило к изменениям длины побегов и корней культивируемых в почве саженцев сои. Влияние НЧ  $\text{Ag}$  на параметры газообмена их листьев не вызывало изменений скорости интенсивности фотосинтеза, однако привело к снижению на 15 % устьичной проводимости и увеличению на 19 % внутренней эффективности водопользования [Effects of biogenic ... , 2022].

В опытах на вегетирующих растениях картофеля *in vitro* сорта «Луговской» установлено, что НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  не оказывал негативного влияния на

прирост стеблей и число листьев (рис. 3, а, б), биомассу надземной части растений и корней (табл.). НК Cu<sub>2</sub>O/КР демонстрировал противоположный эффект, снижая прирост и число листьев (рис. 3, в, г), а также увеличивая биомассу надземной части и корней растений картофеля *in vitro* (см. табл.).

Таблица

Влияние НК Cu<sub>2</sub>O/АГ и НК Cu<sub>2</sub>O/КР на биомассу корней и надземной части, г

| Масса           | Контроль    | НК Cu <sub>2</sub> O/АГ | НК Cu <sub>2</sub> O/КР |
|-----------------|-------------|-------------------------|-------------------------|
| Корней          | 0,144±0,022 | 0,1536±0,022            | 0,187±0,018             |
| Надземной части | 0,346±0,019 | 0,344±0,029             | 0,352±0,033             |

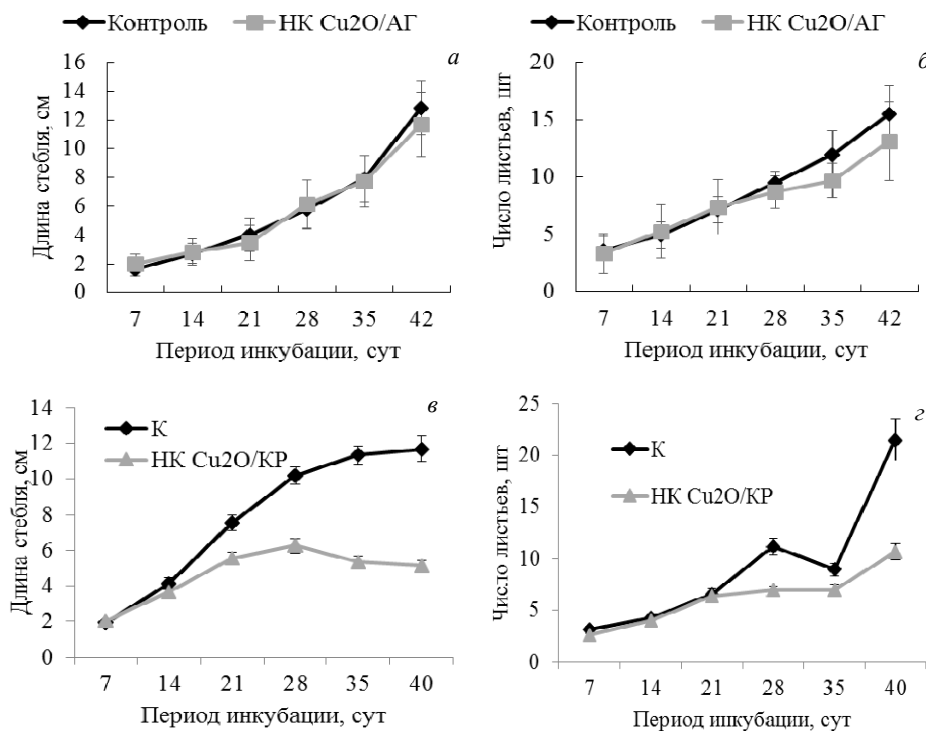


Рис. 3. Влияние НК Cu<sub>2</sub>O/АГ (а, б) и НК Cu<sub>2</sub>O/КР (в, г) на жизнеспособность картофеля *in vitro*

Была проведена также оценка жизнеспособности корней картофеля *in vitro* с применением двойного окрашивания флуоресцентными красителями. Для этого сравнили образцы контрольных растений, растений, инфицированных возбудителем кольцевой гнили картофеля – бактерией *Clavibacter sepedonicus*, и растений, проинкубированных с НК Cu<sub>2</sub>O/АГ в течение 5 сут (рис. 4). В эксперименте использован только НК Cu<sub>2</sub>O/АГ, показавший в предыдущих опытах отсутствие негативного влияния на рост и развитие картофеля *in vitro*. По результатам микроскопии выявлено, что в образцах контрольных растений наблюдается нормальная картина развития корня, т. е. активное развитие корневого чехлика, зоны корневых волосков, интенсивное



