



УДК 577.2

<https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.44.3>

## Агрохимические аспекты применения медьсодержащих наноструктур: влияние на рост и развитие растений, антибактериальный эффект (обзор)

А. И. Перфильева<sup>1</sup>, Н. С. Забанова<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Сибирский институт физиологии и биохимии растений СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

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

**Аннотация.** Представлены основные сведения о механизмах воздействия медьсодержащих наночастиц на растительный организм. На примерах исследований в этой области продемонстрировано влияние таких наночастиц на процессы роста и развития растений, биохимические процессы, влияние на экспрессию генов в клетке, на сопротивляемость растений к биотическим и абиотическим стрессовым факторам. Показана перспективность применения наномеди в качестве минеральных удобрений. Описаны механизмы активности медьсодержащих наночастиц против бактериальных фитопатогенов культурных растений и ряда бактерий, патогенных для человека и животных. Обсуждаются многообещающие перспективы сельскохозяйственного использования наночастиц меди и подходы, позволяющие избежать возможных негативных эффектов их применения.

**Ключевые слова:** растения, медь, наночастицы, нанокompозиты, бактерии, стресс, фитопатогены, антиоксидантная система, перекисное окисление липидов.

**Благодарности.** 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. Агрохимические аспекты применения медьсодержащих наноструктур: влияние на рост и развитие растений, антибактериальный эффект (обзор) // Известия Иркутского государственного университета. Серия Биология. Экология. 2023. Т. 44. С. 3–26. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.44.3>

Review article

## Agrochemical Aspects of the Use of Copper-Containing Nanostructures: Influence on Plant Growth and Development, Antibacterial Effect: A Review

A. I. Perfileva<sup>1</sup>, N. S. Zabanova<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

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

**Abstract.** Copper is an essential trace element for plant organisms, but in high concentrations it can be toxic to plants. Copper nanoparticles (NPs) are less toxic, and their use in plant treatment appears to be safer, more effective, and more economical than copper salts. The mini-review provides basic information about the mechanisms of action of copper-containing NPs on the plant organism and provides examples of research in this area. The main directions of influence of copper-containing NPs on plants are the processes of growth and development of the plant organism (organogenesis, mitosis, biomass accumulation), biochemical processes (the intensity of photosynthesis, antioxidant status and the intensity of lipid peroxidation processes), the effect on gene expression in the cell, the effect on plant resistance abiotic and biotic stress factors. The promise of using copper NPs as mineral fertilizers has been shown by stimulating seed germination, plant growth and development, and increasing plant resistance to stress factors under the influence of copper NPs. The protective effect of copper-containing NPs is often explained by their antioxidant activity. At the same time, there are a number of studies demonstrating the negative impact of copper-containing NPs on the growth and development of plants and the intensity of photosynthesis. The second part of the article is devoted to a description of the mechanisms of antimicrobial activity of copper-containing NPs. The antibacterial effect of copper-containing NPs is associated with the attachment of copper NPs to the surface of the bacterial cell with subsequent disruption of the membrane potential, which further leads to the development of oxidative stress and damage to vital biomolecules. Copper-containing NPs have a pronounced antibacterial effect against bacterial phytopathogens of cultivated plants *Ralstonia solanacearum*, *Xanthomonas axonopodis*, *Erwinia amylovora*, as well as against a number of bacteria pathogenic to humans and animals. Thus, copper NPs are promising agents for agriculture, but their effect on plants requires careful selection of optimal concentrations and comprehensive studies to avoid toxic effects.

**Keywords:** plants, copper, nanoparticles, nanocomposites, bacteria, stress, phytopathogens, antioxidant system, lipid peroxidation.

---

**For citation:** Perfilieva A.I., Zabanova N.S. Agrochemical Aspects of the Use of Copper-Containing Nanostructures: Influence on Plant Growth and Development, Antibacterial Effect: A Review. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*, 2023, vol. 44, pp. 3-26. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2023.44.3> (in Russian)

---

## Введение

Несмотря на высокую распространённость меди в почвах, культурные растения могут испытывать недостаток или избыток этого микроэлемента. В регионах с засушливым и полузасушливым климатом высокая щелочность почв и низкий уровень органического углерода препятствуют биодоступности микроэлементов, подобных меди, негативно влияя на качество питательных веществ и продуктивность растений. Для решения этой проблемы могут рассматриваться удобрения на основе наносоединений меди. Наночастицы (НЧ) обладают более высокой реакционной способностью по сравнению с ионными формами микроэлементов. Более медленная и постоянная доступность растворимого элемента из НЧ по сравнению с ионной солью обуславливает их пониженную токсичность [Multilevel approach ... , 2023]. Таким образом, НЧ обладают всеми преимуществами вносимых к растениям обычных минеральных добавок, дополнительно отличаясь свойством снижения токсичности и невысокой концентрацией применения.

Для уменьшения рисков контаминации микроорганизмами растений, размножаемых *in vitro*, активно используются антибиотики. Однако наряду с бактерицидным действием, антибиотики могут оказывать токсическое действие на растительные ткани и ингибировать рост и развитие эксплантов [Pollock, Barfield, Shields, 1983; Internal bacterial contamination ... , 1998].

Кроме того, известно, что патогенные микроорганизмы могут адаптироваться к биоцидным препаратам путём мутаций, что приводит к устойчивости фитопатогенов [Hahn, 2014; Persistence in phytopathogenic ... , 2018]. Перспективной альтернативой может стать использование НЧ [Bactericidal properties ... , 2018; Zakharova, Gusev, 2019] и нанокмозитов (НК) [Hashim, Agool, Kadhim, 2018] в качестве агентов в борьбе с фитопатогенами. В 2023 г. было обнаружено, что растения способны поглощать НЧ всей поверхностью: корни поглощают их через главный корень, поры в клеточной стенке корня и повреждённые участки, а листья – через поры перидермы и устьица [Nanoparticles in plants ... , 2023].

Имеется много противоречивых данных, свидетельствующих как о положительном, так и об отрицательном влиянии НЧ на растительные клетки и растительные организмы [Биотестирование наноматериалов ... , 2010; Дыкман, Щёголев, 2017; Nanoparticles in the environment ... , 2018]. При этом несомненным остаётся то, что химическая природа, размер, форма, поверхностный заряд и вводимая доза являются одними из важнейших факторов, обуславливающих влияние НЧ на живой организм. Одним из главных аспектов применения наносоединений в области защиты растений является оценка воздействия НЧ на окружающую среду, биоту (микроорганизмы, растения, животные) и здоровье человека. В исследованиях культуры тканей накоплен большой материал о влиянии НЧ металлов на метаболические процессы растительной клетки на всех этапах культивирования растений.

Цель настоящей работы – обобщить сведения о механизмах влияния наносоединений меди на организм сосудистого растения и бактериальную клетку для понимания перспектив использования этих НЧ для стимуляции роста культурных растений и защиты от фитопатогенов.

### ***Роль меди для растений***

Микроэлементы, в том числе медь, играют важную роль в биохимических процессах любого растительного организма, а их недостаток или избыток могут вызывать серьёзные заболевания и низкую урожайность [Hopkins, Huner, 2008]. С каждым годом поиски более эффективных удобрений, безопасных для окружающей среды, особенно в условиях изменения климата, становятся всё более актуальными в свете проблем обеспечения здорового питания. Такие элементы, как медь, выделены в отдельную группу микроудобрений, необходимых растениям в очень малых количествах (менее 1 кг/га) для стимуляции роста [Каталымов, 1965]. Эти элементы играют важную роль в биохимических процессах. Так, у картофеля микроэлементы активируют ферменты, участвуют в синтезе витаминов, способствуют адсорбционному связыванию влаги, что, в свою очередь, оказывает положительное влияние на рост растения, повышает их засухоустойчивость и пр. Медь является составной частью ферментов углеводного и белкового обменов, кроме того ионы меди входят в состав ферментов, участвующих в фотосинтезе и дыхании [Mulder, 1949]. Также она является незаменимым микроэлементом, который фигурирует во многих жизненно важных физиологических функци-

ях растений, действуя как катализатор в окислительно-восстановительных реакциях в митохондриях, хлоропластах и цитоплазме клеток [Fargašová, 2004] или как переносчик электронов в процессе дыхания растений [Yruela, 2009]. Ионы меди нужны для нормального роста растений, процесса фотосинтеза, передачи гормональных сигналов, реакций окисления, метаболизма белков и углеводов, а также фиксации азота атмосферы, играют важную роль в электрон-транспортной цепи дыхания [Иванищев, 2020]. При дефиците меди снижается интенсивность синтеза органических веществ, уменьшается содержание хлорофилла, проявляются различные заболевания (характерный симптом голодания – точечный хлороз листьев). В то же время отрицательный эффект оказывает избыток металла, приводящий к его аккумуляции в организме растения, что сказывается как на развитии самого растения, так и на здоровье человека при его потреблении. Однако контроль процессов, протекающих внутри растения, осложняется отсутствием глубоких знаний механизмов транспорта этого элемента в растительном организме. Поэтому многие происходящие в растениях биохимические процессы на настоящий момент ещё недостаточно изучены и слабо описаны в литературе.

### ***Влияние медьсодержащих НЧ на рост и развитие растений***

Эффекты НЧ меди на рост и развитие растений могут быть различными. Зачастую они зависят от вида растений, а также свойств НЧ меди (концентрации, форма, размеры НЧ) [Considerable variation ... , 2015; Size-dependent biological effects ... , 2019; Feigl, 2023]. Так, например, у растений риса *Oryza sativa* НЧ CuO в концентрации до 50 мг/л стимулировали рост и развитие растений, а также повышали активность антиоксидантных ферментов (АОФ). НЧ CuO в концентрации более 100 мг/л приводили к развитию окислительного стресса у растений [Da Costa, Sharma, 2016]. Показано, что НЧ меди в комплексе с аспарагиновой кислотой в зависимости от их концентрации могут выступать в качестве как регуляторов роста растений кукурузы *Zea mays* (концентрация до 1 мкг/мл), так и ингибиторов (концентрация до 1–10 мкг/мл) [Aspartic acid-based ... , 2023].

Схематически основные результаты влияния медьсодержащих НЧ на растения представлены на рис. 1 и далее в настоящем разделе обсуждаются с использованием примеров.

Ряд исследователей использовали медьсодержащие НЧ в качестве источника меди в условиях гидропоники. Так, для успешного культивирования *Stevia rebaudiana in vitro* использовали среду Мурасиге – Скуга (МС), содержащую 10 мг/л НЧ оксида меди, синтезированных методом соосаждения [CuO nanoparticles significantly ... , 2017]. Установлено, что у растений, выросших на такой среде, отмечался более высокий уровень органогенеза, улучшенные ростовые характеристики регенерантов, а также синтез гликозидов (ребаудиозида А и стевииозида). В исследовании сделан вывод о том, что НЧ CuO действуют как стимуляторы производства биологически активных компонентов и могут использоваться в периодическом культивировании *in vitro* [CuO nanoparticles significantly ... , 2017]. Применение НЧ меди в

диапазоне от 0,2 до 1,0 мкг/мл в среде МС в эксперименте *in vitro* привело к значительному увеличению хозяйственно-ценных параметров пшеницы *Triticum aestivum* [Potential of copper ... , 2015], при этом повышение концентрации НЧ оказывало ингибирующее действие. Однако замена агарозной среды на почву вызвала увеличение роста и урожайности пшеницы при концентрациях от 10 до 30 мкг/мл [Potential of copper ... , 2015]. При микроклональном размножении растений *Mentha longifolia* добавление 0,5 мг/л НЧ меди в среду МС привело к увеличению высоты и индекса роста растений на 45–48,4 %, числа междоузлий на 29,4–33,9 %, числа побегов на 55,6–66,2 %, а коэффициент воспроизводства составил 30–40 % по сравнению с контролем [The influence of Cu ... , 2016].

