

## ФИЗИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ, МИКРОБИОЛОГИЯ

Обзорная статья

УДК 620.3:581.1:631.547.03:632.952

doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-77-93



### Физиологические аспекты воздействия наночастиц на клетки растений и микроорганизмов

Дарья Анатольевна Хлебникова, Оксана Борисовна Поливанова,  
Маргарита Владимировна Бойцова, Илья Иванович Чеповой,  
Нандин-Оюу Мунхбаатар, Михаил Юрьевич Чередниченко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

**Автор, ответственный за переписку:** Дарья Анатольевна Хлебникова; khlebnikova@rgau-msha.ru

**Аннотация.** Наночастицы – уникальные по физическим и химическим характеристикам материалы размером менее 100 нм, которые находят широкое применение в различных отраслях промышленности, медицины и сельского хозяйства. В агропромышленном комплексе наноматериалы используются в качестве наноудобрений и нанопестицидов, что обуславливает необходимость детального изучения физиологических, биохимических и молекулярно-генетических реакций на взаимодействие с наноматериалами со стороны клеток живых организмов – растений, грибов и животных. В статье приводится информация о механизмах поглощения, перемещения и молекулярного взаимодействия наночастиц в растительных организмах, а также о механизмах антибактериальной и фунгицидной активности наноматериалов. Опубликованные ранее исследования физиологических особенностей поглощения наночастиц растениями свидетельствуют о двух возможных путях проникновения их в растительный организм: апопластический и симпластический. Непосредственно в растительной клетке наночастицы проявляют свойства активных форм кислорода (АФК), вызывают оксидативный стресс и запускают ферментативные и неферментативные системы защиты, что может вызывать как угнетение физиологических процессов, так и стимулирование роста, развития и увеличения урожайности. Эффект для растительного организма является видоспецифичным, а также зависит от типа наноматериала и его рабочей концентрации. Для выявления особенностей действия того или иного наноматериала на определенный вид растений необходимы детальные лабораторные и полевые исследования с соблюдением всех норм токсикологической безопасности для избежания загрязнения окружающей среды наноматериалами. На клетки микроорганизмов наночастицы действуют как факторы физического и химического разрушения: нарушают проницаемость клеточной стенки и мембран органелл, конфигурацию белков, вызывают повреждения ДНК, что является причиной физического разрушения клетки. Данные свойства наночастиц лежат в основе их антимикробной и фунгицидной активности. Кроме того, действие на клетки микроорганизмов не является видоспецифичным, о чем необходимо помнить, используя наноматериалы при возделывании сельскохозяйственных культур, жизнь и продуктивность которых во многом зависит от микроорганизмов-симбионтов.

**Ключевые слова:** наночастицы, фитотоксичность, оксидативный стресс, антимикробная активность, фунгицидная активность.

**Финансирование.** Исследование проведено при финансовой поддержке научно-исследовательских проектов в сфере импортозамещения «Продовольственный суверенитет» (приказ от 24 июня 2022 г. № 458а) в рамках реализации программы развития университета «Агропрорыв-2030» программы академического стратегического лидерства «Приоритет-2030».

**Для цитирования.** Хлебникова Д.А., Поливанова О.Б., Бойцова М.В., Чеповой И.И., Мунхбаатар Н. – О., Чередниченко М.Ю. Физиологические аспекты воздействия наночастиц на клетки растений и микроорганизмов // Тимирязевский биологический журнал. – 2023. – № 2. – С. 77-93. <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-2-77-93>

© Хлебникова Д.А., Поливанова О.Б., Бойцова М.В.,  
Чеповой И.И., Мунхбаатар Н. – О., Чередниченко М.Ю., 2023

## PLANT PHYSIOLOGY, MICROBIOLOGY

Review article

doi: 10.26897/2949-4710-2023-2-77-93



## Physiological Aspects of Interaction of Nanoparticles with Plant and Microorganism Cells

Darya A. Khlebnikova, Oksana B. Polivanova, Margarita V. Boytsova,  
Ilya I. Chepovoy, Nandin-Oyuu Munkhbaatar, Mikhail Yu. Cherednichenko

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

**Corresponding author:** Darya A. Khlebnikova, khlebnikova@rgau-msha.ru

**Abstract.** Nanoparticles (NPs) are materials with unique physical and chemical properties that are less than 100 nm in size. They are widely used in various fields of industry, medicine and agriculture. In agribusiness nanomaterials are used as nanofertilisers and nanopesticides. This fact requires a detailed study of the physiological, biochemical and molecular genetic responses of cells of living organisms – plants, fungi and animals – to interaction with nanomaterials. This review article provides information on the mechanisms of nanoparticle absorption, movement and molecular interaction in plant organisms, as well as mechanisms of their antibacterial and fungicidal activity. Available scientific resources devoted to the physiological features of nanoparticle absorption by plants indicate two possible ways of their penetration into the plant organism – apoplastic and symplastic. In plant cells, nanoparticles act as reactive oxygen species (ROS), causing oxidative stress and triggering enzymatic and non-enzymatic defence systems that result in both inhibition of physiological processes and stimulation of plant growth and development and, consequently, increased yield. The effect on the plant organism is species-specific and depends on the type of nanomaterial and its concentration. Detailed laboratory and field studies are required to determine the specific effect of nanomaterials on a particular plant species, while complying with all toxicological safety standards to avoid environmental contamination with nanomaterials. Nanoparticles act on microorganism cells as physical and chemical disruptors – they change the permeability of cell walls and organelle membranes, protein configuration, damage DNA, leading to physical destruction of cells. Such properties of nanoparticles define antimicrobial and fungicidal activities of nanoparticles. However, nanoparticles should be used cautiously in crop production, as both plant life and productivity depend largely on microbial symbionts, and their effect on microbial cells is not species-specific.

**Key words:** nanoparticles, phytotoxicity, oxidative stress, antimicrobial activity, fungicidal activity

**Acknowledgments.** The study was funded by the Research Project of Import Substitution “Food Sovereignty” (Order No. 458 dated 24.06.2022) within the framework of the “Agrobreakthrough-2030” University Development Programme of the “Priority-2030” Strategic Academic Leadership Programme.

**For citation.** Khlebnikova D.A., Polivanova O.B., Boytsova M.V., Chepovoy I.I., Munkhbaatar N.-O., Cherednichenko M. Yu. Physiological Aspects of Interaction of Nanoparticles with Plant and Microorganism Cells. Timiryazev Biological Journal. 2023; 2: 77-93. (In Rus.) <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-2-77-93>

## Введение

Нанотехнология активно развивается как научная инновация XXI в. Эта междисциплинарная область включает в себя создание, модификацию и практическое применение материалов размером менее 100 нм (Mansoori, 2005). Наночастицы (НЧ) представляют собой уникальные материалы благодаря высокому отношению площади поверхности к объему, что приводит к особенностям их физических и химических параметров по сравнению с макроразмерными частицами того же химического состава (Ray 2010; Bakand et al., 2012).

НЧ находят широкое применение в медицине для адресной доставки лекарств, в генотерапии, лечении рака, в легкой промышленности в качестве добавок в лаки и краски, в качестве катализаторов в дизельном топливе или полупроводников в электронике. Одним из направлений применения НЧ в сельском хозяйстве является их использование в качестве стимуляторов роста растений, а также в борьбе с болезнями и вредителями. Нанокomпоненты в аграрной сфере, например, наноудобрения, нанопестициды, стимуляторы роста на основе НЧ и наноносителей, являются потенциально более эффективными и представляют меньший риск загрязнения окружающей среды, чем их традиционные аналоги (Cruz-Luna et al., 2021; Sarkar et al., 2021). НЧ известны как стимуляторы роста растений, модулирующие физиологические, биохимические и физико-химические процессы – такие, как фотосинтез и поглощение питательных веществ. Кроме того, накопление НЧ в растениях имеет большое значение не только в силу их предполагаемого воздействия на рост и развитие растений, но и как фактор, влияющий на состояние здоровья животных и человека, потребляющих данные растения.

НЧ металлов считаются перспективной альтернативой традиционным препаратам в борьбе с фитопатогенными грибами в сельском хозяйстве. На сегодняшний день НЧ целого ряда металлов (Ag, Cu, Ni, Mg, Fe и др.) были предложены в качестве действующих веществ с фунгицидной и антибактериальной активностью (Cruz-Luna et al., 2021). Однако при создании коммерческих препаратов важно учитывать не только активность определенного типа НЧ в отношении фитопатогенов (грибов и бактерий), но и особенности взаимодействия наноматериалов и растительных организмов. Для этого необходимо рассматривать физиологические и молекулярные механизмы взаимодействия наноматериалов и клеток растений, грибов, бактерий.

**Воздействие наночастиц на растения.** Наночастицы все чаще используются в различных отраслях промышленности, в том числе в сельском хозяйстве. Однако доказано, что многие типы наночастиц токсичны для клеток живых организмов несмотря на то, что те же соединения в макроразмерности безвредны. Без экспериментальных данных невозможно предсказать степень токсичности определенного типа наночастиц. Вопросами безопасности наноматериалов занимается междисциплинарная и активно развивающаяся область – нанотоксикология, которая изучает токсичность соединений в наноформе (Maynard et al., 2012).

Высказываются опасения того, что недостаточная информированность исследователей, работающих над применением наноматериалов в сельском хозяйстве, об особенностях взаимодействия их и клеток растений, микроорганизмов и животных на молекулярном уровне и их токсикологии, может привести к серьезным экологическим и медицинским последствиям в результате неправильного обращения и непреднамеренного воздействия НЧ на живые организмы. Во-первых, ввиду своего небольшого размера НЧ могут легко переноситься по воздуху, вдыхаться и проглатываться, а также взаимодействовать с кожей животных и человека. Во-вторых, неконтролируемое использование НЧ в сельском хозяйстве представляет риск для населения и экосистемы (Maynard et al., 2012).