деление клеток, о чём свидетельствует зелёная окраска тканей (рис. 4, *а*). В образцах инфицированных растений в зоне корневого чехлика наблюдается гибель клеток, о чём свидетельствует красное свечение. Отмечены 60–70%-ные потери жизнеспособности клеток корня, изрежение корневых волосков по сравнению с контролем (рис. 4, *б*). При инкубировании растений с НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  корневые волоски выглядят менее развитыми по сравнению с контролем, однако сохраняется их жизнеспособность. В корневом чехлике наблюдается наличие мёртвых клеток, однако их количество меньше, чем у заражённых растений, что может быть объяснено действием физиологических процессов, происходящих при росте и развитии корня (рис. 4, *в*).

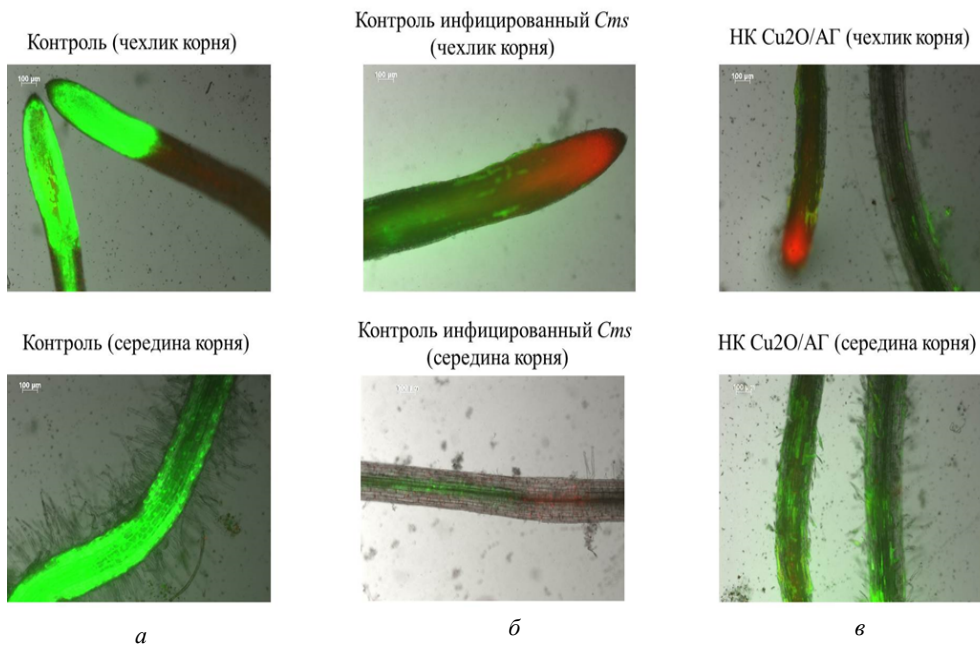


Рис. 4 Двойное окрашивание флуоресцентными красителями тканей корня картофеля *in vitro*. Контроль (*а*), инфицирование *Sms* (*б*), инкубация с НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  (*в*). Красным цветом окрашиваются мёртвые клетки, зелёным – живые. Величина размерной линейки 100 мкм

Для оценки уровня стрессовой нагрузки на растения под влиянием НК и заражения было исследовано содержание ДК в тканях корней и листьев картофеля. Полученные результаты (рис. 5, *а*, *б*) свидетельствуют о том, что содержание ДК в тканях корней и листьев инфицированных *Sms* растений уменьшилось по сравнению с контролем, что может быть связано с действием иммунной системы растений устойчивого к инфекциям сорта картофеля. При обработке НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  в тканях корней здорового картофеля наблюдалось повышение уровня ДК, а в тканях листьев изменений не было обнаружено. После обработки инфицированных растений НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  уровень ДК в тканях корней и листьев не изменился. Добавление НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  привело к

повышению уровня ДК в тканях листьев здоровых растений, в тканях корней же изменений не было выявлено. В варианте с инфицированием растений *Sms* уровень ДК после 1 ч обработки НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  повышался в тканях корней и листьев. Достоверное повышение уровня ДК в тканях картофеля при воздействии НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  подтверждает негативное влияние этого НК на рост и развитие растений картофеля (см. рис. 3, в, г). Таким образом, НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  не оказывает ингибирующего эффекта на окислительный стресс клеток, а скорее даже усиливает его. Вероятно, такой эффект связан с высоким содержанием НЧ  $\text{Cu}_2\text{O}$  в этом НК.