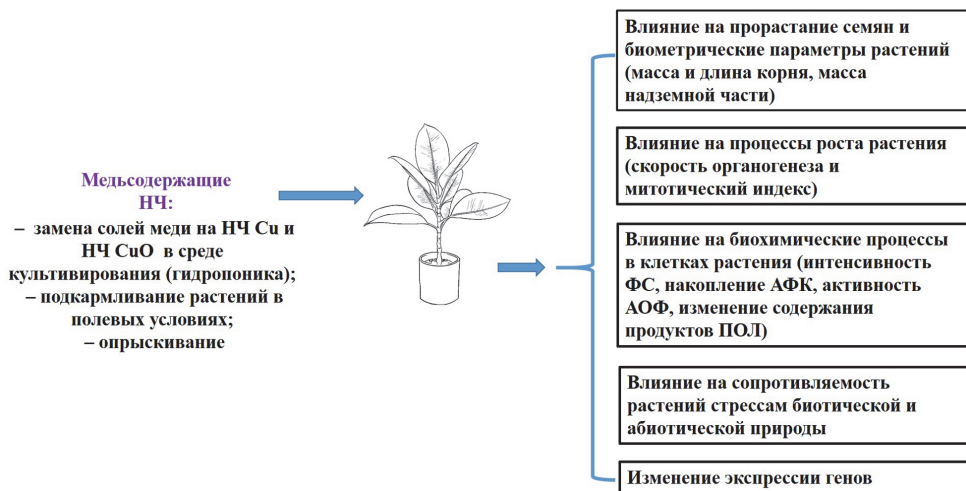


Рис. 1. Схема влияния медьсодержащих НЧ на растения. ФС – фотосинтез; АФК – активные формы кислорода; АОФ – антиоксидантные ферменты; ПОЛ – перекисное окисление липидов

В научных работах достаточно широко описано положительное влияние НЧ меди на культурные растения [Green-synthesized copper ... , 2019; Size-dependent biological ... , 2019; Plant-mediated copper nanoparticles ... , 2022]. Этот эффект, как правило, связан с увеличением интенсивности прорастания семян и повышением биометрических показателей растений по сравнению с контролем. Так, стимулирующее воздействие на скорость прорастания семян салата *Lactuca sativa* наблюдалось при внесении в почву НЧ меди в концентрациях 130 и 600 мг/кг [Shah, Belozeroва, 2009]. Нанопрайминг семян кукурузы НЧ меди в комплексе с аспарагиновой кислотой и опрыскивание листьев этими НЧ показали, что НЧ, в зависимости от их концентрации, способны действовать как регуляторы и как ингибиторы роста растений. Нанопрайминг НЧ в концентрации до 10 мкг/мл активизировал прорастание семян, повышал активность АОФ и содержание хлорофилла в тканях проростков семян риса [Aspartic acid-based ... , 2023]. В работе О. Захаровой с соавтора-

ми [The effects of CuO ... , 2019] также установлено положительное влияние НЧ оксида меди в концентрации 0,01 г/л на всхожесть и морфометрические показатели проростков пшеницы. Внесение НЧ меди к растениям авокадо *Persea americana* путём опрыскивания листьев, инъекций в стебель и корневое орошение приводило к увеличению прироста стебля на 25 % и увеличению листообразования на 85 % по сравнению с контролем [Effect of methods ... , 2023]. НЧ меди стимулировали увеличение всхожести, длины побегов и корней при культивировании искусственно состаренных семян гибрида кукурузы сорта Хема [Maithreyee, Gowda, 2015]. Опрыскивание листьев змеголовника молдавского *Dracocephalum moldavica* НЧ оксида меди на 23 % по сравнению с контролем увеличивало биомассу побегов [Foliar enrichment ... , 2023]. Использование НЧ меди оказывало положительное влияние на морфологические и физиологические параметры у базилика душистого *Ocimum basilicum* [Abbasifar, Shahrabadi, ValizadehkKaji, 2020]. Отмечено положительное влияние НЧ оксида меди на рост и развитие различных древесных культур [Effect of copper ... , 2021; The impact ... , 2021; Influence of copper ... , 2022].

Кроме того, существует информация о влиянии медьсодержащих НЧ на процессы роста растений. Так, С. Анвар с соавторами сообщали, что удобрение риса НЧ CuO в концентрации 10 мг/л увеличивало скорость органогенеза растений [The effect of ... , 2016]. НЧ меди в концентрациях до 20 мкг/мл повышали митотический индекс активно делящихся клеток *Allium cepa* с постепенным снижением митотического индекса по мере увеличения концентрации [Nagaonkar, Shende, Rai, 2015].

НЧ меди способны оказывать влияние на биохимические процессы, происходящие в растениях. К таковым относятся интенсивность фотосинтеза, функционирование антиоксидантной системы растений. Существует множество исследований в этой области. Например, показано, что внекорневое внесение НЧ меди улучшало качество плодов томатов *Solanum lycopersicum* и увеличивало синтез биологически активных соединений, а также антиоксидантных эффектов каталазы и супероксиддисмутазы [Foliar application ... , 2018]. На растениях кукурузы в условиях полевого эксперимента было показано, что опрыскивание НЧ меди в комплексе с аспарагиновой кислотой приводит к выраженному снижению содержания АФК в обработанных растениях благодаря увеличению активности антиоксидантных ферментов (пероксидаза, супероксиддисмутазы, аскорбатпероксидазы и т. д.) при стрессовом воздействии – токсичности свинца [Aspartic acid-based nanopopper ... , 2023]. На растениях фасоли *Phaseolus vulgaris* показано, что обработка НЧ меди снижала генерацию АФК за счёт повышения активности антиоксидантных ферментов (каталазы, аскорбатпероксидазы и др.), а также ингибирования активности ферментов, продуцирующих АФК, таких как глутатионпероксидаза и НАДФН-оксидаза. Кроме того, под влиянием НЧ меди в тканях фасоли на 50 % снижалось количество малонового диальдегида [Clue of zinc oxide ... , 2022]. Внесение в почву НЧ меди в дозах 25 и 50 мг/кг увеличивало интенсивность роста пшеницы, биомассу растений и содержа-

ние клеточных антиоксидантов, одновременно снижая количество АФК за счёт увеличения активности каталазы и пероксидазы в тканях по сравнению с контрольными растениями [Green copper nanoparticles ... , 2020]. Опрыскивание листьев растения *Dracocephalum moldavica* НЧ CuO на 77 % увеличивало содержание хлорофилла *a* и на 123 % повышало содержание хлорофилла *b* по сравнению с контролем [Foliar enrichment ... , 2023]. Показано, что опрыскивание листьев растений авокадо НЧ CuO стимулировало интенсивность фотосинтеза [Effect of methods ... , 2023].

Известны результаты влияния НЧ меди на сопротивляемость растений стрессам. Предпосевная обработка семян коллоидным раствором НЧ меди может оказать значительное фунгицидное действие при биотическом стрессе. Так, на примере обработки семян озимой пшеницы, инфицированных фитопатогенным грибом *Pseudocercospora herpotrichoides*, было показано, что коллоидные растворы НЧ меди оказывают антиоксидантное действие за счёт ингибирования синтеза продуктов ПОЛ. В предварительно обработанных раствором НЧ проростках пшеницы на ранних стадиях онтогенеза наблюдалось увеличение уровня активности лектинов в 14,6 раза и снижение на 14,1–28,7 % содержания реактивных веществ тиобарбитуровой кислоты (ТБК) – основных маркеров ПОЛ по сравнению с контролем. При этом экспериментальные растения имели большую длину надземной части. Такая реакция указывает на формирование защитных реакций пшеницы при патогенезе путём изменения активности защитных белков-лектинов и подтверждает возможность использования НЧ как экзогенных индукторов эндогенной защиты растений [The effect of pre-sowing seed ... , 2016; The effect of silver ... , 2017]. Показано, что НЧ оксида меди в концентрациях 0,001–0,1 г/л ингибировали развитие мицелия фитопатогенного гриба *Alternaria solani*, снижали прорастание его спор на 34–50 % [The effects of CuO nanoparticles ... , 2019]. Биосинтезированные НЧ меди размером от 5 до 295 нм проявили высокую противомикробную активность, подавляя рост фитопатогенных бактерий и грибов, а также увеличили всхожесть и рост растений [Kasana, Panwar, Kaul, 2017]. НЧ меди значительно уменьшали симптомы фузариозного увядания (более чем на 60 %) у томатов. Кроме того, обработка НЧ меди увеличила рост растений томата и значительно повысила содержание хлорофилла (с 19,3 до 28,6 %). Авторы связывают такой эффект с тем, что НЧ меди более эффективно доставляют медь в качестве микроэлемента для растений по сравнению с обычными минеральными солями благодаря малым размерам НЧ [The bifunctional role ... , 2021].

Экспрессия генов в растительной клетке также может меняться при воздействии медьсодержащих НЧ. Так, показано на берёзе пушистой *Betula pubescens*, что инфицирование растений патогенным грибом *Alternaria alternata* значительно повышало уровень транскриптов транскрипционного фактора *MYB46*, защитных белков *LEA8*, фенилаланин-аммиак лиазы *PAL*, патоген-зависимых белков *PR-1* и *PR-10* в микроклонах берёзы. При внесении в среду культивирования НЧ и одновременном воздействии фитопатогена экспрессия генов *MYB46*, *PR-1* и *PR-10* снижалась в 5,4 раза. Полученный

эффект связывают со снижением патогенной нагрузки, вызванной воздействием НЧ и одновременной стимуляцией клонов *in vitro* [Influence of copper ... , 2022]. В тканях проростков сои *Glycine max*, подвергнутых обработке НЧ оксида меди, обнаружено снижение активности экспрессии ряда генов, участвующих в процессе деления клеток [Effect of different ... , 2021]. Показано, что применение хитозан-поливинилового спирта гидрогеля (Сс-ПВС) в комплексе с НЧ меди способствует повышению экспрессии генов, кодирующих синтез жасмоновой кислоты и супероксиддисмутазы в тканях растений томатов в условиях солевого стресса, смягчая его последствия [Chitosan-PVA and copper ... , 2018]. Снижение экспрессии генов патоген-связанного белка 1 (*PR1*) и предшественника полифенолоксидазы (*PoP*) отмечалось в тканях перца *Capsicum annuum* и томата при обработке растений, заражённых патогеном *Xanthomonas euvesicatoria*, наноккомпозитом, состоящим из НЧ меди и НЧ серебра, нанесённых на восстановленный оксид графена [Reduced graphene ... , 2022].