Помня об асбесте и тяжелых последствиях для здоровья, связанных с его использованием в строительстве, важно предотвратить подобные ситуации с наноматериалами (Smith et al., 1996; Li et al., 2004). Однако использование НЧ в сельском хозяйстве может представлять еще большую экологическую и токсикологическую угрозу, чем асбест. Использование асбеста ограничивалось в основном строительной отраслью. Ограничения были также территориальными (строящиеся здания, производственные помещения), поэтому загрязнение можно было относительно легко ликвидировать. НЧ, используемые в сельском хозяйстве, не будут иметь ограниченную локализацию; они будут попадать в атмосферу, их будут вдыхать, они смогут перемещаться по грунтовым водам и приводить к разрушительным последствиям для здоровья людей и животных.

Взаимодействие НЧ и растений – относительно новая область исследований. Поглощение НЧ зависит от вида растений. Тема поглощения и транспорта НЧ внутри растений до сих пор недостаточно изучена, однако существует консенсус, что эти процессы зависят от типа НЧ, их физико-химических свойств, вида растения и вида субстрата выращивания: почвы, гидропоники или искусственной питательной среды (Bernhardt et al., 2010; Deng et al., 2014; Arruda et al., 2015; Bakshi et al., 2015; Chichiricco and Poma, 2015; Ahmad et al., 2022; Siddiqi et al., 2022; Mahajan et al., 2022).

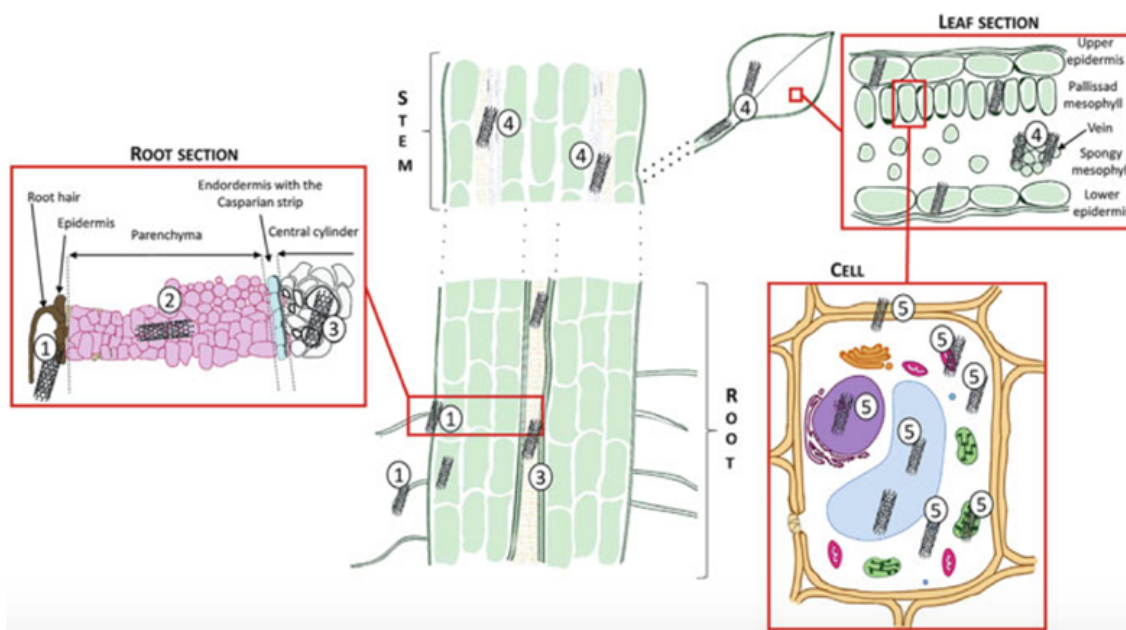
Уже известно, что некоторые НЧ перемещаются внутри растений, образуя комплексы с белками-переносчиками мембран или корневыми экссудатами. Свойства НЧ – такие, как размер, пористость, гидрофобность и характер поверхности, определяют их взаимодействие с клетками растений. Схема поглощения и перемещения НЧ представлена на рисунке 1 (Line et al., 2017).

НЧ небольшого размера (5-20 нм) могут быть поглощены корнями через поры клеточных стенок корневого эпидермиса – это апопластический путь поглощения (Deng et al., 2014). Частицы крупнее размера пор не могут быть поглощены таким образом. Небольшие НЧ, проникающие через клеточные стенки, могут под действием осмотического давления и капиллярных сил диффундировать через апопласт и достигать эндодермы (Lin et al., 2009; Deng et al., 2014).

Другой путь поглощения НЧ растениями – симпластический – через внутреннюю сторону плазматической мембраны. Клеточная стенка представляет собой пористую матрицу из полисахаридных волокон, через которую могут проходить НЧ, связывающиеся с белками-носителями посредством аквапоринов, ионных каналов и эндоцитоза, либо прокалывая клеточную мембрану и создавая новые поры (Tripathi et al., 2017). НЧ могут мигрировать в соседние клетки через плазмодесмы (каналы диаметром 20-50 нм) (Deng et al., 2014).

Еще один путь проникновения НЧ в растения – с поверхности листьев через устьица (Hong et al., 2014). Из листьев НЧ могут перемещаться в другие части растений включая корни (Hong et al., 2014). Примерами растений, которые усваивают НЧ через листья, являются рапс, пшеница, фасоль, кукуруза, салат и огурец (Chichiricco and Poma, 2015). Было показано, что НЧ размером от нескольких нанометров до нескольких сотен нанометров и различного химического состава (серебро, цери́й, титан, оксид железа, оксид цинка) могут проникать через листья (Chichiricco and Poma, 2015).

Подтверждено, что внутри клеток НЧ взаимодействуют с клеточными органеллами, и в зависимости от физико-химических свойств их поверхности могут вызывать окислительный стресс, генотоксичность и изменения метаболических путей (Deng et al., 2014).



**Рис. 1.** Схема поглощения и перемещения НЧ внутри растения (Line et al., 2017)

**Fig. 1.** Schematic of the absorption and movement of NPs within a plant (Line et al., 2017)

Было также показано, что многие культуры, подвергшиеся воздействию различных НЧ, усваивают их (Deng et al., 2014). Оказавшись внутри, НЧ перемещаются в различные ткани растений: стебли, листья, черешки, цветки и плоды (Deng et al., 2014). Несмотря на то, что есть немало сообщений о стимулирующем воздействии НЧ на растения, опубликованы также данные о неблагоприятном воздействии НЧ на многие сельскохозяйственные культуры.

Ниже приведены исследования, свидетельствующие о поглощении НЧ различными видами сельскохозяйственных растений:

- Au – томат (Dan et al., 2015); табак (Judy et al., 2011); арабидопсис (Avellan et al., 2017); ячмень (Feichtmeier et al., 2015); рис, редис, тыква (Zhu et al., 2012).
- Ag – арабидопсис (Geisler-Lee et al., 2013); томат (Antisari et al., 2015); пшеница (Dimkpa et al., 2013); маш и сорго (Lee et al., 2012); рис (Thuesombat et al., 2014); бобы (Patlolla et al., 2012); кукуруза, капуста (Pokrel and Dubey, 2013).
- $\text{CeO}_2$  – люцерна, кукуруза (Wang et al., 2013); огурец (Zhang et al., 2011); томат (Antisari et al., 2015); ячмень (Rico et al., 2015); пшеница (Rico et al., 2014).
- $\text{TiO}_2$  – кукуруза (Asli and Neumann, 2009); пшеница, рапс, салат (Larue et al., 2012, 2014); арабидопсис (Kurepa et al., 2010); огурец (Servin et al., 2013); томат (Antisari et al., 2015); лук (Pakrashi et al., 2014).
- Zn и  $\text{ZnO}$  – арабидопсис (Landa et al., 2012); соевые бобы (Lopez-Moreno et al., 2010); редис, рапс, салат, кукуруза, капуста (Pokrel and Dubey, 2013); огурец (Lin и Xing, 2007); пшеница (Dimkpa et al., 2013); кресс-салат (Josko and Oleszczuk, 2013); лук (Kumari et al., 2011); чеснок (Shaymurat et al., 2012).
- Магнитные НЧ с углеродным покрытием – горох, подсолнечник, томат, пшеница (Cifuentes et al., 2010).
- $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – тыква (Zhu et al., 2008.); соя (Ghafariyan et al., 2013.); томат (Antisari et al., 2015).
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ , или Al – лук, кресс-салат (Asztemborska et al., 2015); кукуруза (Lin and Xing, 2007).

Накопление НЧ в растениях еще полностью не изучено, однако проявляется несколько тенденций (Deng et al., 2014). Поглощение НЧ растениями является видоспецифичным и зависит от их состава и размера: например, табак поглощает НЧ золота, а пшеница – нет (Judy et al., 2012). Следует подчеркнуть, что будущие исследования могут показать другую картину поглощения НЧ, поскольку разные исследователи используют НЧ с различными размерами, поверхностным зарядом и функционализацией, кристалличностью и т.д.

Поглощение и токсичность НЧ в растениях зависят от их состава. Например, воздействие на растения томатов НЧ различного состава ( $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{SnO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , Ag, Co и Ni) по-разному влияет на рост корней, место накопления и урожайность плодов (Antisari et al., 2015). Более длинные корни формируются при воздействии НЧ оксида железа, а противоположный эффект достигается при использовании оксида олова. В то время как большинство НЧ металлов накапливается в корнях, НЧ серебра и кобальта были обнаружены в подземных и надземных органах растений. Плоды томатов содержали большее количество НЧ серебра по сравнению с НЧ другого состава (Antisari et al., 2015).

Поглощение НЧ растениями зависит от условий воздействия, физико-химических свойств НЧ и видов растений. Поглощение и перемещение НЧ внутри растений может быть весьма быстрым. Так, время перемещения от корней к побегам покрытых углеродом магнитных НЧ у подсолнечника, томатов, гороха и пшеницы составляет менее 24 ч (Cifuentes et al., 2010).