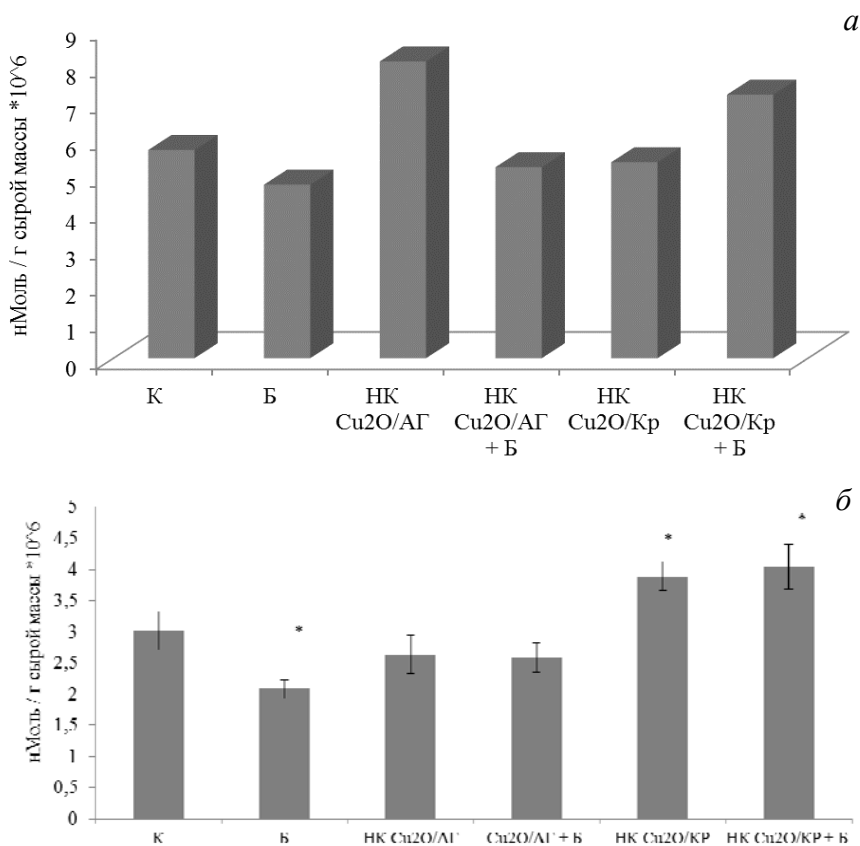


Рис. 5. Содержание ДК в тканях корней (а) и листьев (б) картофеля. К – контроль; Б – заражение растений *Clavibacter sepedonicus*; НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$  – внесение НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$  в среду роста растения; НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG} + \text{Б}$  – внесение НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{AG}$  в среду роста инфицированного *C. sepedonicus* растения; НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  – внесение НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  в среду роста растения; НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP} + \text{Б}$  – внесение НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{KP}$  в среду роста инфицированного *C. sepedonicus* растения. \* –  $p \leq 0,01$ , значение показателя находится в зоне значимости

Существует множество научных работ, посвящённых изучению влияния различных НЧ, в том числе и оксида меди(II), на разнообразные морфологические критерии растений. Японскими учёными были проведены серии опы-

тов на ростках пшеницы с целью определения экологической токсичности НЧ  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Полученные результаты показали, что соединение способно подавлять рост проростков, сокращать рост длины и сырой массы побегов, а также корней. Кроме того, при внесении НЧ в высокой концентрации корни пшеницы становились твёрдыми и ломкими, а их зона деления укорачивалась [Impacts of cuprous ... , 2021].

Известно, что ТМ в различной концентрации вызывают увеличение содержания АФК и продуктов ПОЛ в растениях [Exogenous nitric oxide ... , 2015]. Например, описано действие НЧ  $\text{ZnO}$  на проростки сои, выражающееся в росте концентрации  $\text{H}_2\text{O}_2$  и продуктов ПОЛ [Investigation of  $\text{ZnO}$  ... , 2019]. НЧ  $\text{CuO}$  в определённой концентрации могут вызывать образование АФК. В исследовании их действия на физиологические, биохимические и молекулярные показатели проростков рапса установлено, что при обработке растений раствором, содержащим НЧ  $\text{CuO}$  (100 мг/л), образуются различные формы АФК (N-окисильные, пероксильные радикалы) [Prakash, Gopalakrishnan, Chung, 2017; Fargašová, 2004]. Однако различное влияние НК на исследуемый показатель, возможно, связано с природой самого полисахарида, из которого синтезирован НК, так как известно, что арабиногалактан обладает биологической активностью [Chen, Huang, 2018].