При этом существуют сведения о негативном влиянии медьсодержащих НЧ на растения. В растениях пшеницы НЧ оксида меди уменьшали рост побегов, снижали урожайность зерна и стрессоустойчивость за счёт деградации крахмала. Растения репы *Brassica rapa*, обработанные НЧ Cu/CuO, характеризовались уменьшением содержания хлорофилла, каротиноидов, тогда как содержание пролина и антоцианов было повышено [Siddiqi, Husen, 2020]. НЧ оксида меди ингибировали рост, развитие, содержание питательных веществ, а также концентрацию индол-3-уксусной кислоты (ИУК) и абсцизовой кислоты (АБК) в растениях трансгенного и обычного хлопка *Gossypium hirsutum* [Effects of CuO ... , 2016]. Было показано, что НЧ CuO по-разному проникают в исследуемые растения. Так, у нетрансгенных растений НЧ агрегировали на эпидермисе, тогда как у растений трансгенного хлопка НЧ проникали внутрь клеток путём эндоцитоза. Большинство агрегатов НЧ оксида меди обнаружено на наружном эпидермисе корня, а остальные расположены в межклеточных пространствах как обычного, так и Vt-трансгенного хлопчатника [Effects of CuO ... , 2016]. В обзоре Р. Бхаттаржи с соавторами представлено множественное проявление токсичности медьсодержащих НЧ: на различных культурах (соя, горчица *Brassica juncea*, люцерна *Medicago sativa*, салат *Lactuca sativa*) отмечали укорочение корня (растения в большей степени формировали боковые корни, а не главный корень) и снижение интенсивности поглощения минеральных веществ из почвы, уменьшение биомассы побегов и снижение количества фотосинтетических пигментов [The emergence of ... , 2022]. Негативные эффекты медьсодержащих НЧ на растительный организм связывают с повышенной продукцией АФК, под влиянием которых происходит повышение продуктов ПОЛ, разрушение клеточной мембраны, повреждение ДНК и белков клетки. Вероятно, негативный эффект НЧ связан с их свойствами. Так, в большинстве представленных исследований, где выявлен негативный эффект, оказанным медьсодержащими НЧ, использовали НЧ размером более 10 нм. В некоторых таких исследованиях применяли высокие дозы нановещества [Investigation the activities ... , 2022; The emergence of metal oxide ... , 2022].



Приведённые данные показывают перспективность медьсодержащих НЧ в оптимальной форме и концентрациях для использования в качестве стимулятора роста и фитопротектора сельскохозяйственных растений.

### ***Механизмы антибактериального эффекта медьсодержащих НЧ***

Медь является токсичным, но при этом жизненно необходимым элементом для бактерий [Solioz, Odermatt, Krapf, 1994]. Она принимает активное участие в метаболической активности бактерий. Например, азурин представляет собой небольшой цианомедный белок внешней мембраны бактерий, обнаруженный у *Pseudomonas*, *Bordetella* и *Alcaligenes*. Азурин регулирует перенос одного электрона между ферментами, связанными с цепью цитохрома посредством окисления-восстановления Cu(I) и Cu(II) [Sereena, Sebastian, 2020]. Пластоцианин представляет собой медьсодержащий белок с молекулярной массой 10 кДа, который расположен в просвете тилакоида, где он функционирует как подвижный переносчик электронов, перемещающий электроны от цитохрома к P700 в фотосистеме I [Gross, 1993]. Несмотря на эти полезные эффекты, дисбаланс в уровнях меди может быть токсичным для бактериальных клеток [Pontel, Chesa, Soncini, 2015]. Во-первых, Cu(I)/(II) обладает высокой способностью реагировать с доступными лигандами. В клетке ионы меди взаимодействуют с лигандами серы, кислорода и имидазола, вытесняя другие катионы из клетки в активный центр фермента. Во-вторых, окислительно-восстановительный потенциал пары Cu(I)/Cu(II) близок к окислительно-восстановительному потенциалу бактериального в цитоплазме, что делает медь чрезвычайно опасным катионом [Pontel, Chesa, Soncini, 2015].

Существует ряд обзорных статей, посвящённых именно антибактериальному эффекту медьсодержащих НЧ по отношению к патогенным для человека и животных бактериям и вирусам [Copper-modified polymeric membranes ... , 2021; Ermini, Voliani, 2021; Copper-based nanoparticles ... , 2023]. Исследования *in vitro* демонстрируют, что в определённом диапазоне концентраций НЧ меди могут снижать жизнеспособность клеток в зависимости от химического состава, формы и размера наноматериала. На рис. 2 представлена схема антибактериального эффекта медьсодержащих НЧ. Ниже описан каждый из этапов антибактериального эффекта.

Первым механизмом токсичности медьсодержащих НЧ является воздействие на клеточную стенку и плазмалемму бактерий. Медьсодержащие НЧ могут взаимодействовать с отрицательно заряженными мембранами бактериальных клеток посредством процесса электростатического притяжения. Действие различных медьсодержащих НЧ по отношению к клеточной стенке и мембране бактерий отличается в зависимости от вида НЧ. Так, НЧ меди взаимодействуют с мембраной бактерий, ставя под угрозу её целостность. Вместо этого НЧ оксида меди имеют тенденцию проникать через мембрану бактерий и высвобождать ионы внутрь клетки. НЧ меди проявляют более сильную антибактериальную активность, чем НЧ оксида меди [Copper-based nanoparticles ... , 2023].

Медьсодержащие НЧ способны привести к увеличению проницаемости клеточной мембраны бактериальной клетки, что в конечном итоге вызывает разрыв мембраны и позволяет высвободить внутренние компоненты [Copper-based nanostructures ... , 2022]. Так, НЧ нанохлопьев меди и сернистого вольфрама  $\text{Cu}_2\text{WS}_4$ , полученные с использованием L-цистеина в качестве источника серы, обладали способностью проникать в клеточную стенку через поры, после чего происходил электростатический контакт, разрыв плазматической мембраны и в конечном итоге гибель бактерии [Antibacterial studies ... , 2018]. Нанокластеры меди  $\text{CuCs}$  приводили к разрушению клеточной стенки бактерий с последующим выходом ионов  $\text{K}^+$  из клетки, что вызывало повреждение нуклеиновых кислот и, соответственно, гибель бактерий [Copper-based nanoparticles ... , 2023].



Рис. 2. Схема антибактериального механизма медьсодержащих НЧ

Помимо физического взаимодействия с клеточной стенкой бактерий, медьсодержащие НЧ также могут убивать бактерии, производя токсичные компоненты, такие как  $\text{Cu}^{2+}$  и АФК, которые стимулируют ПОЛ мембран бактериальных клеток и вызывают повреждение внутриклеточных белков или генов [Metal nanoparticles ... , 2017]. Ион меди достаточно мал, чтобы разрушить бактериальные клетки, поэтому он нарушает ферментативные функции внутри клетки [Characterisation of copper ... , 2009]. Например, показано, как  $\text{Cu}^{2+}$ , высвобождаемый из полых углеродных сфер, прикрепленных к  $\text{CuO}$  ( $\text{CuO}$ -HCS), приводил к повреждению бактериальной мембраны, ПОЛ и деградации ДНК [Copper/carbon hybrid nanozyme ... , 2019].

Вторым потенциальным механизмом, с помощью которого медьсодержащие НЧ проявляют свою антибактериальную активность, является окис-

лительный стресс, вызванный АФК [Ermini, Voliani, 2021]. Ионы меди и НЧ меди можно рассматривать как окислительно-восстановительные мессенджеры. Действительно, они могут подвергать клетку окислительному стрессу за счёт образования АФК, которые повреждают клеточные компоненты, такие как белки, липиды и нуклеиновые кислоты. АФК в норме участвуют в клеточной передаче сигналов, и клетки способны регулировать их концентрацию благодаря ферментам, таким как каталаза или супероксиддисмутазы. При повышении концентрации АФК на присутствие внешних факторов, таких как НЧ меди, клетка подвергается окислительному стрессу, который может привести к её гибели [Ermini, Voliani, 2021].

НЧ меди и ионы меди могут катализировать химию Фентона *in vitro*, образуя реакционноспособные гидроксильные радикалы, которые участвуют в нескольких процессах, окисляя белки, липиды. Ионы меди могут приводить к истощению сульфгидрилов, например, в цистеинах или глутатионе. Генерация АФК медьсодержащими НЧ способствовала окислению глутатиона, тем самым подавляя механизмы антиоксидантной защиты бактерий [A novel study ... , 2012]. Такие события усиливают окислительный стресс в клетке микроорганизма, что приводит к повреждению белков. Таким образом, местное производство перекиси водорода (и отсутствие ионов) вызывает повреждение мембраны [Ermini, Voliani, 2021]. Повышение АФК под влиянием медьсодержащих НЧ приводит к цитотоксичности и вызывает повреждение биомолекул, таких как ДНК, белки и липиды [Bezza, Tichapondwa, Chigwa, 2020]. НЧ иодида меди CuI вызывают повреждения ДНК и мембран у грамотрицательных и грамположительных бактерий посредством продукции АФК [A novel study ... , 2012].

Третьим механизмом влияния медьсодержащих НЧ на бактериальную клетку является включение НЧ в метаболизм клетки, приводящее к его нарушению. Ю. Су с соавторами обнаружили, что НЧ оксида меди ингибируют активность переносчиков глюкозы, что приводит к снижению доступной глюкозы, метаболизируемой в бактериальных клетках, что, в свою очередь, влияет на процесс денитрификации бактерий [Alteration of intracellular ... , 2015]. Кроме того, медьсодержащие НЧ могут также убивать бактерии, взаимодействуя непосредственно с бактериальной ДНК и вызывая деградацию плазмидной ДНК и общую деградацию ДНК [Hydrothermal synthesis ... , 2014].

Есть много механизмов, которые могут возникнуть в результате прямого взаимодействия между НЧ оксида меди и биополимерами бактерии. Предлагается интерпретировать некоторые такие механизмы как антибактериальное поведение оксидов металлов. М. Пена с соавторами и Ю. Ким с соавторами предложили разные формы действия НЧ оксида меди. Одна из возможностей заключается в том, что высвободившиеся ионы меди в процессе окисления могут встраиваться в нити нуклеиновой кислоты, когда они взаимодействуют с молекулами ДНК. Таким образом, ионы меди вызывают беспорядок спиральной структуры молекул ДНК, соединяя их и вызывая их перекрестное связывание внутри и между цепями нуклеиновых кислот. Ионы меди также нарушают биохимические процессы, происходящие в бакте-

риальной клетке [Peña, Lee, Thiele ... , 1999; Comparative antibacterial and ... , 2020]. Другим механизмом является разрушительное действие гидроксильных радикалов, которые образуются оксидами меди и могут окислять белки. Таким образом, расщепляются молекулы ДНК и РНК, липиды окисляются, повреждая их мембраны. Свободные кислородные радикалы являются мощными окислителями, которые могут разрушать клеточную стенку бактерий посредством ряда окислительно-восстановительных реакций. Свободные радикалы образуются из возбуждённых электронов на поверхности НЧ  $\text{Cu}_2\text{O}$ . Бактерицидный эффект НЧ меди может быть связан с генерацией свободных радикалов [Effect of the concentration ... , 2021].