НЧ с одинаковым составом, но с разной кристаллической структурой могут по-разному поглощаться и перемещаться по растению. Например, НЧ диоксида титана в анатазной и рутильной кристаллических формах по-разному транспортируются в растениях огурца (Servin et al., 2012); НЧ анатаза оставались в основном в корнях, а НЧ рутила перемещались и накапливались преимущественно в надземной части огурца.

Взаимодействие растений и НЧ может варьировать от незначительных до заметных изменений в морфологии, физиологии, биохимии и генетике растений (Deng et al., 2014). Изменения морфологии растений, которые вызывают НЧ, включают в себя индекс прорастания (время и скорость прорастания), удлинение корней, рост биомассы побегов и корней, морфологию кончиков корней и т.д. (Deng et al., 2014).

Ряд исследований выявил негативное воздействие НЧ на многие физиологические процессы некоторых видов растений, в то время как меньшинство пытается продвигать использование НЧ для избранных полезных эффектов на некоторых растениях. Важно отметить: в то время как некоторые растения будут демонстрировать положительный эффект в результате воздействия НЧ того или иного типа, на другие растения те же самые НЧ будут оказывать негативное влияние.

Многие типы НЧ являются фитотоксичными, подавляют рост растений, влияют на физиологические, биохимические и генетические признаки (Brar et al., 2010; Deng et al., 2014; Tripathi et al., 2017). В таблице 1 приведены примеры культурных растений, подвергшихся неблагоприятному воздействию НЧ.

Таблица 1

### Фитотоксичность НЧ различной химической природы в отношении сельскохозяйственных культур

| Культура                                                    | Вид наночастиц |    |     |                  |                  |     |     |                                |
|-------------------------------------------------------------|----------------|----|-----|------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|
|                                                             | Au             | Ag | C60 | TiO <sub>2</sub> | CeO <sub>2</sub> | ZnO | CuO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Люцерна посевная ( <i>Medicago sativa</i> L.)               |                |    |     | +                | +                | +   | +   |                                |
| Резуховидка Таля ( <i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.) | +              | +  |     | +                | +                |     | +   | +                              |
| Ячмень обыкновенный ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)            | +              | +  |     |                  | +                |     | +   | +                              |
| Кукуруза сахарная ( <i>Zea mays</i> L.)                     |                | +  | +   | +                | +                | +   | +   |                                |
| Кресс-салат ( <i>Lepidium sativum</i> L.)                   |                |    |     | +                |                  | +   |     | +                              |
| Огурец обыкновенный ( <i>Cucumis sativus</i> L.)            |                | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Салат латук ( <i>Lactuca sativa</i> L.)                     |                | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Лук репчатый ( <i>Allium cepa</i> L.)                       |                | +  | +   | +                |                  | +   | +   |                                |
| Редька полевая ( <i>Raphanus raphanistrum</i> L.)           |                | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Амарант трехцветный ( <i>Amaranthus tricolor</i> L.)        |                |    |     |                  |                  |     | +   | +                              |
| Рис посевной ( <i>Oryza sativa</i> L.)                      | +              | +  | +   | +                | +                | +   | +   |                                |
| Соя культурная ( <i>Glycine max</i> (L.) Merr.)             | +              |    | +   |                  | +                | +   | +   | +                              |
| Томат обыкновенный ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.)        | +              | +  |     | +                | +                | +   |     | +                              |
| Пшеница мягкая ( <i>Triticum aestivum</i> L.)               |                | +  |     |                  | +                | +   | +   | +                              |

**Примечание.** «+» – неблагоприятное воздействие, выявленное на уровне ингибирования ростовых процессов, физиологических и биохимических показателей или токсичности на генетическом уровне.

Table 1

**Phytotoxicity of NPs of different chemical nature against crops**

| Crop                                                    | Nanoparticle type |    |     |                  |                  |     |     |                                |
|---------------------------------------------------------|-------------------|----|-----|------------------|------------------|-----|-----|--------------------------------|
|                                                         | Au                | Ag | C60 | TiO <sub>2</sub> | CeO <sub>2</sub> | ZnO | CuO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Purple alfalfa ( <i>Medicago sativa</i> L.)             |                   |    |     | +                | +                | +   | +   |                                |
| Mustard weed ( <i>Arabidopsis thaliana</i> (L.) Heynh.) | +                 | +  |     | +                | +                |     | +   | +                              |
| Common barley ( <i>Hordeum vulgare</i> L.)              | +                 | +  |     |                  | +                |     | +   | +                              |
| Sugar corn ( <i>Zea mays</i> L.)                        |                   | +  | +   | +                | +                | +   | +   |                                |
| garden-cress pepperweed ( <i>Lepidium sativum</i> L.)   |                   |    |     | +                |                  | +   |     | +                              |
| Ridge cucumber ( <i>Cucumis sativus</i> L.)             |                   | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Lettuce ( <i>Lactuca sativa</i> L.)                     |                   | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Bulb onion ( <i>Allium cepa</i> L.)                     |                   | +  | +   | +                |                  | +   | +   |                                |
| Wild radish ( <i>Raphanus raphanistrum</i> L.)          |                   | +  |     | +                | +                | +   | +   | +                              |
| Tricolour amaranth ( <i>Amaranthus tricolor</i> L.)     |                   |    |     |                  |                  |     | +   | +                              |
| Rice ( <i>Oryza sativa</i> L.)                          | +                 | +  | +   | +                | +                | +   | +   |                                |
| Soya bean ( <i>Glycine max</i> (L.) Merr.)              | +                 |    | +   |                  | +                | +   | +   | +                              |
| Apple of love ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.)         | +                 | +  |     | +                | +                | +   |     | +                              |
| Soft wheat ( <i>Triticum aestivum</i> L.)               |                   | +  |     |                  | +                | +   | +   | +                              |

“+” – adverse effects identified at the level of inhibition of growth processes, physiological and biochemical parameters or toxicity at the genetic level.

НЧ благородных металлов – таких, как золото (табл. 2), вызывают некроз растений табака (Sabo-Attwood et al., 2012). Воздействие НЧ Ag приводит к замедлению прорастания риса и кукурузы (Pokhrel and Dubey, 2013; Thuesombat et al., 2014) и снижению митотического индекса и фрагментации хромосом лука (Kumari et al., 2009). НЧ на основе углерода (углеродные нанотрубки, C60) демонстрируют цитотоксичность у риса, шпината и лука (Chen et al., 2010; Shen et al., 2010; Begum and Fugetsu, 2012), снижают биомассу растений кабачков (Stampoulis et al., 2009) и задерживают цветение вместе со снижением урожайности у риса (Lin et al., 2009). Воздействие наночастиц TiO<sub>2</sub> приводит к повреждению хлоропластов и снижению скорости фотосинтеза у шпината (Lei et al., 2008), ингибирует рост листьев и вызывает повреждение ДНК кукурузы (Asli and Neumann, 2009; Castiglione et al., 2011). Наночастицы CeO<sub>2</sub> отрицательно влияют на питание и генетический аппарат сои, огурцов, риса и пшеницы (Lopez-Moreno et al., 2010; Hong et al., 2014; Rico et al., 2013, 2014; Zhao et al., 2014). ZnO является генотоксичным для лука, чеснока и гречихи (Kumari et al., 2011; Shaymurat et al., 2012; Lee et al., 2013), влияет на формирование семян у сои (Yoon et al., 2014), подавляет рост растений кукурузы, сои, риса и капусты (Lin and Xing, 2007; Lopez-Moreno et al., 2010; Boonyanitipong et al., 2011; Xiang et al., 2015) и влияет на содержание хлорофилла у гороха (Mukherjee et al., 2014). CuO генотоксичен для редьки и гречихи (Atha et al., 2012; Lee et al., 2013), вызывает оксидативный стресс у риса (Shaw and Hossain, 2013) и сильно уменьшает длину корней (на 77%) и биомассу надземной части (на 90%) кабачков (Stampoulis et al., 2009). НЧ никеля вызывают оксидативный стресс и повреждение митохондрий в клетках томата (Faisal et al., 2013).

Таблица 2

**Механизмы антимикробного действия НЧ различной химической природы**

| Типы НЧ        | Механизм антимикробного действия                                                                                                     |
|----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Золото         | Сильное электростатическое притяжение; накапливаются на клеточной поверхности, взаимодействуют с клеточной мембраной и разрушают ее. |
| Серебро        | Разрушают клеточную мембрану, повреждают ДНК, нарушают транспортировку электронов.                                                   |
| Оксид цинка    | Разрушают клеточную мембрану, накапливаются внутри клетки и способствуют образованию токсичного $H_2O_2$ .                           |
| Диоксид титана | Повреждают клеточную мембрану и высвобождают активные формы кислорода.                                                               |

Table 2

**Mechanisms of antimicrobial action of NPs of different chemical nature**

| NP types         | Mechanism of antimicrobial action                                                                                        |
|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Gold             | NPs have strong electrostatic attraction, accumulate on the cell surface, interact with the cell membrane and disrupt it |
| Silver           | NPs disrupt the cell membrane, damage DNA, disrupt electron movement                                                     |
| Zinc oxide       | NPs disrupt the cell membrane, accumulate inside the cell and contribute to the formation of toxic $H_2O_2$              |
| Titanium dioxide | NPs damage the cell membrane and release reactive oxygen species                                                         |

Тип НЧ иногда может оказывать как полезное, так и вредное воздействие на одно и то же растение. Например, воздействие НЧ  $SeO_2$  (500 мг/кг) на ячмень привело к увеличению биомассы побегов более чем на 300%, однако растения не образовывали зерновки (Rico et al., 2015).