### **Заключение**

Результаты исследования ростостимулирующего действия на растения медьсодержащих наноконпозитов, сформированных в полисахаридной матрице арабиногалактана ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$ ) и крахмала ( $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$ ), показали, что указанный эффект наблюдается только при воздействии НК  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$ . Влияние наноконпозита оксид меди – крахмал  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{КР}$  на проростки сои выразилось в снижении прироста и массы стеблей, нейтральном действии на длину и массу корней и увеличении содержания ДК в их тканях. Такого же рода воздействие оказано и на микроклональные растения картофеля. Наноконпозит оксид меди – арабиногалактан  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$ , напротив, стимулировал увеличение длины и массы стеблей проростков сои, достоверно снижал уровень ДК в их тканях. Не установлено и негативное влияние на рост и развитие картофеля, а также статус окислительно-восстановительной системы картофеля, как заражённого патогеном *Cms*, так и свободного от инфекции: уровень ДК в его тканях не возростал.

Проведённые эксперименты указывают на перспективность использования наноконпозита оксид меди –  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{АГ}$  арабиногалактана в качестве средства для борьбы с бактериальными патогенами сельскохозяйственных культур.

### **Список литературы**

Взаимодействие наночастиц золота, серебра и магния с растительными объектами / Л. А. Дыкман, В. А. Богатырёв, О. И. Соколов, В. К. Плотников, Н. В. Репко, А. А. Салфетников // Научный журнал КубГАУ. 2016. № 6. Р. 675–705.

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

Влияние высокодисперсных частиц различной природы на ранние стадии онтогенеза растений рапса (*Brassica napus*) / А. А. Гусев, О. А. Акимова, Ю. А. Крутяков, А. И. Климов, А. Н. Денисов, Д. В. Кузнецов, А. Ю. Годымчук, Е. С. Ихалайнен // Вестник Евразийской науки. 2013. № 5. С. 2–17.

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 review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application / S. Compant, A. Samad, H. Faist, A. Sessitsch // J. Adv. Res. 2019. Vol. 19. P. 29–37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>

A survey on analytical methods for the characterization of green synthesized nanomaterials / P. N. Catalano, R. G. Chaudhary, M. F. Desimone, P. L. Santo-Orihuela // Curr. Pharm. Biotechnol. 2021. Vol. 22, N 6. P. 823–847. <https://doi.org/10.2174/1389201022666210104122349>

Abeyrathne E. D. N. S., Nam K. S., Dong U. A. Analytical methods for lipid oxidation and antioxidant capacity in food systems // Antioxidants. 2021. Vol. 10. P. 1587. <https://doi.org/10.3390/antiox10101587>

Applications of nanotechnology in drug delivery to the central nervous system / M. Saeedi, M. Eslamifard, K. Khezri, S. M. Dizaj // Biomed. Pharmacother. 2019. Vol. 111. P. 666–675. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.133>

Bacterial ring rot of potato caused by *Clavibacter sepedonicus*: a successful example of defeating the enemy under international regulations / E. Osdaghi, J. M. Wolf, H. Abachi, X. Li, S. H. Boer, C. A. Ishimaru // Mol. Plant. Pathol. 2022. Vol. 23. N 7. P. 911–932. <https://doi.org/10.1111/mpp.13191>

Can abiotic stresses in plants be alleviated by manganese nanoparticles or compounds? / Y. Ye, I. A. Medina-Velo, K. Cota-Ruiz, F. Moreno-Olivas, J. L. Gardea-Torresdey // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2019. Vol. 184. P. 109671. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109671>

Chen F., Huang G. Preparation and immunological activity of polysaccharides and their derivatives // Int. J. Biol. Macromol. 2018. Vol. 112. P. 211–216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.169>

Effects of biogenic silver and iron nanoparticles on soybean seedlings (*Glycine max*) / M. Guilger-Casagrande, N. Bilesky-José, B. T. Sousa, H. C. Oliveira, L. F. Fraceto, R. Lima // BMC Plant Biol. 2022. Vol. 22. N 1. P. 255. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03638-1>