Таким образом, можно заключить, что медьсодержащие НЧ обладают выраженной антибактериальной активностью. Такую активность объясняют трёхэтапным действием: высвобождением ионов меди ( $\text{Cu}^{2+}$ ), прямым контактом НЧ оксида меди с бактериями и производством АФК [Antibacterial cotton fabric ... , 2020].

### **Влияние медьсодержащих НЧ на патогенные (в том числе фитопатогенные) бактерии**

На фитопатогенных бактериях показан антибактериальный эффект медьсодержащих НЧ, которые оказывали антибактериальный эффект в отношении фитопатогена *Ralstonia solanacearum*, вызывающего болезнь увядания, и не влияли на фитопатоген *Xanthomonas axonopodis*, вызывающий рак цитрусовых [Antibacterial effect ... , 2021]. Причём бактериостатический эффект зависел от концентрации НЧ. Так, при концентрациях НЧ 10 и 25 мкг/мл плотность бактериальных клеток оставалась такой же, как и в контроле. При повышении концентрации (50, 100 и 200 мкг/мл) НЧ меди биомасса бактерий снижалась соответственно на 61, 64 и 77 % по сравнению с контролем. Авторы считают, что при низкой концентрации НЧ меди могли действовать как источник меди для роста бактериальных клеток, входя в состав дыхательных ферментов клеток (цитохром-с-оксидазы и НАДН-дегидрогеназы). Клетки бактерий спустя 48 ч инкубации с НЧ оценивали с помощью сканирующей электронной микроскопии. НЧ были прикреплены к поверхности клеток обоих видов бактерий. У клеток *R. solanacearum* отмечалось искажение клеточной стенки по сравнению с контролем, но такого искажения не наблюдалось у *X. axonopodis*. Исследования поперечных срезов клеток *R. solanacearum* показали, что НЧ не оседали внутри клетки, но скапливались на поверхности клеточных мембран [Antibacterial effect ... , 2021]. НЧ оксида меди, синтезируемые «зелёным способом» с помощью гриба *Penicillium chrysogenum*, проявили максимальную фунгицидную активность против *Fusarium oxysporum*, *Alternaria solani* и *Aspergillus niger* и антибактериальную активность против *Ralstonia solanacearum* и *Erwinia amylovora* [Penicillium chrysogenum-mediated ... , 2020].

Существуют исследования, согласно которым растения способны содержать в своих тканях патогенные для человека и животных бактерии [Sobiczewski, Iakimova, 2022]. Имеется информация о влиянии медьсодер-

жащих нановеществ на такие бактерии. С помощью сканирующей электронной микроскопии было показано, что НЧ меди после инкубации с бактериями в течение 16 ч приводили к повреждению клеток. Так, бактериальные клетки *S. aureus* и *E. coli* были полностью или частично уничтожены. Клетки *S. aureus* были фрагментированы на обломки без каких-либо неповреждённых сферических клеточных структур, в то время как для *E. coli* часть клеточной структуры сохранилась, но поверхность клетки имела складки, впадины, деформации и расщепления [Effect of NaOH ... , 2020]. Антибактериальная активность НЧ в отношении *S. aureus* была выше, чем у *E. coli*, что может быть вызвано различным строением двух видов бактерий. Клеточная стенка кишечной палочки в основном состоит из пептидогликана и наружных слоёв липополисахаридов, липопротеинов и фосфолипидов, которые менее склонны к атаке НЧ меди или ионами Cu (II) по сравнению с грамположительными бактериями [Там же]. Показано, что биогенные НЧ оксида меди обладают более сильным антибактериальным действием в отношении грамположительных бактерий по сравнению с грамотрицательными бактериями [Synthesis of biologically ... , 2020]. Инкубация бактерий *Pseudomonas aeruginosa* с НЧ на основе палладия и меди Pd<sub>1,9</sub>Cu вызывала фрагментацию геномной ДНК у бактерии, а также отток внутриклеточной ДНК и белков из клетки. НЧ Pd<sub>1,9</sub>Cu стимулировали внутриклеточную генерацию АФК [Bimetallic palladium and ... , 2021]. Под влиянием НЧ меди показано повышение продукции АФК в клетках *E. coli* [Silver and copper ... , 2022] и снижение биоплёнкообразования *E. faecalis* и *S. mutans* [Antibacterial activity ... , 2021]. НЧ оксида меди продемонстрировали хорошую ингибирующую активность в отношении образования биоплёнки *S. aureus* [Synthesis of biologically ... , 2020]. Также выявлено снижение биоплёнкообразования *P. aeruginosa* и *S. aureus* под влиянием агентов, содержащих НЧ меди [Multifunctional copper-containing ... , 2020]. Гибридный композит из НЧ металлической меди и нового катионного π-сопряжённого полиэлектролита показал антибактериальные свойства в отношении грамположительных *Staphylococcus aureus* и *Enterococcus faecalis* и грамотрицательных бактерий *Escherichia coli* и *Salmonella enteritidis* [New hybrid copper ... , 2021].

Таким образом, медьсодержащие НЧ способны угнетать патогенные бактерии, приводя к окислительному стрессу, разрушению клетки, снижению биоплёнкообразования.

### **Заключение**

Вышеописанные результаты позволяют заключить, что использование НЧ меди в агрохимии имеет неоднозначный эффект. С одной стороны, показано положительное воздействие медьсодержащих НЧ в качестве удобрений и пестицидов, которые успешно поглощаются и перемещаются по растению, влияют на его рост и развитие. Эффекты от НЧ широко варьируются, в первую очередь в зависимости от их концентрации и химического состава нановеществ. НЧ в качестве минеральных удобрений предпочтительнее, чем

соли, поскольку они медленно высвобождают ионы металлов, обеспечивая более длительный эффект по сравнению с одномоментным увеличением концентрации при использовании минеральных солей. Выраженная биологическая активность НЧ меди связана с их антиоксидантной способностью, которая формируется за счёт множественных степеней окисления молекул меди. В публикациях имеется множество сообщений о влиянии НЧ меди на жизнеспособность растений и их устойчивость к стрессовым факторам. В целом результаты сводятся к увеличению всхожести, продуктивности растений, увеличению содержания пигментов, влиянию на антиоксидантную систему клетки (содержание АФК и активность антиоксидантных ферментов). Повышение устойчивости растений под действием НЧ меди связано с индукцией системной приобретённой устойчивости.

С другой стороны, имеется информация о том, что НЧ меди благодаря своей высокой биологической активности могут подавлять рост растений при более низких концентрациях, чем их ионные формы. НЧ способны обладать большой токсичностью, интенсивнее проникают в растение и даже в самую клеточную стенку, хотя точный механизм поглощения остаётся не полностью понятным. НЧ меди способны вызывать окислительный стресс и повреждение биологически важных молекул клетки.

Высокая ценность НЧ меди заключается в их выраженном антибактериальном действии, которое связано с эффективным проникновением в бактериальные клетки за счёт малого размера НЧ, воздействием на различные компартменты клетки и ухудшением целостности мембран вследствие окислительного стресса. В то же время исследований в области антибактериального действия НЧ меди по отношению к фитопатогенным бактериям недостаточно, в основном они посвящены изучению эффектов НЧ на возбудителей заболеваний человека и животных.

НЧ меди, бесспорно, являются перспективными агентами для сельского хозяйства, которые можно получить методом «зелёной химии» с использованием растительных экстрактов и применить для улучшения физиолого-биохимических показателей культурных растений, повышения их урожайности и устойчивости к стрессам. Однако, несмотря на обилие положительных результатов, имеются данные об их отрицательном влиянии как на животные, так и на растительные клетки. Это связано с образованием АФК, окислительным стрессом и его негативными последствиями. Поэтому перед широким использованием НЧ меди необходимо тщательно протестировать на предмет возможных токсических эффектов.

### Список литературы

Биотестирование наноматериалов: о возможности транслокации наночастиц в пищевые сети / Ю. Н. Моргалёв, Н. С. Хоч, Т. Г. Моргалёва, Е. С. Гулик, Г. А. Борило, У. А. Булатова, С. Ю. Моргалёв, Е. В. Понявина // Российские нанотехнологии. 2010. Т. 11–12. С. 131–135.

Дыкман Л. А., Щёголев С. Ю. Взаимодействие растений с наночастицами благородных металлов (обзор) // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52. С. 13–24.

Иванищев В. В. Биоаккумуляция, гомеостаз и токсичность меди в растениях // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2020. № 1. С. 33–41.

Каталымов М. В. Микроэлементы и микроудобрения. М.: Химия, 1965. 332 с.

A novel study of antibacterial activity of copper iodide nanoparticle mediated by DNA and membrane damage / A. Pramanik, D. Laha, D. Bhattacharya, P. Pramanik, P. Karmakar // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2012. Vol. 96. P. 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.03.021>

Abbasifar A., Shahrabadi F., ValizadehkKaji B. Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant // *J. Plant Nutr.* 2020. Vol. 43. P. 1104–1118. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1724305>

Alteration of intracellular protein expressions as a key mechanism of the deterioration of bacterial denitrification caused by copper oxide nanoparticles / Y. Su, X. Zheng, Y. Chen, M. Li, K. Liu // *Sci. Rep.* 2015. Vol. 5. Art. 15824. <https://doi.org/10.1038/srep15824>

Antibacterial activity of copper nanoparticles (CuNPs) against a resistant calcium hydroxide multispecies endodontic biofilm / B. Rojas, N. Soto, M. Villalba, H. Bello-Toledo, M. Meléndrez-Castro, G. Sánchez-Sanhueza // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11, N 9. Art. 2254. <https://doi.org/10.3390/nano11092254>

Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles / L. E. Román, E. D. Gomez, J. L. Solís, M. M. Gómez // *Molecules*. 2020. Vol. 25, N 24. Art. 5802. <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>

Antibacterial effect of copper sulfide nanoparticles on infected wound healing / Y. Liang, J. Zhang, H. Quan, P. Zhang, K. Xu, J. He, Y. Fang, J. Wang, P. Chen // *Surg. Infect. (Larchmt)*. 2021. Vol. 22, N 9. P. 894–902. <https://doi.org/10.1089/sur.2020.411>

Antibacterial studies of novel Cu<sub>2</sub>WS<sub>4</sub> ternary chalcogenide synthesized by hydrothermal process / S. Kannan, P. Vinitha, K. Mohanraj, G. Sivakumar // *J. Solid State Chem.* 2018. Vol. 258. P. 376–382. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.11.005>

Aspartic acid-based nano-copper induces resilience in *Zea mays* to applied lead stress via conserving photosynthetic pigments and triggering the antioxidant Biosystem / R. Ullah, Z. Ullah, J. Iqbal, W. Chalgham, A. Ahmad // *Sustainability*. 2023. Vol. 15. Art. 12186. <https://doi.org/10.3390/su151612186>

Bactericidal properties of plants-derived metal and metal oxide nanoparticles (NPs) / S.-Y. Teow, M. M.-T. Wong, H.-Y. Yap, S.-C. Peh, K. Shameli // *Molecules*. 2018. Vol. 23. Art. 1366. <https://doi.org/10.3390/molecules23061366>