**Воздействие наночастиц на клетки грибов.** Несколько факторов влияют на фунгицидную активность наноматериалов: размер, форму, состав, способность к агрегации и особенности поверхности НЧ (Koduru et al., 2018; Kasana et al., 2017). Например, у мелких НЧ высоким является отношение площади поверхности к объему, что может способствовать более высокой фунгицидной активности (Rai et al., 2018). Зачастую такие показатели, как размер и форма наноматериалов, напрямую связаны с методом их синтеза (физико-химический, или «зеленый») и могут сильно варьировать в зависимости от выбранного протокола (Srikar et al., 2016; Geoprincy et al., 2013). Также выявлено, что метод синтеза может оказывать значительное влияние на фунгицидную активность, поскольку предшественники металлов, поверхностно-активные вещества, «метаболическая шуба» остаются в следовых количествах после завершения синтеза и могут оказывать влияние на геометрию поверхности, то есть остатки синтеза могут изменять химию поверхности НЧ и, следовательно, влиять на их активность (Alghuthaymi et al., 2015). Наконец, еще одним важным фактором являются виды фитопатогенных грибов, поскольку каждый вид имеет свои морфологические особенности.

Das и соавт. в 2009 г. провели исследование по оценке воздействия НЧ золота на *Saccharomyces cerevisiae* и *Candida albicans*. Эксперименты позволили выявить механизм действия НЧ золота на клетки грибов. Анализ СЭМ подтвердил разрыв клеточной стенки после воздействия НЧ (Das et al., 2009). Взаимодействие НЧ на основе меди приводит к образованию активных форм кислорода (АФК) и вызывает разрушение ДНК (Chen et al., 2006; Oberdörster, 2000; Heinlaan et al., 2008). Shah и соавт. (2010 г.) сообщили о снижении количества ферментов, разлагающих лигноцеллюлозу. Кроме того, взаимодействие с НЧ вызывает повреждения в митохондриях и нарушения в структуре белков (Shah et al., 2010) (рис. 2).

**Воздействие наночастиц на клетки бактерий.** Всплеск использования НЧ в медицинской сфере стал причиной масштабных исследований их антибактериальных свойств и молекулярных механизмов взаимодействия НЧ и клеток бактерий (Huh et al., 2011). Металлические НЧ сильно изменяют метаболическую активность бактерий, о чем свидетельствуют Chatzimitakos и Stalikas (2016), что позволяет активно использовать их в терапии бактериальных заболеваний. Кроме того, Ag в наноформе может проникать в биопленки микроорганизмов и предотвращать их формирование, подавляя экспрессию генов микроорганизмов (Zhao et al., 2015).

Малые размеры НЧ являются полезными для антимикробного действия и борьбы с внутриклеточными бактериями (Zhao et al., 2015). Мелкие НЧ серебра (5, 9, 10, 12 и 13,5 нм), золота (8,4 нм), оксида цинка (12 нм) и оксида титана (12 и 17 нм) обладают высокой антимикробной активностью (Slavin et al., 2017). Поскольку эти частицы действуют только при контакте с клеточными стенками бактерий, были изучены различные средства содействия НЧ-бактериальному контакту – такие, как электростатическое притяжение (Li et al., 2015), силы Ван-дер-Ваальса (Armentano et al., 2014), взаимодействия рецептор-лиганд (Gao et al., 2014) и гидрофобные взаимодействия (Luan et al., 2016).

После контакта НЧ могут проникать через мембраны микробных клеток, вмешиваться в метаболические пути и вызывать изменения формы и функции мембран органелл (рис. 3). Оказавшись внутри клеток, НЧ взаимодействуют с клеточными метаболическими путями, ингибируя ферменты, дезактивируя белки, индуцируя окислительный стресс и водно-электролитный дисбаланс, а также изменяя уровни экспрессии генов (Xu et al., 2016). В этой части статьи нами выделены некоторые из наиболее важных антибактериальных механизмов НЧ.

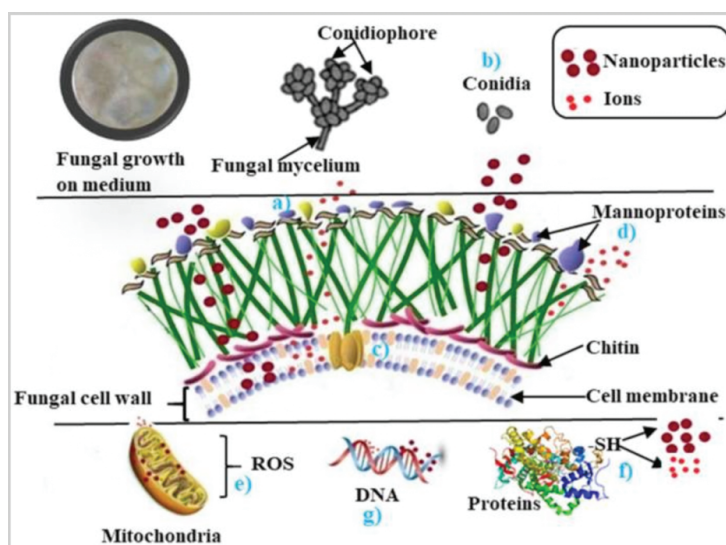


Рис. 2. Механизм повреждений клеточных органелл, вызванных НЧ у клеток грибов (Cruz-Luna et al., 2021)

Fig. 2. Mechanism of cell organelle damage induced by NPs in fungal cells (Cruz-Luna et al., 2021)

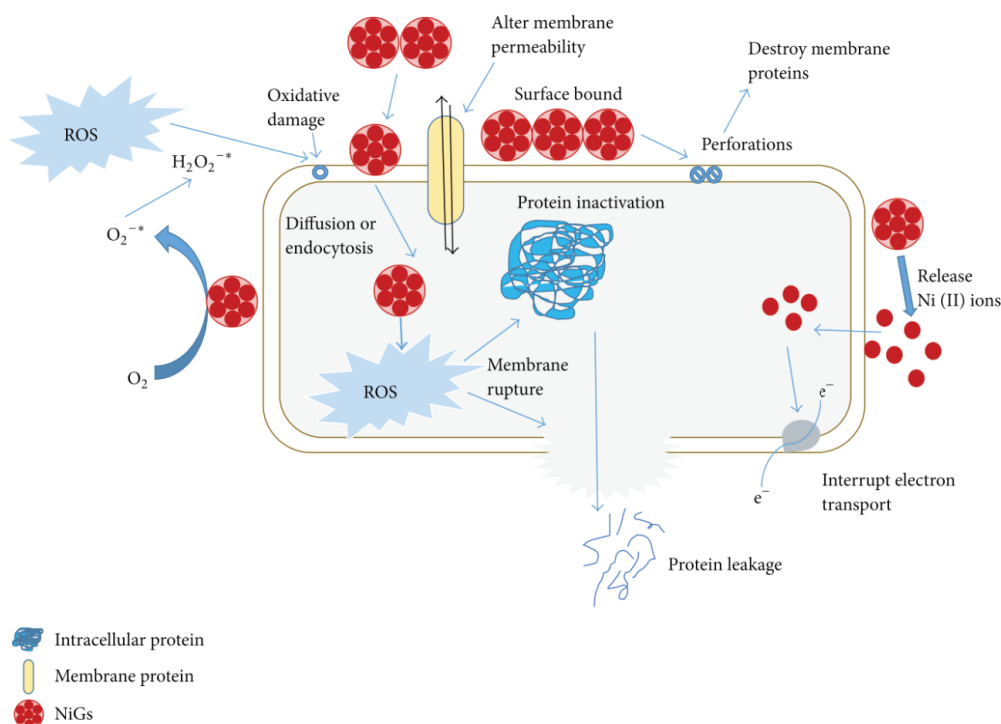


Рис. 3. Механизм антимикробной активности НЧ на примере НЧ никеля

Fig. 3. Mechanism of antimicrobial activity of NPs on the example of nickel NPs

**Окислительный стресс.** Реактивный кислородный окислительный стресс, вызванный активными видами кислорода, является жизненно важным аспектом действия НЧ против бактерий. Четыре типа АФК: супероксидный радикал ( $O_2^-$ ), гидроксильный радикал ( $\cdot OH$ ), перекись водорода ( $H_2O_2$ ) и синглетный кислород ( $O_2$ ).  $O_2^-$  и  $H_2O_2$  – являются краткосрочными стрессовыми реакциями и могут быть уменьшены эндогенными антиоксидантами – такими, как супероксид и каталазы. Синглетный кислород ( $O_2$ ) составляет большую часть физиологического повреждения, вызванного АФК (Symonds et al., 2008). В нормальных условиях сохраняется равновесие между генерацией и клиренсом АФК в бактериальных клетках, но когда производство АФК является чрезмерным, внутриклеточная окислительно-восстановительная степень изменяется и поддерживает окисление (Peng et al., 2013).

Окислительный стресс является ключевым фактором изменения проницаемости бактериальной мембраны и, таким образом, может повредить клеточные мембраны (Cheloni et al., 2016). Ионы наносеребра активируют кислород и производят реактивные ионы кислорода и гидроксильные радикалы, которые могут препятствовать бактериальной пролиферации или уничтожить бактериальные клетки (Yang et al., 2009). Аналогичным образом НЧ  $Al_2O_3$  могут пересекать, взаимодействовать и в итоге разрушать бактериальные мембраны, вызывая окислительный стресс в бактериальных клетках (Ansari et al., 2015).

**Растворенные ионы металлов.** Ионы металлов постепенно высвобождаются из оксидов металлов в водной среде и впоследствии поглощаются через клеточные мембраны, что в свою очередь приводит к прямому взаимодействию с функциональными группами белков и нуклеиновых кислот: например, меркапто ( $-SH$ ), амино ( $-NH$ ) и карбокси ( $-COOH$ ). Эти взаимодействия имеют широкий спектр эффектов, которые включают в себя структурные изменения клеток и аномальную ферментную активность, что нарушает нормальные физиологические процессы (Castellano et al., 2007). Было отмечено, что нанослои палладия (размером от 0,4 до 22,4 нм) и нанопровода серебра (20 нм), полученные на полиэтиленнафталате, оказывают антибактериальное действие, которое связано с высвобождением ионов палладия и серебра в раствор (Polivkova et al., 2015, 2017). И наоборот, когда суспензии оксида металлов были добавлены в бактериальные культуры, наблюдали только слабую антибактериальную активность. Это говорит о том, что растворение ионов металлов не отвечает за антибактериальные эффекты НЧ оксида металлов (Zhang et al., 2010).