Exogenous nitric oxide (NO) interferes with lead (Pb)-induced toxicity by detoxifying reactive oxygen species in hydroponically grown wheat (*Triticum aestivum*) roots / G. Kaur, H. P. Singh, D. R. Batish, P. Mahajan, R. K. Kohli, V. Rishi // PLoS ONE. 2015. Vol. 10. P. 1–11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138713>

Fargašová A. Toxicity comparison of some possible toxic metals (Cd, Cu, Pb, Se, Zn) on young seedlings of *Sinapis alba* L // Plant Soil Environ. 2004. Vol. 50. P. 33–38. <https://doi.org/10.17221/3639-PSE>

Hussain F., Hadi F., Rongliang Q. Effects of zinc oxide nanoparticles on antioxidants, chlorophyll contents, and proline in *Persicaria hydropiper* L. and its potential for Pb phytoremediation // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2021. Vol. 28. N 26. P. 34697–34713. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13132-0>

Impacts of cuprous oxide nanoparticles on wheat root morphology and genotoxicity / Z. Q. Ma, Y. C. Xu, Z. J. Fan, D. Y. Hou, Q. Y. Xu // Ying Yong Sheng Tai Xue Bao. 2021. (Chinese). <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202103.031>

Implications of nanotechnology for the treatment of cancer: recent advances / S. G. Klochkov, M. E. Neganova, V. N. Nikolenko, K. Chen, S. G. Somasundaram, C. E. Kirkland, G. Aliiev // Semin. Cancer Biol. 2021. Vol. 69. P. 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2019.08.028>

Influence of zinc nanoparticles on the development of sprouts of *Avena sativa* and *Pisum sativum* plants / A. T. Serikbai, A. M. Aitkulov, A. A. Zeinidenov, W. Pusz // Bulletin of the Karaganda University, Biology, Medicine, Geography Series. 2021. Vol. 104, N 4. P. 78–84. <https://doi.org/10.31489/2021BMG4/78-84>

Investigation of ZnO nanoparticles on proline, anthocyanin contents and photosynthetic pigments and lipid peroxidation in the soybean / S. Hashemi, Z. Asrar, S. Pourseyedi, N. Nadernejad // IET Nanobiotechnol. 2019. Vol. 13, N 1. P. 66–70. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2018.5212>

Metal/Metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: an overview of the mechanisms / M. Sarraf, K. Vishwakarma, V. Kumar, N. Arif, S. Das, R. Johnson, E. Janeeshma, J. T. Puthur, S. Aliniaiefard, D. K. Chauhan, M. Fujita, M. Hasanuzzaman // Plants. 2022. Vol. 11. N 3. P. 316. <https://doi.org/10.3390/plants11030316>

New insights into the cellular responses to iron nanoparticles in *Capsicum annum* / J. Yuan, Y. Chen, H. Li, J. Lu, H. Zhao, M. Liu, G. S. Nechitaylo, N. N. Glushchenko // Sci. Rep. 2018. Vol. 8. N 1. P. 3228. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w>

Noble metal nanoparticles in agriculture: impacts on plants, associated microorganisms, and biotechnological practices / L. Burketová, J. Martinec, J. Siegel, A. Macurková, L. Maryska, O. Valentová // Biotechnol. Adv. 2022. Vol. 58. 107929. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107929>

Prakash M., Gopalakrishnan N., Chung I. M. Evaluation of stress effects of copper oxide nanoparticles in *Brassica napus* L // Biotech. 2017. Vol. 7, N 293. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0929-9>

Rare earth smart nanomaterials for bone tissue engineering and implantology: advances, challenges, and prospects / D. Natarajan, Z. Ye, L. Wang, L. Ge, J. L. Pathak // Bioeng. Transl. Med. 2021. Vol. 7. N 1. P. 10262. <https://doi.org/10.1002/btm2.10262>

Singh R. P., Handa R., Manchanda G. Nanoparticles in sustainable agriculture: an emerging opportunity // J. Control Release. 2021. Vol. 329. P. 1234–1248. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>

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

Synthesis and processing of nanomaterials mediated by living organisms / V. Calvo, J. M. González-Domínguez, A. M. Benito, W. K. Maser // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 2022. Vol. 61. N 9. P. 202113286. <https://doi.org/10.1002/anie.202113286>

The current aspects of using chemically synthesized compounds of silver nanoparticles in animal husbandry and agrochemistry / A. I. Perfilova, I. A. Graskova, O. A. Nozhkina, N. S. Zabanova, B. G. Sukhov, N. N. Shkil, E. V. Nefyodova // Nanotechnol. Russ. 2019. Vol. 14, N 9–10. P. 489–496. <https://doi.org/10.1134/S1995078019050112>

Yamori W., Kogami H., Masuzawa T. Freezing tolerance in alpine plants as assessed by the FDA-staining method // Polar Biol. 2005. Vol. 18. P. 73–81.