Bezza F. A., Tichapondwa S. M., Chirwa E. M. N. Fabrication of monodispersed copper oxide nanoparticles with potential application as antimicrobial agents // *Sci. Rep.* 2020. Vol. 10, N 1. Art. 16680. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73497-z>

Bimetallic palladium and copper nanoparticles: Lethal effect on the gram-negative bacterium *Pseudomonas aeruginosa* / X. Huang, T. Li, X. Zhang, J. Deng, X. Yin // *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.* 2021. Vol. 129. Art. 112392. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112392>

Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications / G. Ren, D. Hu, E. W. C. Cheng, M. A. Vargas-Reus, P. Reip, R. P. Allaker // *Int. J. Antimicrob. Agents*. 2009. Vol. 33, N 6. P. 587–590. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004>

Chitosan-PVA and copper nanoparticles improve growth and overexpress the SOD and JA genes in tomato plants under salt stress / H. Hernández-Hernández, A. Juárez-Maldonado, A. Benavides-Mendoza, H. Ortega-Ortiz, G. Cadenas-Pliego, D. Sánchez-Aspeytia, S. González-Morales // *Agronomy*. 2018. Vol. 8. Art. 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090175>

Clue of zinc oxide and copper oxide nanoparticles in the remediation of cadmium toxicity in *Phaseolus vulgaris* L. via the modulation of antioxidant and redox systems / S. Hidouri, I. Karmous, O. Kadri, O. Kharbech, A. Chaoui // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2022. Vol. 56. P. 85271–85285. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21799-2>

Comparative antibacterial and antifungal activities of sulfur nanoparticles capped with chitosan / Y. H. Kim, G. H. Kim, K. S. Yoon, S. Shiv, J.-W. Rhim // *Microb. Pathogen.* 2020. Vol. 144. Art. 104178. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104178>

Considerable variation of antibacterial activity of cu nanoparticles suspensions depending on the storage time, dispersive medium, and particle sizes / O. V. Zakharova, A. Yu. Godymchuk, A. A. Gusev, S. I. Gulchenko, I. A. Vasyukova, D. V. Kuznetsov // *BioMed Res. Int.* 2015. Vol. 2015. Art. 412530. <https://doi.org/10.1155/2015/412530>

Copper/carbon hybrid nanozyme: Tuning catalytic activity by copper state for antibacterial therapy / J. Xi, G. Wei, L. An, Z. Xu, Z. Xu, L. Fan, L. Gao // *Nano Letters*. 2019. Vol. 19, N 11. P. 7645–7654. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b02242>

Copper-based nanoparticles against microbial infections / X. Li, Y. Cong, M. Ovais, M. B. Cardoso, S. Hameed, R. Chen, M. Chen, L. Wang // *Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol.* 2023. Vol. 15, N 4. Art. e1888. <https://doi.org/10.1002/wnan.1888>

Copper-based nanostructures: Antimicrobial properties against agri-food pathogens. Chapter 19. / J. M. Rajwade, R. C. Chikte, N. Singh, K. M. Paknikar // *Copper nanostructures: Next-generation of agrochemicals for sustainable agroecosystems*. Elsevier, 2022. P. 477–503. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00031-3>

Copper-modified polymeric membranes for water treatment: A comprehensive review / A. García, B. Rodríguez, H. Giraldo, Y. Quintero, R. Quezada, N. Hassan, H. Estay // *Membranes (Basel)*. 2021. Vol. 11, N 2. Art. 93. <https://doi.org/10.3390/membranes11020093>

CuO nanoparticles significantly influence *in vitro* culture, steviol glycosides, and antioxidant activities of *Stevia rebaudiana* Bertoni / R. Javed, A. Mohamed, B. Yucesan, G. Ekrem, R. Kausar, M. Zia // *Plant Cell Tiss. Org.* 2017. Vol. 131. P. 611–620. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1312-6>

Da Costa M. V. J., Sharma P. K. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa* // *Photosynthetica*. 2016. Vol. 54, N 1. P. 110–119. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>

Effect of copper oxide and silver nanoparticles on the development of tolerance to *Alternaria alternata* in poplar *in vitro* clones / T. A. Grodetskaya, O. A. Fedorova, P. M. Evlakov, O. Yu. Baranov, O. V. Zakharova, A. A. Gusev // *Nanobiotechnol. Rep.* 2021. Vol. 16, N 2. P. 231–238. <https://doi.org/10.1134/S2635167621020063>

Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton / N. L. Van, C. Ma, J. Shang, Y. Rui, S. Liu, B. Xing // *Chemosphere*. 2016. Vol. 144. P. 661–670. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.028>

Effect of different copper oxide particles on cell division and related genes of soybean roots / C. Liu, Y. Yu, H. Liu, H. Xin // *Plant Physiol. Biochem.* 2021. Vol. 163. P. 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.051>

Effect of methods application of copper nanoparticles in the growth of avocado plants / J. López-Luna, Y. Nopal-Hormiga, L. López-Sánchez, A. I. Mtz-Enriquez, N. Pariona // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 880. Art. 163341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163341>

Effect of NaOH concentration on antibacterial activities of Cu nanoparticles and the antibacterial mechanism / P. Lv, L. Zhu, Y. Yu, W. Wang, G. Liu, H. Lu // *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.* 2020. Vol. 110. Art. 110669. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110669>

Effect of the concentration and the type of dispersant on the synthesis of copper oxide nanoparticles and their potential antimicrobial applications / M. Guzman, M. Arcos, J. Dille, C. Rousse, S. Godet, L. Malet // *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, N 29. P. 18576–18590. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00818>

Ermini M. L., Voliani V. Antimicrobial nano-agents: The copper age // *ACS Nano*. 2021. Vol. 15, N 4. P. 6008–6029. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10756>

Fargašová A. Toxicity comparison of some possible toxic metals (Cd, Cu, Pb, Se, Zn) on young seedlings of *Sinapis alba* L. // *Plant, Soil and Environment*. 2004. Vol. 50, N 1. P. 33–38.

Feigl G. The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: A comprehensive review // *J. Plant Interact.* 2023. Vol. 18, N 1. Art. 2243098. <https://doi.org/10.1080/17429145.2023.2243098>

Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes / E. R. López-Vargas, H. Ortega-Ortíz, G. Cadenas-Pliengo, K. de Alba Romenus, M. C. de la Fuente, A. Benavides-Mendoza, A. Juárez-Maldonado // *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8. Art. 1020. <https://doi.org/10.3390/app8071020>

Foliar enrichment of copper oxide nanoparticles promotes biomass, photosynthetic pigments, and commercially valuable secondary metabolites and essential oils in dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) under semi-arid conditions / M. Nekoukhrou, S. Fallah, L. R. Pokhrel, A. Abbasi-Surki, A. Rostamnejadi // *Sci. Total Environ.* 2023. Vol. 863. Art. 160920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160920>



Green-synthesized copper nanoparticles as a potential antifungal against plant pathogens / N. Pariona, A. I. Mtz-Enriquez, D. Sánchez-Rangel, G. Carrión, F. Paraguay-Delgadoe, G. Rosas-Saito // RSC Adv. 2019. Vol. 9, N 33. P. 18835–18843. <https://doi.org/10.1039/c9ra03110c>

Green copper nanoparticles from a native *Klebsiella pneumoniae* strain alleviated oxidative stress impairment of wheat plants by reducing the chromium bioavailability and increasing the growth / M. Noman, M. Shahid, T. Ahmed, M. Tahir, T. Naqqash, S. Muhammad, F. Song, H. M. A. Abid, Z. Aslam // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2020. Vol. 192. Art. 110303. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110303>

Gross E. L. Plastocyanin: Structure and function // Photosynth. Res. 1993. Vol. 37. P. 103–116. <https://doi.org/10.1007/BF02187469>

Hahn M. The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi: Botrytis as a case study // J. Chem. Biol. 2014. Vol. 7. P. 133–141. <https://doi.org/10.1007/s12154-014-0113-1>

Hashim A., Agoal I. R., Kadhim K. J. Modern developments in polymer nanocomposites for antibacterial and antimicrobial applications: A review // J. Bionosci. 2018. Vol. 12, N 5. P. 608–613. <https://doi.org/10.1166/jbns.2018.1580>

Hopkins W. G., Huner N. P. A. Introduction to plant physiology. New York : J. Wiley & Sons, 2008. 528 p.

Hydrothermal synthesis of copper based nanoparticles: Antimicrobial screening and interaction with DNA / K. Giannousi, K. Lafazanis, J. Arvanitidis, A. Pantazaki, C. Dendrinou-Samara // J. Inorgan. Biochem. 2014. Vol. 133. P. 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2013.12.009>

Influence of copper oxide nanoparticles on gene expression of birch clones in vitro under stress caused by phytopathogens / T. A. Grodetskaya, P. M. Evlakov, O. A. Fedorova, V. I. Mikhin, O. V. Zakharova, E. A. Kolesnikov, N. A. Evtushenko, A. A. Gusev // Nanomaterials (Basel). 2022. Vol. 12, N 5. Art. 864. <https://doi.org/10.3390/nano12050864>

Internal bacterial contamination of micropropagated hazelnut: identification and antibiotic treatment / B. M. Reed, J. Mentzer, P. Tanprasert, X. Yu // Plant Cell, Tissue and Organ Culture. 1998. Vol. 52. P. 67–70. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8951-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8951-2_20)

Investigation the activities of photosynthetic pigments, antioxidant enzymes and inducing genotoxicity of cucumber seedling exposed to copper oxides nanoparticles stress / M. Abdelkader, R. A. Geiushy, O. A. Fouad, A. G. A. Khaled, L. P. Voronina // Scientia Horticulturae. 2022. Vol. 305. Art. 111364. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111364>

Kasana R. C., Panwar N. R., Kaul R. K. Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants // Environ. Chem. Lett. 2017. Vol. 15. P. 233–240. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0615-5>

Maithreyee M. N., Gowda R. Influence of nanoparticles in enhancing seed quality of aged seeds // Mysore J. Agric. Sci. 2015. Vol. 49, N 2. P. 310–313.

Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity / Y. N. Slavin, J. Asnis, U. O. Häfeli, H. Bach // J. Nanobiotechnol. 2017. Vol. 15, N 1. Art. 65. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>

Mulder E. G. Mineral nutrition in relation to the biochemistry and physiology of potatoes // Plant and Soil. 1949. Vol. 2. P. 59–121. <https://doi.org/10.1007/BF01344148>

Multilevel approach to plant–nanomaterial relationships: from cells to living ecosystems / H. C. Oliveira, A. B. Seabra, S. Kondak, O. P. Adedokun, Z. Kolbert // J. Experim. Botany. 2023. Vol. 74, N 12. P. 3406–3424. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad107>

Multifunctional copper-containing mesoporous glass nanoparticles as antibacterial and proangiogenic agents for chronic wounds / T. E. Paterson, A. Bari, A. J. Bullock, R. Turner, G. Montalbano, S. Fiorilli, C. Vitale-Brovarone, S. MacNeil, J. Shepherd // Front. Bioeng. Biotechnol. 2020. Vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00246>

Nagaonkar D., Shende S., Rai M. Biosynthesis of copper nanoparticles and its effect on actively dividing cells of mitosis in *Allium* // Biotechnol. Prog. 2015. Vol. 31, N 2. P. 557–565. <https://doi.org/10.1002/btpr.2040>

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

Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? / M. Bundschuh, J. Filser, S. Luderwald, M. McKee, G. Metreveli, G. Shaumann, R. Schultz, S. Wagner // Environ. Sci. Europe. 2018. Vol. 30. Art. 6. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0132-6>

New hybrid copper nanoparticles/conjugated polyelectrolyte composite with antibacterial activity / I. A. Jessop, Y. P. Pérez, A. Jachura, H. Nuñez, C. Saldías, M. Isaacs, A. Tundidor-Camba, C. A. Terraza, I. Araya-Durán, M. B. Camarada, J. J. Cárcamo-Vega // Polymers. 2021. Vol. 13. N 3. Art. 401. <https://doi.org/10.3390/polym13030401>

Peña M. M. O., Lee J., Thiele D. J. A delicate balance: Homeostatic control of copper uptake and distribution // J. Nutr. 1999. Vol. 129, N 7. P. 1251–1260. <https://doi.org/10.1093/jn/129.7.1251>

*Penicillium chrysogenum*-mediated mycogenic synthesis of copper oxide nanoparticles using gamma rays for *in vitro* antimicrobial activity against some plant pathogens / A. I. El-Batal, G. S. El-Sayyad, F. M. Mosallam, R. M. Fathy // J. Cluster Sci. 2020. Vol. 31. P. 79–90. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01619-3>

Persistence in phytopathogenic bacteria: Do we know enough? / P. M. M. Martins, M. V. Merfa, M. A. Takita, A. A. De Souza // Frontiers in Microbiology. 2018. Vol. 9. Art. 1099. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01099>

Plant-mediated copper nanoparticles for agri-ecosystem applications. Chapter 4 / H. I. Mohamed, T. K. Sajyan, R. Shaalan, R. Bejjani, Y. N. Sassine, A. Basite // Nanobiotechnology for Plant Protection. 2022. P. 79–120. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823575-1.00025-1>

Pollock K., Barfield D. G., Shields R. The toxicity of antibiotics to plant cell cultures // Plant Cell Rep. 1983. Vol. 2, N 1. P. 36–39. <https://doi.org/10.1007/BF00269232>

Pontel L., Checa S., Soncini F. Bacterial copper resistance and virulence // Bacteria-metal interactions. Switzerland : Springer, 2015. P. 1–19. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18570-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18570-5_1)

Potential of copper nanoparticles to increase growth and yield of wheat / A. Hafeez, A. Razaq, T. Mahmood, H. M. Jhazab // J. Nanosci. Adv. Tech. 2015. Vol. 1, N 1. P. 6–11. <https://doi.org/10.24218/JNAT.2015.02>

Reduced graphene oxide-based nanometal-composite containing copper and silver nanoparticles protect tomato and pepper against *Xanthomonas euvesicatoria* infection / Z. Bytešníková, J. Pečenka, D. Tekielska, T. Kiss, P. Švec, A. Ridošková, P. Bezdička, J. Pekárková, A. Eichmeier, R. Pokluda, V. Adam, L. Richtera // Chem. Biol. Technol. Agric. 2022. Vol. 9. Art. 84. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00347-7>

Sereena M. C., Sebastian D. Cloning, expression and characterization of the anticancer protein azurin from an indigenous strain *Pseudomonas aeruginosa* SSj // Int. J. Peptide Res. Therap. 2020. Vol. 26. P. 1223–1230. <https://doi.org/10.1007/s10989-019-09924-1>

Shah V., Belozeroва I. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds // Water Air Soil Pollut. 2009. Vol. 197, N 1. P. 143–148. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9797-6>

Siddiqi K. S., Husen A. Current status of plant metabolite-based fabrication of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review // Biomater. Res. 2020. Vol. 24. Art. 11. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00188-1>

Silver and copper nanoparticles induce oxidative stress in bacteria and mammalian cells / T. Ameh, M. Gibb, D. Stevens, S. H. Pradhan, E. Braswell, C. M. Sayes // Nanomaterials (Basel). 2022. Vol. 12, N 14. Art. 2402. <https://doi.org/10.3390/nano12142402>

Size-dependent biological effects of copper nanopowders on mustard seedlings / D. Churilov, V. Churilova, I. Stepanova, S. Polischuk, A. Gusev, O. Zakharova, I. Arapov, G. Churilov // IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci. 2019. Vol. 392. Art. 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012008>

Sobiczewski P., Iakimova E. T. Plant and human pathogenic bacteria exchanging their primary host environments // J. Horticult. Res. 2022. Vol. 30. P. 11–30. <https://doi.org/10.2478/johr-2022-0009>

Solizio M., Odermatt A., Krapf R. Copper pumping ATPases: common concepts in bacteria and man // FEBS Lett. 1994. Vol. 346. P. 44–47. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(94\)00316-5](https://doi.org/10.1016/0014-5793(94)00316-5)

Synthesis of biologically active copper oxide nanoparticles as promising novel antibacterial-antibiofilm agents / F. Erci, R. Cakir-Koc, M. Yontem, E. Torlak // Prep. Biochem. Biotechnol. 2020. Vol. 50, N 6. P. 538–548. <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1711393>

The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for *Fusarium* wilt and plant growth promoter / D. Lopez-Lima, A. I. Mtz-Enriquez, G. Carrión, S. Basurto-Cereceda, N. Pariona // *Scientia Horticulturae*. 2021. Vol. 277. Art. 109810. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109810>

The effects of CuO nanoparticles on wheat seeds and seedlings and *Alternaria solani* fungi: *in vitro* study / O. Zakharova, E. Kolesnikov, N. Shatrova, A. Gusev // *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 226. Art. 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012036>

The effect of green synthesized CuO nanoparticles on callogenesis and regeneration of *Oryza sativa* L. / S. Anwaar, Q. Maqbool, N. Jabeen, M. Nazar, F. Abbas, B. Nawaz, T. Hussain, S. Hussain // *Front. Plant. Sci.* 2016. Vol. 7. Art. 1330. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01330>

The effect of pre-sowing seed treatment with metal nanoparticles on the formation of the defensive reaction of wheat seedlings infected with the eyespot causal agent / O. Panyuta, V. Belava, S. Fomaidi, O. Kalinichenko, M. Volkogon, N. Taran // *Nanoscale Res. Lett.* 2016. Vol. 11, N 1. Art. 92. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1305-0>

The effect of silver and copper nanoparticles on the wheat-*Pseudocercospora herpotrichoides* pathosystem / V. N. Belava, O. O. Panyuta, G. M. Yakovleva, Y. M. Pysmenna, M. V. Volkogon // *Nanoscale Res. Lett.* 2017. Vol. 12, N 1. Art. 250. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2028-6>

The emergence of metal oxide nanoparticles (NPs) as a phytomedicine: A two-facet role in plant growth, nano-toxicity an anti-phyto-microbial activity / R. Bhattacharjee, L. Kumar, N. Mukerjee, U. Anand, A. Dhasmana, S. Preetam, S. Bhaumik, S. Sihi, S. Pal, T. Khare, S. Chattopadhyay, S. A. El-Zahaby, A. Alexiou, E. P. Koshy, V. Kumar, S. Malik, A. Dey, J. Proćkow // *Biomed. Pharmacother.* 2022. Vol. 155. Art. 113658. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113658>

The impact of copper oxide and silver nanoparticles on woody plants obtained by *in vitro* method / O. A. Fedorova, T. A. Grodetskaya, N. Evtushenko, P. M. Evlakov, A. A. Gusev, O. V. Zakharova // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. Vol. 875. Art. 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012048>

The influence of Cu and Co nanoparticles on growth characteristics and biochemical structure of *Mentha longifolia in vitro* / T. E. Talankova-Sereda, K. V. Liapina, E. A. Shkopinskij, A. I. Ustinov, A. V. Kovalyova, P. G. Dulnev, N. I. Kucenko // *Nanosci. Nanoeng.* 2016. Vol. 4, N 2. P. 31–39. <https://doi.org/10.13189/nn.2016.040201>

Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions // *Funct. Plant Biol.* 2009. Vol. 36, N 5. P. 409–430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>

Zakharova O. V., Gusev A. A. Photocatalytically active zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles in clonal micropropagation of plants: Prospects // *Nanotechnologies in Russia*. 2019. Vol. 14. P. 311–324. <https://doi.org/10.1134/S1995078019040141>

## References

Morgalyov Y.N, Hoch N.S., Morgalyova T.G, Gulik E.S, Borilo G.A, Bulatova U.A., Morgalyov S.Y, Ponjavina E.V. Biotestirovanie nanomaterialov: o vozmozhnosti translokacii nanochastic v pishchevye seti [Biotesting of nanomaterials: on the possibility of translocation of nanoparticles into food webs]. *Rossijskie nanotekhnologii* [Nanobiotechnology Reports]. 2010, vol. 11-12, pp. 131-135. (in Russian)

Dykman L.A., Shchyogolev S.Yu. Vzaimodejstvie rastenij s nanochasticami blagorodnyh metallov (obzor) [Interaction of plants with nanoparticles of precious metals (review)]. *Selskochozjajstvennaya biologiya* [Agricultural Biology]. 2017, vol. 52, pp. 13-24. (in Russian)

Ivanishchev V.V. Bioakkumuljaciya, gomeostaz i toksichnost medi v rasteniyah [Bioaccumulation, homeostasis and toxicity of copper in plants]. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Estestvennye nauki* [Proceedings of Tula State University. Natural Sciences]. 2020, vol. 1, pp. 33-41. (in Russian)

Katalymov M.V. *Mikroelementy i mikroudobreniya* [Trace elements and micronutrients]. Moscow, Himiya Publ., 1965, 332 p. (in Russian)

Pramanik A., Laha D., Bhattacharya D., Pramanik P., Karmakar P. A novel study of antibacterial activity of copper iodide nanoparticle mediated by DNA and membrane damage. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, vol. 96, pp. 50-55. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.03.021>

Abbasifar A., Shahrabadi F., Valizadehkaji B. Effects of green synthesized zinc and copper nano-fertilizers on the morphological and biochemical attributes of basil plant. *J. Plant Nutr.*, 2020, vol. 43, pp. 1104-1118. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1724305>

Su Y., Zheng X., Chen Y., Li M., Liu K. Alteration of intracellular protein expressions as a key mechanism of the deterioration of bacterial denitrification caused by copper oxide nanoparticles. *Sci. Rep.*, 2015. vol. 5, 15824. <https://doi.org/10.1038/srep15824>

Rojas B., Soto N., Villalba M., Bello-Toledo H., Meléndrez-Castro M., Sánchez-Sanhueza G. Antibacterial activity of copper nanoparticles (CuNPs) against a resistant calcium hydroxide multi-species endodontic biofilm. *Nanomaterials*, 2021, vol. 11, no. 9, 2254. <https://doi.org/10.3390/nano11092254>

Román L.E., Gomez E.D., Solís J.L., Gómez M.M. Antibacterial cotton fabric functionalized with copper oxide nanoparticles. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 24, 5802. <https://doi.org/10.3390/molecules25245802>