**Неокислительные механизмы.** Для оценки антимикробной активности НЧ MgO использовали такие методы, как электронно-спин-резонансная спектроскопия, жидкостная хроматография-масс-спектрометрия, инфракрасный анализ преобразования Фурье, инструменты протеомики и просвечивающая электронная микроскопия. При ультрафиолетовом и естественном освещении три типа НЧ MgO обладали антибактериальной активностью в отношении *Escherichia coli*. Однако эти антимикробные действия НЧ не связаны с окислением мембранных липидов ввиду окислительного стресса, потому что:

1. когда ломаются клеточные мембраны, появляются поверхностные поры, НЧ MgO не встречаются в клетках, и спектроскопически не обнаруживается внутриклеточный избыток ионов магния. Эти наблюдения показывают, что НЧ MgO повреждают клеточные мембраны, что возможно по причине фиксации НЧ на мембране, эффектов изменений pH и высвобождения ионов магния;
2. присутствует только небольшое количество внутриклеточных АФК;
3. обработка НЧ MgO существенно не изменяет уровни АФК.

Кроме того, уровни внутриклеточных белков, связанных с АФК, не меняются, но заметно снижается активность ряда метаболических процессов – в частности, синтеза аминокислот, углеводов и нуклеотидов (Leung et al., 2014).

## Выводы

Нanomатериалы, обладая уникальными физико-химическими свойствами, оказывают сильное воздействие на растительные и животные организмы. Проникая из почвы и воздушной среды по симпластическому или апопластическому пути в организм растения, НЧ проявляют в растительных клетках свойства АФК: разрушают мембраны органелл, нарушают пути метаболизма. Это вызывает у растений окислительный стресс и запускает программы ферментативной и неферментативной защиты, что может приводить к увеличению урожайности и показателей роста растений. В свою очередь, особенности таких систем являются видоспецифичными: у одних видов НЧ похожей морфологии и размерности могут вызывать увеличение урожайности, а у других – приводить к угнетению всех биосинтетических процессов. У клеток микроорганизмов НЧ разрушают клеточную мембрану, мембраны органелл, нарушают последовательности нуклеотидов в ДНК, разрушают ферменты и, таким образом, приводят к физическому разрушению клетки. Этот механизм действия лежит в основе фунгицидной и антибактериальной активности наноматериалов.

## Список источников

## References

1. Ahmad A., Hashmi S.S., Palma José.M., Corpas F.J. Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology // *Chemosphere*. – 2022. – V. 290. – P. 133329. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133329.
2. Alghuthaymi M.A., Kalia A., Bhardwaj K., Bhardwaj P., Abd-Elsalam K.A., Valis M., Kuca K. Nanohybrid antifungals for control of plant diseases: Current status and future perspectives. *J. Fungi*. – 2021. – Vol. 7. – e48. doi: 10.3390/jof7010048.
3. Ansari M.A., Khan H.M., Alzohairy M.A. et al. Green synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and their bactericidal potential against clinical isolates of multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *World J. Microbiol. Biotechnol.* – 2015. – Vol. 31. – Pp. 153-164. doi: 10.1007/s11274-014-1757-2.
4. Antisari L.V., Carbone S., Gatti A. et al. Uptake and translocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res.* – 2015. – Vol. 22. – Pp. 1841-1853. doi: 10.1007/s11356-014-3509-0.
5. Armentano I., Arciola C.R., Fortunati E. et al. The interaction of bacteria with engineered nanostructured polymeric materials: A review. *Sci. World J.* – 2014. – Vol. 2014. – e410423. doi: 10.1155/2014/410423.
6. Arruda S.C.C., Silva A.L.D., Galazzi R.M. et al. Nanoparticles applied to plant science: a review. *Talanta*. – 2015. – Vol. 131. – Pp. 693-705. doi: 10.1016/j.talanta.2014.08.050.
7. Asli S., Neumann P.M. Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant Cell Environ.* – 2009. – Vol. 32. – Pp. 577-584. doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.01952.x.
8. Asztemborska M., Steborowski R., Kowalska J. et al. Accumulation of aluminium by plants exposed to nano- and micro-sized particles of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Environ Res.* – 2015. – Vol. 9. – Pp. 109-116.
9. Atha D.H., Wang H.H., Petersen E.J. et al. Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environ Sci Technol.* – 2012. – Vol. 46. – Pp. 1819-1827. doi: 10.1021/es202660k.
10. Avellan A., Schwab F., Mason A. et al. Nanoparticle uptake in plants: gold nanomaterial localized in roots of *Arabidopsis thaliana* by X-ray computed nanotomography and hyperspectral imaging. *Environ Sci Technol.* – 2017. – Vol. 51. – Pp. 8682-8691. doi: 10.1021/acs.est.7b01133.
11. Bakshi S., He Z.L.L., Harris W.G. Natural nanoparticles: Implications for environment and human health. *Crit Rev Environ Sci Technol.* – 2015. – Vol. 45. – Pp. 861-904. doi: 10.1080/10643389.2014.921975.
12. Begum P., Fugetsu B. Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L.) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *Hazard Mater.* – 2012. – Vol. 243. – Pp. 212-222. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.025.
13. Bernhardt E.S., Colman B.P., Hochella M.F. et al. An ecological perspective on nanomaterial impacts in the environment. *Environ Qual.* – 2010. – Vol. 39. – Pp. 1954-1965. doi: 10.2134/jeq2009.0479.
14. Boonyanitipong P., Kositsup B., Kumar P. et al. Toxicity of ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on germinating rice
1. Ahmad A., Hashmi S.S., Palma José.M., Corpas F.J. Influence of metallic, metallic oxide, and organic nanoparticles on plant physiology. *Chemosphere*. 2022; 290: 133329. doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.133329.
2. Alghuthaymi M.A.; Kalia A.; Bhardwaj K.; Bhardwaj P.; Abd-Elsalam K.A.; Valis M.; Kuca K. Nanohybrid antifungals for control of plant diseases: Current status and future perspectives. *J. Fungi*. 2021; 7; e48. doi: 10.3390/jof7010048.
3. Ansari M.A., Khan H.M., Alzohairy M.A. et al. Green synthesis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles and their bactericidal potential against clinical isolates of multi-drug resistant *Pseudomonas aeruginosa*. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2015; 31:153-164. doi: 10.1007/s11274-014-1757-2.
4. Antisari L.V., Carbone S., Gatti A. et al. Uptake and translocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO<sub>2</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, SnO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res.* 2015; 22: 1841-1853. doi: 10.1007/s11356-014-3509-0.
5. Armentano I., Arciola C.R., Fortunati E. et al. The interaction of bacteria with engineered nanostructured polymeric materials: A review. *Sci. World J.* 2014; 2014; e410423. doi: 10.1155/2014/410423.
6. Arruda S.C.C., Silva A.L.D., Galazzi R.M. et al. Nanoparticles applied to plant science: a review. *Talanta*. 2015; 131: 693-705. doi: 10.1016/j.talanta.2014.08.050.
7. Asli S., Neumann P.M. Colloidal suspensions of clay or titanium dioxide nanoparticles can inhibit leaf growth and transpiration via physical effects on root water transport. *Plant Cell Environ.* 2009; 32: 577-584. doi: 10.1111/j.1365-3040.2009.01952.x.
8. Asztemborska M., Steborowski R., Kowalska J. et al. Accumulation of aluminium by plants exposed to nano- and micro-sized particles of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. *Environ Res.* 2015; 9: 109-116.
9. Atha D.H., Wang H.H., Petersen E.J. et al. Copper oxide nanoparticle mediated DNA damage in terrestrial plant models. *Environ Sci Technol.* 2012; 46: 1819-1827. doi: 10.1021/es202660k.
10. Avellan A., Schwab F., Mason A. et al. Nanoparticle uptake in plants: gold nanomaterial localized in roots of *Arabidopsis thaliana* by X-ray computed nanotomography and hyperspectral imaging. *Environ Sci Technol.* 2017; 51: 8682-8691. doi: 10.1021/acs.est.7b01133.
11. Bakshi S., He Z.L.L., Harris W.G. Natural nanoparticles: Implications for environment and human health. *Crit Rev Environ Sci Technol.* 2015; 45: 861-904. doi: 10.1080/10643389.2014.921975.
12. Begum P., Fugetsu B. Phytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes on red spinach (*Amaranthus tricolor* L.) and the role of ascorbic acid as an antioxidant. *Hazard Mater.* 2012; 243: 212-222. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.025.
13. Bernhardt E.S., Colman B.P., Hochella M.F. et al. An ecological perspective on nanomaterial impacts in the environment. *Environ Qual.* 2010; 39: 1954-1965. doi: 10.2134/jeq2009.0479.
14. Boonyanitipong P., Kositsup B., Kumar P. et al. Toxicity of ZnO and TiO<sub>2</sub> nanoparticles on germinating