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

Zinc oxide nanoparticles interplay with physiological and biochemical attributes in terminal heat stress alleviation in mungbean (*Vigna radiata* L.) / H. A. Kareem, M. F. Saleem, S. Saleem, S. A. Rather, S. H. Wani, M. H. Siddiqui, S. Alamri, R. Kumar, N. B. Gaikwad, Z. Guo, J. Niu, Q. Wang // Front. Plant Sci. 2022. Vol. 13. 842349. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842349>

Silver nanobiocomposites based on humic substances as highly efficient stimulators of seed germination / G. Dolmaa, B. Bayaraa, E. Urantsetseg, G. Ganzayaa, G. Tserenkhand, D. Regdel, G. P. Aleksandrova, M. V. Lesnichaya, B. G. Sukhov, B. A. Trofimov // Nanotechnol. Russ. 2018. Vol. 13, N 5–6. P. 305–310.

## References

Dykman L.A., Bogatyrev V.A., Sokolov O.I., Plotnikov V.K., Repko N.V., Salfetnikov A.A. Vzaimodeistvie nanochastits zolota, srebra i magniya s rastitelnymi ob"ektami. *Sci. J. Kuban St. Agrar. Univ.*, 2016, no. 6, pp. 675-705. (in Russian)

Vladimirov Yu.A., Archakov A.I. *Perekisnoe okislenie lipidov v biologicheskikh membranakh*. Moscow, Nauka Publ., 1972, 252 p. (in Russian)

Gusev A.A., Akimova O.A., Krutyakov Yu.A., Klimov A.I., Denisov A.N., Kuznetsov D.V., Godymchuk A.Yu., Ikhalainen E.S. Vliyanie vysokodispersnykh chastits razlichnoi prirody na rannie stadii ontogeneza rastenii rapsa (*Brassica napus*). *Euras. Sci. J.*, 2013, no. 5, pp. 2-17. (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. Kholodoustoichivyyi sort soi severnogo ekotipa Sayana. *Oil crops*, 2021, is. 1 (185), pp. 95-102. (in Russian). <https://doi.org/10.25230/2412-608X-2021-1-185-95-102>

Compant S., Samad A., Faist H., Sessitsch A. A review on the plant microbiome: ecology, functions, and emerging trends in microbial application. *J. Adv. Res.*, 2019, vol. 19, pp. 29-37. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2019.03.004>

Catalano P.N., Chaudhary R.G., Desimone M.F., Santo-Orihuela P.L. A survey on analytical methods for the characterization of green synthesized nanomaterials. *Curr. Pharm. Biotechnol.*, 2021, vol. 22, no. 6, pp. 823-847. <https://doi.org/10.2174/1389201022666210104122349>

Abeyrathne E.D.N.S., Nam K.S., Dong U.A. Analytical methods for lipid oxidation and antioxidant capacity in food systems. *Antioxidants*, 2021, vol. 10, pp. 1587. <https://doi.org/10.3390/antiox10101587>

Saeedi M., Eslamifar M., Khezri K., Dizaj S.M. Applications of nanotechnology in drug delivery to the central nervous system. *Biomed. Pharmacother.*, 2019, vol. 111, pp. 666-675. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2018.12.133>

Osdaghi E., Wolf J.M., Abachi H., Li X., Boer S.H., Ishimaru C.A. Bacterial ring rot of potato caused by *Clavibacter sepedonicus*: a successful example of defeating the enemy under international regulations. *Mol. Plant. Pathol.*, 2022, vol. 23, no. 7, pp. 911-932. <https://doi.org/10.1111/mpp.13191>

Ye Y., Medina-Velo I.A., Cota-Ruiz K., Moreno-Olivas F., Gardea-Torresdey J.L. Can abiotic stresses in plants be alleviated by manganese nanoparticles or compounds? *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2019, vol. 184, 109671. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109671>

Chen F., Huang G. Preparation and immunological activity of polysaccharides and their derivatives. *Int. J. Biol. Macromol.*, 2018, vol. 112, pp. 211-216. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.01.169>