Liang Y., Zhang J., Quan H., Zhang P., Xu K., He J., Fang Y., Wang J., Chen P. Antibacterial effect of copper sulfide nanoparticles on infected wound healing. *Surg. Infect. (Larchmt)*, 2021, vol. 22, no. 9, pp. 894-902. <https://doi.org/10.1089/sur.2020.411>

Kannan S., Vinitha P., Mohanraj K., Sivakumar G. Antibacterial studies of novel Cu<sub>2</sub>WS<sub>4</sub> ternary chalcogenide synthesized by hydrothermal process. *J. Solid State Chem.*, 2018, vol. 258, pp. 376-382. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2017.11.005>

Ullah R., Ullah Z., Iqbal J., Chalgham W., Ahmad A. Aspartic acid-based nano-copper induces resilience in Zea mays to applied lead stress via conserving photosynthetic pigments and triggering the antioxidant biosystem. *Sustainability*, 2023, vol. 15, 12186. <https://doi.org/10.3390/su151612186>

Teow S.-Y., Wong M.M.-T., Yap H.-Y., Peh S.-C., Shameli K. Bactericidal properties of plants-derived metal and metal oxide nanoparticles (NPs). *Molecules*, 2018, vol. 23, 1366. <https://doi.org/10.3390/molecules23061366>

Bezza F.A., Tichapondwa S.M., Chirwa E.M.N. Fabrication of monodispersed copper oxide nanoparticles with potential application as antimicrobial agents. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 1, 16680. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73497-z>

Huang X., Li T., Zhang X., Deng J., Yin X. Bimetallic palladium and copper nanoparticles: Lethal effect on the gram-negative bacterium *Pseudomonas aeruginosa*. *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.*, 2021, vol. 129, 112392. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112392>

Ren G., Hu D., Cheng E.W.C., Vargas-Reus M.A., Reip P., Allaker R.P. Characterisation of copper oxide nanoparticles for antimicrobial applications. *Int. J. Antimicrob. Agents*, 2009, vol. 33, no. 6, pp. 587-590. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2008.12.004>

Hernández-Hernández H., Juárez-Maldonado A., Benavides-Mendoza A., Ortega-Ortiz H., Cadenas-Pliego G., Sánchez-Aspeytia D., González-Morales S. Chitosan-PVA and copper nanoparticles improve growth and overexpress the SOD and JA genes in tomato plants under salt stress. *Agronomy*, 2018, vol. 8, 175. <https://doi.org/10.3390/agronomy8090175>

Hidouri S., Karmous I., Kadri O., Kharbech O., Chaoui A. Clue of zinc oxide and copper oxide nanoparticles in the remediation of cadmium toxicity in *Phaseolus vulgaris* L. via the modulation of antioxidant and redox systems. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.*, 2022, vol. 56, pp. 85271-85285. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21799-2>

Kim Y.H., Kim G.H., Yoon K.S., Shiv S., Rhim J.-W. Comparative antibacterial and antifungal activities of sulfur nanoparticles capped with chitosan. *Microb. Pathogen.*, 2020, vol. 144, 104178. <https://doi.org/10.1016/j.micpath.2020.104178>

Zakharova O.V., Godymchuk A.Yu., Gusev A.A., Gulchenko S.I., Vasyukova I.A., Kuznetsov D.V. Considerable variation of antibacterial activity of Cu nanoparticles suspensions depending on the storage time, dispersive medium, and particle sizes. *BioMed Res. Int.*, 2015, vol. 2015, 412530. <https://doi.org/10.1155/2015/412530>

Xi J., Wei G., An L., Xu Z., Xu Z., Fan L., Gao L. Copper/carbon hybrid nanozyme: Tuning catalytic activity by copper state for antibacterial therapy. *Nano Letters*, 2019, vol. 19, no. 11, pp. 7645-7654. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.9b02242>

Li X., Cong Y., Ovais M., Cardoso M. B., Hameed S., Chen R., Chen M., Wang L. Copper-based nanoparticles against microbial infections. *Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol.*, 2023, vol. 15, no. 4, e1888. <https://doi.org/10.1002/wnan.1888>

Rajwade J.M., Chikte R.C., Singh N., Paknikar K.M. Copper-based nanostructures: Antimicrobial properties against agri-food pathogens. Chapter 19. *Copper nanostructures: Next-generation of agrochemicals for sustainable agroecosystems*. Elsevier, 2022, pp. 477-503. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823833-2.00031-3>

García A., Rodríguez B., Giraldo H., Quintero Y., Quezada R., Hassan N., Estay H. Copper-modified polymeric membranes for water treatment: A comprehensive review. *Membranes (Basel)*, 2021, vol. 11, no. 2, 93. <https://doi.org/10.3390/membranes11020093>

Javed R., Mohamed A., Yucasan B., Ekrem G., Kausar R., Zia M. CuO nanoparticles significantly influence in vitro culture, steviol glycosides, and antioxidant activities of *Stevia rebaudiana* Bertoni. *Plant Cell Tiss. Org.*, 2017, vol. 131, pp. 611-620. <https://doi.org/10.1007/s11240-017-1312-6>

Da Costa M.V.J., Sharma P.K. Effect of copper oxide nanoparticles on growth, morphology, photosynthesis, and antioxidant response in *Oryza sativa*. *Photosynthetica*, 2016, vol. 54, no. 1, pp. 110-119. <https://doi.org/10.1007/s11099-015-0167-5>

Grodetskaya T.A., Fedorova O.A., Evlakov P.M., Baranov O.Yu., Zakharova O.V., Gusev A.A. Effect of copper oxide and silver nanoparticles on the development of tolerance to *Alternaria alternata* in poplar in vitro clones. *Nanobiotechnol. Rep.*, 2021, vol. 16, no. 2, pp. 231-238. <https://doi.org/10.1134/S2635167621020063>

Van N.L., Ma C., Shang J., Rui Y., Liu S., Xing B. Effects of CuO nanoparticles on insecticidal activity and phytotoxicity in conventional and transgenic cotton. *Chemosphere*, 2016, vol. 144, pp. 661-670. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.028>

Liu C., Yu Y., Liu H., Xin H. Effect of different copper oxide particles on cell division and related genes of soybean roots. *Plant Physiol. Biochem.*, 2021, vol. 163, pp. 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.03.051>

López-Luna J., Nopal-Hormiga Y., López-Sánchez L., Mtz-Enriquez A.I., Pariona N. Effect of methods application of copper nanoparticles in the growth of avocado plants. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 880, 163341. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163341>

Lv P., Zhu L., Yu Y., Wang W., Liu G., Lu H. Effect of NaOH concentration on antibacterial activities of Cu nanoparticles and the antibacterial mechanism. *Mater. Sci. Eng. C. Mater. Biol. Appl.*, 2020, vol. 110, 110669. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110669>

Guzman M., Arcos M., Dille J., Rousse C., Godet S., Malet L. Effect of the concentration and the type of dispersant on the synthesis of copper oxide nanoparticles and their potential antimicrobial applications. *ACS Omega*, 2021, vol. 6, no. 29, pp. 18576-18590. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00818>

Ermini M.L., Voliani V. Antimicrobial nano-agents: The copper age. *ACS Nano*, 2021, vol. 15, no. 4, pp. 6008-6029. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10756>

Fargašová A. Toxicity comparison of some possible toxic metals (Cd, Cu, Pb, Se, Zn) on young seedlings of *Sinapis alba* L. *Plant, Soil and Environment*, 2004, vol. 50, no. 1, pp. 33-38.

Feigl G. The impact of copper oxide nanoparticles on plant growth: A comprehensive review. *J. Plant Interact.*, 2023, vol. 18, no. 1, 2243098. <https://doi.org/10.1080/17429145.2023.2243098>

López-Vargas E.R., Ortega-Ortíz H., Cadenas-Pliego G., de Alba Romenus K., de la Fuente M. C., Benavides-Mendoza A., Juárez-Maldonado A. Foliar application of copper nanoparticles increases the fruit quality and the content of bioactive compounds in tomatoes. *Appl. Sci.*, 2018, vol. 8, 1020. <https://doi.org/10.3390/app8071020>

Nekoukhou M., Fallah S., Pokhrel L.R., Abbasi-Surki A., Rostamnejadi A. Foliar enrichment of copper oxide nanoparticles promotes biomass, photosynthetic pigments, and commercially valuable secondary metabolites and essential oils in dragonhead (*Dracocephalum moldavica* L.) under semi-arid conditions. *Sci. Total Environ.*, 2023, vol. 863, 160920. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160920>

Pariona N., Mtz-Enriquez A. I., Sánchez-Rangel D., Carrión G., Paraguay-Delgado F., Rosas-Saito G. Green-synthesized copper nanoparticles as a potential antifungal against plant pathogens. *RSC Adv.*, 2019, vol. 9, no. 33, pp. 18835-18843. <https://doi.org/10.1039/c9ra03110c>

Noman M., Shahid M., Ahmed T., Tahir M., Naqqash T., Muhammad S., Song F., Abid H. M. A., Aslam Z. Green copper nanoparticles from a native *Klebsiella pneumoniae* strain alleviated oxidative stress impairment of wheat plants by reducing the chromium bioavailability and increasing the growth. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2020, vol. 192, 110303. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110303>

Gross E.L. Plastocyanin: Structure and function. *Photosynth. Res.*, 1993, vol. 37, pp. 103-116. <https://doi.org/10.1007/BF02187469>