- seed *Oryza sativa* L. *Biosci Biochem Bioinform.* – 2011. – Vol. 1 (4). – Pp. 282-285. doi: 10.7763/IJBBB.2011.V1.53.
15. Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D. et al. Engineered nanoparticles in wastewater and wastewater sludge – evidence and impacts. *Waste Manage.* – 2010. – Vol. 30. – Pp. 504-520. doi: 10.1016/j.wasman.2009.10.012.
16. Castellano J.J., Shafii S.M., Ko F. et al. Comparative evaluation of silver-containing antimicrobial dressings and drugs. *Int. Wound J.* – 2007. – Vol. 4. – Pp. 114-122. doi: 10.1111/j.1742-481X.2007.00316.x.
17. Castiglione M.R., Giorgetti L., Geri C. et al. The effects of nano-TiO<sub>2</sub> on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *Nanopart Res.* – 2011. – Vol. 13. – Pp. 2443-2449. doi: 10.1007/s11051-010-0135-8.
18. Chatzimitakos T.G., Stalikas C.D. Qualitative alterations of bacterial metabolome after exposure to metal nanoparticles with bactericidal properties: A comprehensive workflow based on <sup>1</sup>H NMR, UHPLC-HRMS, and metabolic databases. *J. Proteome Res.* – 2016. – Vol. 15. – Pp. 3322-3330. doi: 10.1021/acs.jproteome.6b00489.
19. Cheloni G., Marti E., Slaveykova V.I. Interactive effects of copper oxide nanoparticles and light to green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Aquat. Toxicol.* – 2016. – Vol. 170. – Pp. 120-128. doi: 10.1016/j.aquatox.2015.11.018.
20. Chen R., Ratnikova T.A., Stone M.B. et al. Differential uptake of carbon nanoparticles by plant and mammalian cells. – *Small.* – 2010. – Vol. 6. – Pp. 612-617. doi: 10.1002/smll.200901911.
21. Chichiricco G., Poma A. Penetration and toxicity of nanomaterials in higher plants. *Nanomaterials.* – 2015. – Vol. 5. – Pp. 851-873. doi: 10.3390/nano5020851.
22. Cifuentes Z., Custardoy L., de la Fuente J.M. et al. Absorption and translocation to the aerial part of magnetic carbon-coated nanoparticles through the root of different crop plants. *Nanobiotechnol.* – 2010. – Vol. 8 (26). doi: 10.1186/1477-3155-8-26.
23. Cruz-Luna A.R., Cruz-Martínez H., Vásquez-López A. et al. Metal Nanoparticles as Novel Antifungal Agents for Sustainable Agriculture: Current Advances and Future Directions. *J Fungi (Basel).* – 2021. – Vol. 7 (12). – e1033. doi: 10.3390/jof7121033.
24. Dan Y.B., Zhang W.L., Xue R.M. et al. Characterization of gold nanoparticle uptake by tomato plants using enzymatic extraction followed by single-particle inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis. *Environ Sci Technol.* – 2015. – Vol. 49. – Pp. 3007-3014. doi: 10.1021/es506179e.
25. Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloids Surf. B Biointerfaces.* – 2010. – Vol. 79 (5). – Pp. 5-18. doi: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
26. Deng Y.Q., White J.C., Xing B.S. Interactions between engineered nanomaterials and agricultural crops: implications for food safety. *Zhejiang Univ Sci A.* – 2014. – Vol. 15. – Pp. 552-572. doi: 10.1631/jzus.A1400165.
27. Dimkpa C.O., McLean J.E., Martineau N. et al. Silver nanoparticles disrupt wheat (*Triticum aestivum* L.) growth in a sand matrix. *Environ Sci Technol.* – 2013. – Vol. 47. – Pp. 1082-1090. doi: 10.1021/es302973y.
28. Faisal M., Saquib Q., Alatar A.A. et al. Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: a study rice seed *Oryza sativa* L. *Biosci Biochem Bioinform.* 2011; 1(4): 282-285. doi: 10.7763/IJBBB.2011.V1.53.
15. Brar S.K., Verma M., Tyagi R.D. et al. Engineered nanoparticles in wastewater and wastewater sludge – evidence and impacts. *Waste Manage.* 2010; 30: 504-520. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.10.012
16. Castellano J.J., Shafii S.M., Ko F. et al. Comparative evaluation of silver-containing antimicrobial dressings and drugs. *Int. Wound J.* 2007; 4: 114-122. doi: 10.1111/j.1742-481X.2007.00316.x.
17. Castiglione M.R., Giorgetti L., Geri C. et al. The effects of nano-TiO<sub>2</sub> on seed germination, development and mitosis of root tip cells of *Vicia narbonensis* L. and *Zea mays* L. *Nanopart Res.* 2011; 13: 2443-2449. doi: 10.1007/s11051-010-0135-8.
18. Chatzimitakos T.G., Stalikas C.D. Qualitative alterations of bacterial metabolome after exposure to metal nanoparticles with bactericidal properties: A comprehensive workflow based on <sup>1</sup>H NMR, UHPLC-HRMS, and metabolic databases. *J. Proteome Res.* 2016; 15: 3322-3330. DOI: 10.1021/acs.jproteome.6b00489.
19. Cheloni G., Marti E., Slaveykova V.I. Interactive effects of copper oxide nanoparticles and light to green alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Aquat. Toxicol.* 2016; 170: 120-128. doi: 10.1016/j.aquatox.2015.11.018.
20. Chen R., Ratnikova T.A., Stone M.B. et al. Differential uptake of carbon nanoparticles by plant and mammalian cells. *Small.* 2010; 6: 612-617. doi: 10.1002/smll.200901911.
21. Chichiricco G., Poma A. Penetration and toxicity of nanomaterials in higher plants. *Nanomaterials.* 2015; 5: 851-873. doi: 10.3390/nano5020851.
22. Cifuentes Z., Custardoy L., de la Fuente J.M. et al. Absorption and translocation to the aerial part of magnetic carbon-coated nanoparticles through the root of different crop plants. *Nanobiotechnol.* 2010; 8 (26). doi: 10.1186/1477-3155-8-26.
23. Cruz-Luna A.R., Cruz-Martínez H., Vásquez-López A. et al. Metal Nanoparticles as Novel Antifungal Agents for Sustainable Agriculture: Current Advances and Future Directions. *J Fungi (Basel).* 2021; 7(12); e1033. doi: 10.3390/jof7121033.
24. Dan Y.B., Zhang W.L., Xue R.M. et al. Characterization of gold nanoparticle uptake by tomato plants using enzymatic extraction followed by single-particle inductively coupled plasma-mass spectrometry analysis. *Environ Sci Technol.* 2015; 49: 3007-3014. doi: 10.1021/es506179e.
25. Dastjerdi R., Montazer M. A review on the application of inorganic nano-structured materials in the modification of textiles: Focus on anti-microbial properties. *Colloids Surf. B Biointerfaces.* 2010; 79(5): 5-18. doi: 10.1016/j.colsurfb.2010.03.029.
26. Deng Y.Q., White J.C., Xing B.S. Interactions between engineered nanomaterials and agricultural crops: implications for food safety. *Zhejiang Univ Sci A.* 2014; 15: 552-572. doi: 10.1631/jzus.A1400165.
27. Dimkpa C.O., McLean J.E., Martineau N. et al. Silver nanoparticles disrupt wheat (*Triticum aestivum* L.) growth in a sand matrix. *Environ Sci Technol.* 2013; 47: 1082-1090. DOI: 10.1021/es302973y.
28. Faisal M., Saquib Q., Alatar A.A. et al. Phytotoxic hazards of NiO-nanoparticles in tomato: a study