Guilger-Casagrande M., Bilesky-José N., Sousa B.T., Oliveira H.C., Fraceto L.F., Lima R. Effects of biogenic silver and iron nanoparticles on soybean seedlings (*Glycine max*). *BMC Plant Biol.*, 2022, vol. 21, no. 1, 255. <https://doi.org/10.1186/s12870-022-03638-1>

Kaur G., Singh H.P., Batish D.R., Mahajan P., Kohli R.K., Rishi V. Exogenous nitric oxide (NO) interferes with lead (Pb)-induced toxicity by detoxifying reactive oxygen species in hydroponically grown wheat (*Triticum aestivum*) roots. *PLoS ONE*, 2015, vol. 10, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138713>

Fargašová A. Toxicity comparison of some possible toxic metals (Cd, Cu, Pb, Se, Zn) on young seedlings of *Sinapis alba* L. *Plant Soil Environ.*, 2004, vol. 50, pp. 33-38. <https://doi.org/10.17221/3639-PSE>

Hussain F., Hadi F., Rongliang Q. Effects of zinc oxide nanoparticles on antioxidants, chlorophyll contents, and proline in *Persicaria hydropiper* L. and its potential for Pb phytoremediation. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2021, vol. 28, no. 26, pp. 34697-34713. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13132-0>

Ma Z.Q., Xu Y.C., Fan Z.J., Hou D.Y., Xu Q.Y. Impacts of cuprous oxide nanoparticles on wheat root morphology and genotoxicity. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*, 2021, vol. 32, no. 3 <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202103.031> (in Chinese)

Klochkov S.G., Neganova M.E., Nikolenko V.N., Chen K., Somasundaram S.G., Kirkland C.E., Aliev G. Implications of nanotechnology for the treatment of cancer: recent advances. *Semin. Cancer Biol.*, 2021, vol. 69, pp. 190-199. <https://doi.org/10.1016/j.semcancer.2019.08.028>

Serikbai A.T., Aitkulov A.M., Zeinidenov A.A., Pusz W. Influence of zinc nanoparticles on the development of sprouts of *Avena Sativa* and *Pisum sativum* plants. *Bull. Karaganda Univ. Ser. Biol. Medic. Geogr.*, 2021, vol. 104, no. 4, pp. 78-84. <https://doi.org/10.31489/2021BMG4/78-84>

Hashemi S., Asrar Z., Pourseyedi S., Nadernejad N. Investigation of ZnO nanoparticles on proline, anthocyanin contents and photosynthetic pigments and lipid peroxidation in the soybean. *IET Nanobiotechnol.*, 2019, vol. 13, no. 1, pp. 66-70. <https://doi.org/10.1049/iet-nbt.2018.5212>

Sarraf M., Vishwakarma K., Kumar V., Arif N., Das S., Johnson R., Janeesha E., Puthur J.T., Aliniaiefard S., Chauhan D.K., Fujita M., Hasanuzzaman M. Metal/Metalloid-based nanomaterials for plant abiotic stress tolerance: an overview of the mechanisms. *Plants*, 2022, vol. 11, no. 3, 316. <https://doi.org/10.3390/plants11030316>

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 annum*. *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, no. 1, 3228. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-18055-w>

Burketová L., Martinec J., Siegel J., Macurková A., Maryska L., Valentová O. Noble metal nanoparticles in agriculture: impacts on plants, associated microorganisms, and biotechnological practices. *Biotechnol. Adv.*, 2022, vol. 58. 107929. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2022.107929>

Prakash M., Gopalakrishnan N., Chung I. M. Evaluation of stress effects of copper oxide nanoparticles in *Brassica napus* L. *Biotech.*, 2017, vol. 7, no. 293. <https://doi.org/10.1007/s13205-017-0929-9>

Natarajan D., Ye Z., Wang L., Ge L., Pathak J.L. Rare earth smart nanomaterials for bone tissue engineering and implantology: advances, challenges, and prospects. *Bioeng. Transl. Med.*, 2021, vol. 7, no. 1, 10262. <https://doi.org/10.1002/btm2.10262>

Singh R.P., Handa R., Manchanda G. Nanoparticles in sustainable agriculture: an emerging opportunity. *J. Control Release*, 2021, vol. 329, pp. 1234-1248. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2020.10.051>

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

Calvo V., González-Domínguez J.M., Benito A.M., Maser W.K. Synthesis and processing of nanomaterials mediated by living organisms. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 2022, vol. 61, no. 9, 202113286. <https://doi.org/10.1002/anie.202113286>

Perfileva A.I., Graskova I.A., Nozhkina O.A., Zabanova N.S., Sukhov B.G., Shkil N.N., Nefyodova E.V. The current aspects of using chemically synthesized compounds of silver nanoparticles in animal husbandry and agrochemistry. *Nanotechnol. Russ.*, 2019, vol. 14, no. 9–10, pp. 489–496. <https://doi.org/10.1134/S1995078019050112>

Yamori W., Kogami H., Masuzawa T. Freezing tolerance in alpine plants as assessed by the FDA-staining method. *Polar Biol.*, 2005, vol. 18, pp. 73–81.