- Hahn M. The rising threat of fungicide resistance in plant pathogenic fungi: Botrytis as a case study. *J. Chem. Biol.*, 2014, vol. 7, pp. 133-141. <https://doi.org/10.1007/s12154-014-0113-1>
- Hashim A., Agool I. R., Kadhim K. J. Modern developments in polymer nanocomposites for antibacterial and antimicrobial applications: A review. *J. Bionanosci.*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 608-613. <https://doi.org/10.1166/jbns.2018.1580>
- Hopkins W.G., Huner N.P.A. *Introduction to plant physiology*. New York, J. Wiley&Sons, 2008, 528 p.
- Giannousi K., Lafazanis K., Arvanitidis J., Pantazaki A., Dendrinou-Samara C. Hydrothermal synthesis of copper based nanoparticles: Antimicrobial screening and interaction with DNA. *J. Inorgan. Biochem.*, 2014, vol. 133, pp. 24-32. <https://doi.org/10.1016/j.jinorgbio.2013.12.009>
- Grodetskaya T.A., Evlakov P.M., Fedorova O.A., Mikhin V.I., Zakharova O.V., Kolesnikov E.A., Evtushenko N.A., Gusev A.A. Influence of copper oxide nanoparticles on gene expression of birch clones in vitro under stress caused by phytopathogens. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, vol. 12, no. 5, 864. <https://doi.org/10.3390/nano12050864>
- Reed B.M., Mentzer J., Tanprasert P., Yu X. Internal bacterial contamination of micropropagated hazelnut: identification and antibiotic treatment. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1998, vol. 52, pp. 67-70. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-8951-2\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-015-8951-2_20)
- Abdelkader M., Geioushy R.A., Fouad O.A., Khaled A.G.A., Voronina L.P. Investigation the activities of photosynthetic pigments, antioxidant enzymes and inducing genotoxicity of cucumber seedling exposed to copper oxides nanoparticles stress. *Scientia Horticulturae*, 2022, vol. 305, 111364. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111364>
- Kasana R.C., Panwar N.R., Kaul R.K. Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants. *Environ. Chem. Lett.*, 2017, vol. 15, pp. 233-240. <https://doi.org/10.1007/s10311-017-0615-5>
- Maithreyee M.N., Gowda R. Influence of nanoparticles in enhancing seed quality of aged seeds. *Mysore J. Agric. Sci.*, 2015, vol. 49, no. 2, pp. 310-313.
- Slavin Y.N., Ansnis J., Häfeli U.O., Bach H. Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *J. Nanobiotechnol.*, 2017, vol. 15, no. 1, з. 65. <https://doi.org/10.1186/s12951-017-0308-z>
- Mulder E.G. Mineral nutrition in relation to the biochemistry and physiology of potatoes. *Plant and Soil*, 1949, vol. 2, pp. 59-121. <https://doi.org/10.1007/BF01344148>
- Oliveira H.C., Seabra A.B., Kondak S., Adedokun O.P., Kolbert Z. Multilevel approach to plant-nanomaterial relationships: from cells to living ecosystems. *J. Experim. Botany*, 2023, vol. 74, no. 12, pp. 3406-3424. <https://doi.org/10.1093/jxb/erad107>
- Paterson T.E., Bari A., Bullock A.J., Turner R., Montalbano G., Fiorilli S., Vitale-Brovarone C., MacNeil S., Shepherd J. Multifunctional copper-containing mesoporous glass nanoparticles as antibacterial and proangiogenic agents for chronic wounds. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 2020, vol. 8. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.00246>
- Nagaonkar D., Shende S., Rai M. Biosynthesis of copper nanoparticles and its effect on actively dividing cells of mitosis in Allium. *Biotechnol. Prog.*, 2015. vol. 31, no. 2, pp. 557-565. <https://doi.org/10.1002/btpr.2040>
- 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>
- Bundschuh M., Filser J., Ludermald S., McKee M., Metreveli G., Shaumann G., Schultz R., Wagner S. Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? *Environ. Sci. Europe*, 2018, vol. 30, 6. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0132-6>
- Jessop I.A., Pérez Y.P., Jachura A., Nuñez H., Saldías C., Isaacs M., Tundidor-Camba A., Ter-raza C.A., Araya-Durán I., Camarada M.B., Cárcamo-Vega J.J. New hybrid copper nanoparticles/conjugated polyelectrolyte composite with antibacterial activity. *Polymers*, 2021, vol. 13, no. 3, 401. <https://doi.org/10.3390/polym13030401>
- Peña M.M.O., Lee J., Thiele D.J. A delicate balance: Homeostatic control of copper uptake and distribution. *J. Nutr.*, 1999, vol. 129, no. 7, pp. 1251-1260. <https://doi.org/10.1093/jn/129.7.1251>
- El-Batal A.I., El-Sayyad G.S., Mosallam F.M., Fathy R.M. Penicillium chrysogenum-mediated mycogenic synthesis of copper oxide nanoparticles using gamma rays for in vitro antimicrobial activity against some plant pathogens. *J. Cluster Sci.*, 2020, vol. 31, pp. 79-90. <https://doi.org/10.1007/s10876-019-01619-3>

Martins P.M.M., Merfa M.V., Takita M.A., De Souza A.A. Persistence in phytopathogenic bacteria: Do we know enough? *Frontiers in Microbiology*, 2018, vol. 9, 1099. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01099>

Mohamed H.I., Sajyan T.K., Shaalan R., Bejjani R., Sassine Y.N., Basite A. Plant-mediated copper nanoparticles for agri-ecosystem applications. Chapter 4. *Nanobiotechnology for Plant Protection*, 2022, pp. 79–120. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823575-1.00025-1>

Pollock K., Barfield D.G., Shields R. The toxicity of antibiotics to plant cell cultures. *Plant Cell Rep.*, 1983, vol. 2, no. 1, pp. 36-39. <https://doi.org/10.1007/BF00269232>

Pontel L., Checa S., Soncini F. Bacterial copper resistance and virulence. *Bacteria-metal interactions*. Switzerland : Springer, 2015, pp. 1-19. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-18570-5\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-18570-5_1)

Hafeez A., Razaq A., Mahmood T., Jhanzab H.M. Potential of copper nanoparticles to increase growth and yield of wheat. *J. Nanosci. Adv. Tech.*, 2015, vol. 1, no. 1, pp. 6-11. <https://doi.org/10.24218/JNAT.2015.02>

Bytešníková Z., Pečenka J., Tekielska D., Kiss T., Švec P., Ridošková A., Bezdička P., Pekárková J., Eichmeier A., Pokluda R., Adam V., Richtera L. Reduced graphene oxide-based nanometal-composite containing copper and silver nanoparticles protect tomato and pepper against *Xanthomonas euvesicatoria* infection. *Chem. Biol. Technol. Agric.*, 2022, vol. 9, 84. <https://doi.org/10.1186/s40538-022-00347-7>

Sereena M.C., Sebastian D. Cloning, expression and characterization of the anticancer protein azurin from an indigenous strain *Pseudomonas aeruginosa* SSj. *Int. J. Peptide Res. Therap.*, 2020., vol. 26, pp. 1223-1230. <https://doi.org/10.1007/s10989-019-09924-1>

Shah V., Belozeroва I. Influence of metal nanoparticles on the soil microbial community and germination of lettuce seeds. *Water Air Soil Pollut.*, 2009, vol. 197, no. 1, pp. 143-148. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9797-6>

Siddiqi K.S., Husen A. Current status of plant metabolite-based fabrication of copper/copper oxide nanoparticles and their applications: a review. *Biomater. Res.*, 2020, vol. 24, no. 11. <https://doi.org/10.1186/s40824-020-00188-1>

Ameh T., Gibb M., Stevens D., Pradhan S.H., Braswell E., Sayes C.M. Silver and copper nanoparticles induce oxidative stress in bacteria and mammalian cells. *Nanomaterials (Basel)*, 2022, vol. 12, no. 14, 2402. <https://doi.org/10.3390/nano12142402>

Churilov D., Churilova V., Stepanova I., Polischuk S., Gusev A., Zakharova O., Arapov I., Churilov G. Size-dependent biological effects of copper nanopowders on mustard seedlings. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 392, 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/392/1/012008>

Sobiczewski P., Iakimova E. T. Plant and human pathogenic bacteria exchanging their primary host environments. *J. Hortic. Res.*, 2022, vol. 30, pp. 11-30. <https://doi.org/10.2478/johr-2022-0009>

Soloz M., Odermatt A., Krapf R. Copper pumping ATPases: common concepts in bacteria and man. *FEBS Lett.*, 1994, vol. 346, pp. 44-47. [https://doi.org/10.1016/0014-5793\(94\)00316-5](https://doi.org/10.1016/0014-5793(94)00316-5)

Erci F., Cakir-Koc R., Yontem M., Torlak E. Synthesis of biologically active copper oxide nanoparticles as promising novel antibacterial-antibiofilm agents. *Prep. Biochem. Biotechnol.*, 2020, vol. 50, no. 6, pp. 538-548. <https://doi.org/10.1080/10826068.2019.1711393>

Lopez-Lima D., Mtz-Enriquez A.I., Carrión G., Basurto-Cereceda S., Pariona N. The bifunctional role of copper nanoparticles in tomato: Effective treatment for Fusarium wilt and plant growth promoter. *Scientia Horticulturae*, 2021, vol. 277, 109810. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109810>

Zakharova O., Kolesnikov E., Shatrova N., Gusev A. The effects of CuO nanoparticles on wheat seeds and seedlings and *Alternaria solani* fungi: in vitro study. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.*, 2019, vol. 226, 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/226/1/012036>

Anwaar S., Maqbool Q., Jabeen N., Nazar M., Abbas F., Nawaz B., Hussain T., Hussain S. The effect of green synthesized CuO nanoparticles on callogenesis and regeneration of *Oryza sativa* L. *Front. Plant. Sci.*, 2016, vol. 7, 1330. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01330>

Panyuta O., Belava V., Fomaidi S., Kalinichenko O., Volkogon M., Taran N. The effect of pre-sowing seed treatment with metal nanoparticles on the formation of the defensive reaction of wheat seedlings infected with the eyespot causal agent. *Nanoscale Res. Lett.*, 2016, vol. 11, no. 1, 92. <https://doi.org/10.1186/s11671-016-1305-0>

Belava V.N., Panyuta O.O., Yakovleva G.M., Pysmenna Y.M., Volkogon M.V. The effect of silver and copper nanoparticles on the wheat-Pseudocercospora herpotrichoides pathosystem. *Nanoscale Res. Lett.*, 2017, vol. 12, no. 1, 250. <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2028-6>

Bhattacharjee R., Kumar L., Mukerjee N., Anand U., Dhasmana A., Preetam S., Bhaumik S., Sihi S., Pal S., Khare T., Chattopadhyay S., El-Zahaby S.A., Alexiou A., Koshy E.P., Kumar V., Malik S., Dey A., Pro'ckow J. The emergence of metal oxide nanoparticles (NPs) as a phytomedicine: A two-facet role in plant growth, nano-toxicity an anti-phyto-microbial activity. *Biomed. Pharmacother.*, 2022, vol. 155, 113658. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2022.113658>

Fedorova O.A., Grodet'skaya T.A., Evtushenko N., Evlakov P.M., Gusev A.A., Zakharova O.V. The impact of copper oxide and silver nanoparticles on woody plants obtained by in vitro method. *IOP Conf. Ser. : Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 875, 012048. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012048>

Talankova-Sereda T.E., Liapina K.V., Shkopinskij E.A., Ustinov A.I., Kovalyova A.V., Dulnev P.G., Kucenko N.I. The influence of Cu and Co nanoparticles on growth characteristics and biochemical structure of *Mentha longifolia* in vitro. *Nanosci. Nanoeng.*, 2016, vol. 4, no. 2, pp. 31-39. <https://doi.org/10.13189/nn.2016.040201>

Yruela I. Copper in plants: acquisition, transport and interactions. *Funct. Plant Biol.*, 2009, vol. 36, no. 5, pp. 409-430. <https://doi.org/10.1071/FP08288>

Zakharova O.V., Gusev A.A. Photocatalytically active zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles in clonal micropropagation of plants: Prospects. *Nanotechnologies in Russia*, 2019, vol. 14, pp. 311-324. <https://doi.org/10.1134/S1995078019040141>

#### Сведения об авторах

#### Information about the authors

##### **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](mailto:alla.light@mail.ru)

##### **Perfileva Alla Innokent'evna**

Candidate of Science (Biology),  
Senior Research Scientist  
Siberian Institute of Plant Physiology  
and Biochemistry SB RAS  
132, Lermontov st., Irkutsk, 664033,  
Russian Federation  
e-mail: [alla.light@mail.ru](mailto: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, г. Иркутск, ул. К. Маркса,  
e-mail: [pavnatser@mail.ru](mailto:pavnatser@mail.ru)

##### **Zabanova Natalya Sergeevna**

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

Статья поступила в редакцию **23.01.2023**; одобрена после рецензирования **02.03.2023**; принята к публикации **10.03.2023**  
Submitted **January, 23, 2023**; approved after reviewing **March, 02, 2023**; accepted for publication **March, 10, 2023**