- on mechanism of cell death. *Hazard Mater.* – 2013. – Vol. 250. – Pp. 318-332. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.063.
29. Feichtmeier N.S., Walther P., Leopold K. Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res.* – 2015. – Vol. 22. – Pp. 8549-8558. doi: 10.1007/s11356-014-4015-0.
30. Gao W., Thamphiwatana S., Angsantikul P. et al. Nanoparticle approaches against bacterial infections. *Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol.* – 2014. – Vol. 6 – Pp. 532-547. doi: 10.1590/S1516-89132013005000011.
31. Geisler-Lee J., Wang Q., Yao Y. et al. Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*. *Nanotoxicology.* – 2013. – Vol. 7. – Pp. 323-337. doi: 10.3109/17435390.2012.658094.
32. Geoprincy G., Srri B.V., Poonguzhali U., Gandhi N.N., Renganathan S.A. Review on green synthesis of silver nanoparticles. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* – 2013. – Vol. 6. – Pp. 8-12. doi: 10.1155/2015/682749.
33. Ghafariyan M.H., Malakouti M.J., Dadpour M.R. et al. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environ Sci Technol.* – 2013. – Vol. 47. – Pp. 10645-10652. doi: 10.1021/es402249b.
34. Hong J., Peralta-Videa J.R., Rico C. et al. Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO<sub>2</sub> nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environ Sci Technol.* – 2014. – Vol. 48. – Pp. 4376-4385. doi: 10.1021/es404931g.
35. Huh A.J., Kwon Y.J. «Nanoantibiotics»: A new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *J. Control. Release.* – 2011. Vol. 156. – Pp. 128-145. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.07.002.
36. Josko I., Oleszczuk P. Influence of soil type and environmental conditions on ZnO, TiO<sub>2</sub> and Ni nanoparticles phytotoxicity. *Chemosphere.* – 2013. – Vol. 92. – Pp. 91-99. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.02.048.
37. Judy J.D., Unrine J.M., Bertsch P.M. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain. *Environ Sci Technol.* – 2011. – Vol. 45. – Pp. 776-781. doi: 10.1021/es103031a.
38. Kasana R., Panwar N.R., Kaul R.K., Kumar P. Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants. *Environ. Chem. Lett.* – 2017. – Vol. 15. – Pp. 233-240. doi: 10.1007/s10311-017-0615-5.
39. Koduru J.R., Kailasa S.K., Bhamore J.R., Kim K. – H., Dutta T., Vellingiri K. Phytochemical-assisted synthetic approaches for silver nanoparticles antimicrobial applications: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.* – 2018. Vol. 256. – Pp. 326-339. doi: 10.1016/j.cis.2018.03.001.
40. Kumari M., Khan S.S., Pakrashi S. et al. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *J Hazard Mater.* – 2011. – Vol. 190 (1-3). – Pp. 613-621. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.03.095.
41. Kumari M., Mukherjee A., Chandrasekaran N. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Allium cepa*. *Sci Total Environ.* – 2009. – Vol. 407. – Pp. 5243-5246. doi: 10.1016/j.scitotenv.2009.06.024.
42. Kurepa J., Paunesku T., Vogt S. et al. Uptake and distribution of ultrasmall anatase TiO<sub>2</sub> Alizarin red S nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*. *Nano Lett.* – 2010. – Vol. 10. – Pp. 2296-2302. doi: 10.1021/nl903518f.
43. Landa P., Vankova R., Andrllova J. et al. Nanoparticle-specific changes in *Arabidopsis thaliana* gene on mechanism of cell death. *Hazard Mater.* 2013; 250: 318-332. doi: 10.1016/j.jhazmat.2013.01.063.
29. Feichtmeier N.S., Walther P., Leopold K. Uptake, effects, and regeneration of barley plants exposed to gold nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res.* 2015; 22: 8549-8558. doi: 10.1007/s11356-014-4015-0.
30. Gao W., Thamphiwatana S., Angsantikul P. et al. Nanoparticle approaches against bacterial infections. *Wiley Interdiscip. Rev. Nanomed. Nanobiotechnol.* 2014; 6: 532-547. doi: 10.1590/S1516-89132013005000011...
31. Geisler-Lee J., Wang Q., Yao Y. et al. Phytotoxicity, accumulation and transport of silver nanoparticles by *Arabidopsis thaliana*. *Nanotoxicology.* 2013; 7: 323-337. doi: 10.3109/17435390.2012.658094.
32. Geoprincy G.; Srri B.V.; Poonguzhali U.; Gandhi N.N.; Renganathan S.A. Review on green synthesis of silver nanoparticles. *Asian J. Pharm. Clin. Res.* 2013; 6: 8-12. doi: 10.1155/2015/682749.
33. Ghafariyan M.H., Malakouti M.J., Dadpour M.R. et al. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll. *Environ Sci Technol.* 2013; 47: 10645-10652. doi: 10.1021/es402249b.
34. Hong J., Peralta-Videa J.R., Rico C. et al. Evidence of translocation and physiological impacts of foliar applied CeO<sub>2</sub> nanoparticles on cucumber (*Cucumis sativus*) plants. *Environ Sci Technol.* 2014; 48: 4376-4385. doi: 10.1021/es404931g.
35. Huh A.J., Kwon Y.J. «Nanoantibiotics»: A new paradigm for treating infectious diseases using nanomaterials in the antibiotics resistant era. *J. Control. Release.* 2011; 156: 128-145. doi: 10.1016/j.jconrel.2011.07.002.
36. Josko I., Oleszczuk P. Influence of soil type and environmental conditions on ZnO, TiO<sub>2</sub> and Ni nanoparticles phytotoxicity. *Chemosphere.* 2013; 92: 91-99. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.02.048.
37. Judy J.D., Unrine J.M., Bertsch P.M. Evidence for biomagnification of gold nanoparticles within a terrestrial food chain. *Environ Sci Technol.* 2011; 45: 776-781. doi: 10.1021/es103031a.
38. Kasana R., Panwar N.R., Kaul R.K., Kumar P. Biosynthesis and effects of copper nanoparticles on plants. *Environ. Chem. Lett.* 2017; 15: 233-240. doi: 10.1007/s10311-017-0615-5.
39. Koduru J.R.; Kailasa S.K.; Bhamore J.R.; Kim K. – H.; Dutta T.; Vellingiri K. Phytochemical-assisted synthetic approaches for silver nanoparticles antimicrobial applications: A review. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2018; 256: 326-339. doi: 10.1016/j.cis.2018.03.001.
40. Kumari M., Khan S.S., Pakrashi S. et al. Cytogenetic and genotoxic effects of zinc oxide nanoparticles on root cells of *Allium cepa*. *J Hazard Mater.* 2011; 190(1-3): 613-621. doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.03.095.
41. Kumari M., Mukherjee A., Chandrasekaran N. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Allium cepa*. *Sci Total Environ.* 2009; 407: 5243-5246. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.06.024
42. Kurepa J., Paunesku T., Vogt S. et al. Uptake and distribution of ultrasmall anatase TiO<sub>2</sub> Alizarin red S nanoconjugates in *Arabidopsis thaliana*. *Nano Lett.* 2010; 10: 2296-2302. doi: 10.1021/nl903518f.
43. Landa P., Vankova R., Andrllova J. et al. Nanoparticle-specific changes in *Arabidopsis thaliana* gene

expression after exposure to ZnO, TiO<sub>2</sub>, and fullerene soot. *Hazard Mater.* – 2012. – Vol. 241. – Pp. 55-62. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.059.

44. *Larue C., Castillo-Michel H., Sobanska S., et al.* Fate of pristine TiO<sub>2</sub> nanoparticles and aged paint-containing TiO<sub>2</sub> nanoparticles in lettuce crop after foliar exposure. *J Hazard Mater.* – 2014. – Vol. 273. – Pp. 17-26. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.03.014.

45. *Larue C., Laurette J., Herlin-Boime N. et al.* Accumulation, translocation and impact of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in wheat (*Triticum aestivum* spp.): influence of diameter and crystal phase. *Sci Total Environ.* – 2012. – Vol. 431. – Pp. 197-208. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.073.

46. *Lee S., Chung H., Kim S. et al.* The genotoxic effect of ZnO and CuO nanoparticles on early growth of buckwheat, *Fagopyrum esculentum*. *Water Air Soil Pollut.* – 2013. – Vol. 224 (11). – e1668. doi: 10.1007/s11270-013-1668-0.

47. *Lee W.M., Kwak J.I., An Y.J.* Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: media effect on phytotoxicity. *Chemosphere.* – 2012. – Vol. 86. – Pp. 491-499. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.10.013.

48. *Lei Z., Su M.Y., Xiao W. et al.* Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biol Trace Elem Res.* – 2008. – Vol. 121. – Pp. 69-79. doi: 10.1007/s12011-007-8028-0.

49. *Leung Y.H., Ng A.M., Xu X. et al.* Mechanisms of antibacterial activity of MgO: Non-ROS mediated toxicity of MgO nanoparticles towards *Escherichia coli*. *Small.* 2014. – Vol. 10. – Pp. 1171-1183. doi: 10.1002/smll.201302434.

50. *Li H., Chen Q., Zhao J. et al.* Enhancing the antimicrobial activity of natural extraction using the synthetic ultrasmall metal nanoparticles. *Sci. Rep.* – 2015. – Vol. 5. – e11033. doi: 10.1038/srep11033.

51. *Li L., Sun T.D., Zhang X. et al.* A meta-analysis of cohort studies on cancer mortality among workers exposure to chrysotile fiber alone. *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi.* – 2004. – Vol. 38 (1). – Pp. 39-42.

52. *Li Q., Mahendra S., Lyon D.Y. et al.* Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Res.* – 2008. – Vol. 42. – Pp. 4591-4602. doi: 10.1016/j.watres.2008.08.015.

53. *Lin D.H., Xing B.S.* Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ Pollut.* – 2007. – Vol. 150. – Pp. 243-250. doi: 10.1016/j.envpol.2007.01.016.

54. *Lin S.J., Reppert J., Hu Q. et al.* Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small.* – 2009. – Vol. 5. – Pp. 1128-1132. doi: 10.1002/smll.200801556.

55. *Line C., Camille L.A., Flahaut E.* Carbon nanotubes: impacts and behaviour in the terrestrial ecosystem – a review // *Carbon.* – 2017. – Vol. 123. – Pp. 767-785. doi: 10.1016/j.carbon.2017.07.089.

56. *Lopez-Moreno M.L., de la Rosa G., Hernandez-Viezcas J.A. et al.* Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants // *Environmental science & technology.* – 2010. – Vol. 44 (19). – Pp. 7315-7320. doi: 10.1021/es903891g.

57. *Luan B., Huynh T., Zhou R.* Complete wetting of graphene by biological lipids. *Nanoscale.* – 2016. – Vol. 8. – Pp. 5750-5754. doi: 10.1039/C6NR00202A.

expression after exposure to ZnO, TiO<sub>2</sub>, and fullerene soot. *Hazard Mater.* 2012; 241: 55-62. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.08.059.

44. *Larue C., Castillo-Michel H., Sobanska S. et al.* Fate of pristine TiO<sub>2</sub> nanoparticles and aged paint-containing TiO<sub>2</sub> nanoparticles in lettuce crop after foliar exposure. *J Hazard Mater.* 2014; 273: 17-26. doi: 10.1016/j.jhazmat.2014.03.014.

45. *Larue C., Laurette J., Herlin-Boime N. et al.* Accumulation, translocation and impact of TiO<sub>2</sub> nanoparticles in wheat (*Triticum aestivum* spp.): influence of diameter and crystal phase. *Sci Total Environ.* 2012; 431: 197-208. doi: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.073.

46. *Lee S., Chung H., Kim S. et al.* The genotoxic effect of ZnO and CuO nanoparticles on early growth of buckwheat, *Fagopyrum esculentum*. *Water Air Soil Pollut.* 2013; 224(11); e1668. doi: 10.1007/s11270-013-1668-0.

47. *Lee W.M., Kwak J.I., An Y.J.* Effect of silver nanoparticles in crop plants *Phaseolus radiatus* and *Sorghum bicolor*: media effect on phytotoxicity. *Chemosphere.* 2012; 86: 491-499. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.10.013.

48. *Lei Z., Su M.Y., Xiao W. et al.* Antioxidant stress is promoted by nano-anatase in spinach chloroplasts under UV-B radiation. *Biol Trace Elem Res.* 2008; 121: 69-79. doi: 10.1007/s12011-007-8028-0.

49. *Leung Y.H., Ng A.M., Xu X. et al.* Mechanisms of antibacterial activity of MgO: Non-ROS mediated toxicity of MgO nanoparticles towards *Escherichia coli*. *Small.* 2014; 10: 1171-1183. DOI: 10.1002/smll.201302434

50. *Li H., Chen Q., Zhao J. et al.* Enhancing the antimicrobial activity of natural extraction using the synthetic ultrasmall metal nanoparticles. *Sci. Rep.* 2015; 5; e11033. doi: 10.1038/srep11033.

51. *Li L., Sun T.D., Zhang X. et al.* A meta-analysis of cohort studies on cancer mortality among workers exposure to chrysotile fiber alone. *Zhonghua Yu Fang Yi Xue Za Zhi.* 2004; 38(1): 39-42.