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

Kareem H.A., Saleem M.F., Saleem S., Rather S.A., Wani S.H., Siddiqui M.H., Alamri S., Kumar R., Gaikwad N.B., Guo Z., Niu J., Wang Q. Zinc oxide nanoparticles interplay with physiological and biochemical attributes in terminal heat stress alleviation in mungbean (*Vigna radiata* L.). *Front. Plant Sci.*, 2022, vol. 13, 842349. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.842349>

Dolmaa, G. Bayaraa B., Urantsetseg E., Ganzayaa G., Tserenkhand G., Regdel D., Aleksandrova G.P., Lesnichaya M.V., Sukhov B.G., Trofimov B.A. Silver nanobiocomposites based on humic substances as highly efficient stimulators of seed germination. *Nanotechnol. Russ.*, 2018, vol. 13, no. 5–6, pp. 305–310.

#### Сведения об авторах

**Харасова Анастасия Ренатовна**  
студент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: [Nastyia.Kharasova@yandex.ru](mailto:Nastyia.Kharasova@yandex.ru)

**Липчанская Татьяна Валерьевна**  
студент

Иркутский государственный университет  
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1  
e-mail: [t20010305@gmail.com](mailto:t20010305@gmail.com)

#### Information about the authors

**Kharasova Anastasia Renatovna**  
Student

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: [Nastyia.Kharasova@yandex.ru](mailto:Nastyia.Kharasova@yandex.ru)

**Lipchanskaya Tatiana Valeryevna**  
Student

Irkutsk State University  
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation  
e-mail: [t20010305@gmail.com](mailto:t20010305@gmail.com)

**Ножкина Ольга Александровна***ведущий инженер**Сибирский институт физиологии  
и биохимии растений СО РАН**Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова,  
132**e-mail: smallolga@mail.ru***Nozhkina Olga Aleksandrovna***Lead Engineer**Siberian Institute of Plant Physiology  
and Biochemistry SB RAS**132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation**e-mail: smallolga@mail.ru***Сидоров Александр Владимирович***старший преподаватель**Иркутский государственный медицинский  
университет**Россия, 664003, г. Иркутск, ул. Красного  
Восстания, 1**инженер**Сибирский институт физиологии  
и биохимии растений СО РАН**Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 132**e-mail: a\_v\_sidorov@mail.ru***Sidorov Aleksandr Vladimirovich***Senior Lecturer**Irkutsk State Medical University**1, Krasnogo Vosstaniya st., 664003, Irkutsk,  
Russian Federation**Engineer**Siberian Institute of Plant Physiology  
and Biochemistry SB RAS**132 Lermontov str., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation**e-mail: a\_v\_sidorov@mail.ru***Конькова Татьяна Владимировна***кандидат химических наук**научный сотрудник**Институт химической кинетики и горения  
им. В. В. Воеводского СО РАН**Россия, 630090, г. Новосибирск, ул.  
Институтская, 3**e-mail: Konbuiivol\_2@yahoo.com***Konkova Tatyana Vladimirovna***Candidate of Sciences (Chemistry)**Research Scientist**V.V. Voevodsky Institute of Chemical Kinetics  
and Combustion SB RAS**3, Institutskaya st., 630090, Novosibirsk,  
Russian Federation**e-mail: Konbuiivol\_2@yahoo.com***Перфильева Алла Иннокентьевна***кандидат биологических наук,**старший научный сотрудник**Сибирский институт физиологии  
и биохимии растений СО РАН**Россия, 664033, г. Иркутск,  
ул. Лермонтова, 132**e-mail: alla.light@mail.ru***Perfileva Alla Innokent'evna***Candidate of 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*

Статья поступила в редакцию 15.07.2022; одобрена после рецензирования 25.08.2022; принята к публикации 08.09.2022  
Submitted July, 15, 2022; approved after reviewing August, 25, 2022; accepted for publication September, 08, 2022