52. *Li Q., Mahendra S., Lyon D.Y. et al.* Antimicrobial nanomaterials for water disinfection and microbial control: Potential applications and implications. *Water Res.* 2008; 42: 4591-4602. doi: 10.1016/j.watres.2008.08.015.

53. *Lin D.H., Xing B.S.* Phytotoxicity of nanoparticles: inhibition of seed germination and root growth. *Environ Pollut.* 2007; 150: 243-250. DOI: 10.1016/j.envpol.2007.01.016.

54. *Lin S.J., Reppert J., Hu Q. et al.* Uptake, translocation, and transmission of carbon nanomaterials in rice plants. *Small.* 2009; 5: 1128-1132. doi: 10.1002/smll.200801556.

55. *Line C., Camille L.A., Flahaut E.* Carbon nanotubes: impacts and behaviour in the terrestrial ecosystem – a review. *Carbon.* 2017; 123: 767-785. doi: 10.1016/j.carbon.2017.07.089.

56. *Lopez-Moreno M.L., de la Rosa G., Hernandez-Viezcas J.A. et al.* Evidence of the differential biotransformation and genotoxicity of ZnO and CeO<sub>2</sub> Nanoparticles on soybean (*Glycine max*) plants. *Environmental science & technology.* 2010; 44(19): 7315-7320. doi: 10.1021/es903891g.

57. *Luan B., Huynh T., Zhou R.* Complete wetting of graphene by biological lipids. *Nanoscale.* 2016; 8: 5750-5754. doi: 10.1039/C6NR00202A.

58. Mahajan S., Kadam J., Dhawal P., Barve S., Kodkar S. Application of silver nanoparticles in in-vitro plant growth and metabolite production: revisiting its scope and feasibility // *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2022. V. 150. P. 15-39. doi: 10.1007/s11240-022-02249-w
59. Maynard R.L. Nano-technology and nano-toxicology. *Emerg Health Threats J.* – 2012. – Vol. 5.
60. Mukherjee A., Peralta-Videa J.R., Bandyopadhyay S. et al. Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics.* – 2014. – Vol. 6. – Pp. 132-138. doi: 10.1039/c3mt00064h.
61. Pakrashi S., Jain N., Dalai S. et al. In vivo genotoxicity assessment of titanium dioxide nanoparticles by *Allium cepa* root tip assay at high exposure concentrations. *PLoS One.* 2014. – Vol. 9. – P. 12. doi: 10.1371/journal.pone.0087789.
62. Patlolla A.K., Berry A., May L. et al. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Vicia faba*: a pilot study on the environmental monitoring of nanoparticles. *Environ Res Public Health.* 2012. – Vol. 9. – Pp. 1649-1662. doi: 10.3390/ijerph9051649.
63. Peng Z., Ni J., Zheng K., Shen Y., Wang X., He G., Jin S., Tang T. Dual effects and mechanism of TiO<sub>2</sub> nanotube arrays in reducing bacterial colonization and enhancing C3H10T1/2 cell adhesion. *Int. J. Nanomed.* – 2013. – Vol. 8. – Pp. 3093-3105. doi: 10.2147/IJN.S48084.
64. Pokhrel L.R., Dubey B. Evaluation of developmental responses of two crop plants exposed to silver and zinc oxide nanoparticles. *Sci Total Environ.* – 2013. – Vol. 452. – Pp. 321-332. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.02.059.
65. Polivkova M., Strublova V., Hubacek T., Rimpelova S., Svorcik V., Siegel J. Surface characterization and antibacterial response of silver nanowire arrays supported on laser-treated polyethylene naphthalate. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* – 2017. – Vol. 72. – Pp. 512-518. doi: 10.1016/j.msec.2016.11.072.
66. Polivkova M., Valova M., Siegel J., Rimpelova S., Hubáček T., Lyutakov O., Švorčík V. Antibacterial properties of palladium nanostructures sputtered on polyethylene naphthalate. *RSC Adv.* – 2015. – Vol. 5. – Pp. 73767-73774.
67. Rai M., Ingle A.P., Paralikar P., Anasane N., Gade R., Ingle P. Effective management of soft rot of ginger caused by *Pythium* spp. and *Fusarium* spp.: Emerging role of nanotechnology. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* – 2018. Vol. 102. – Pp. 6827-6839. doi: 10.1007/s00253-018-9145-8.
68. Reddy M.P., Venugopal A., Subrahmanyam M. Hydroxyapatite-supported Ag-TiO<sub>2</sub> as *Escherichia coli* disinfection photocatalyst. *Water Res.* – 2007. – Vol. 41. – Pp. 379-386. doi: 10.1016/j.watres.2006.09.018.
69. Rico C.M., Lee S.C., Rubenecia R. et al. Cerium oxide nanoparticles impact yield and modify nutritional parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric Food Chem.* – 2014. – Vol. 62. – Pp. 9669-9675. doi: 10.1021/jf503526r.
70. Rico C.M., Morales M.I., Barrios A.C. et al. Effect of cerium oxide nanoparticles on the quality of rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Agric Food Chem.* – 2013. – Vol. 61. – Pp. 11278-11285. doi: 10.1021/jf404046v.
71. Rico C., Barrios A., Tan W., Peralta-Videa J., Gardea-Torresday J. Wheat and barley exposure to nanoceria: Implications for agricultural productivity. *Environmental Nanotechnology – Steps for Environmentally Safe Implementation of Nanotechnology*, 58. Mahajan S., Kadam J., Dhawal P., Barve S., Kodkar S. Application of silver nanoparticles in in-vitro plant growth and metabolite production: revisiting its scope and feasibility. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 2022; 150: 15-39. doi: 10.1007/s11240-022-02249-w.
59. Maynard R.L. Nano-technology and nano-toxicology. *Emerg Health Threats J.* 2012; 5.
60. Mukherjee A., Peralta-Videa J.R., Bandyopadhyay S. et al. Physiological effects of nanoparticulate ZnO in green peas (*Pisum sativum* L.) cultivated in soil. *Metallomics.* 2014; 6: 132-138. doi: 10.1039/c3mt00064h.
61. Pakrashi S., Jain N., Dalai S. et al. In vivo genotoxicity assessment of titanium dioxide nanoparticles by *Allium cepa* root tip assay at high exposure concentrations. *PLoS One.* 2014; 9: 12. doi: 10.1371/journal.pone.0087789.
62. Patlolla A.K., Berry A., May L. et al. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Vicia faba*: a pilot study on the environmental monitoring of nanoparticles. *Environ Res Public Health.* 2012; 9: 1649-1662. doi: 10.3390/ijerph9051649.
63. Peng Z., Ni J., Zheng K., Shen Y., Wang X., He G., Jin S., Tang T. Dual effects and mechanism of TiO<sub>2</sub> nanotube arrays in reducing bacterial colonization and enhancing C3H10T1/2 cell adhesion. *Int. J. Nanomed.* 2013; 8: 3093-3105. doi: 10.2147/IJN.S48084.
64. Pokhrel L.R., Dubey B. Evaluation of developmental responses of two crop plants exposed to silver and zinc oxide nanoparticles. *Sci Total Environ.* 2013; 452: 321-332. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.02.059.
65. Polivkova M., Strublova V., Hubacek T., Rimpelova S., Svorcik V., Siegel J. Surface characterization and antibacterial response of silver nanowire arrays supported on laser-treated polyethylene naphthalate. *Mater. Sci. Eng. C Mater. Biol. Appl.* 2017; 72: 512-518. doi: 10.1016/j.msec.2016.11.072.
66. Polivkova M., Valova M., Siegel J., Rimpelova S., Hubáček T., Lyutakov O., Švorčík V. Antibacterial properties of palladium nanostructures sputtered on polyethylene naphthalate. *RSC Adv.* 2015; 5: 73767-73774.
67. Rai M.; Ingle A.P.; Paralikar P.; Anasane N.; Gade R.; Ingle P. Effective management of soft rot of ginger caused by *Pythium* spp. and *Fusarium* spp.: Emerging role of nanotechnology. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2018; 102: 6827-6839. doi: 10.1007/s00253-018-9145-8.
68. Reddy M.P., Venugopal A., Subrahmanyam M. Hydroxyapatite-supported Ag-TiO<sub>2</sub> as *Escherichia coli* disinfection photocatalyst. *Water Res.* 2007; 41: 379-386. doi: 10.1016/j.watres.2006.09.018.
69. Rico C.M., Lee S.C., Rubenecia R. et al. Cerium oxide nanoparticles impact yield and modify nutritional parameters in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Agric Food Chem.* 2014; 62: 9669-9675. doi: 10.1021/jf503526r.
70. Rico C.M., Morales M.I., Barrios A.C. et al. Effect of cerium oxide nanoparticles on the quality of rice (*Oryza sativa* L.) grains. *Agric Food Chem.* 2013; 61: 11278-11285. doi: 10.1021/jf404046v.
71. Rico C., Barrios A., Tan W., Peralta-Videa J., Gardea-Torresday J. Wheat and barley exposure to nanoceria: Implications for agricultural productivity. *Environmental Nanotechnology – Steps for Environmentally Safe Implementation of Nanotechnology*

West Dover, VT. – 2015. – June 21-26. doi: 10.1016/j.plana.2023.100033.

72. Sabo-Attwood T., Unrine J.M., Stone J.W. et al. Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings. *Nanotoxicology*. – 2012. – Vol. 6. – Pp. 353-360. doi: 10.3109/17435390.2011.579631.

73. Servin A.D., Morales M.I., Castillo-Michel H. et al. Synchrotron verification of TiO<sub>2</sub> accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO<sub>2</sub> nanoparticle transfer from soil into the food chain // *Environ Sci Technol*. – 2013. – Vol. 47. – Pp. 11592-11598. doi: 10.1021/es403368j.

74. Sevinc B.A., Hanley L. Antibacterial activity of dental composites containing zinc oxide nanoparticles. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* – 2010. Vol. 94 – Pp. 22-31. doi: 10.1002/jbm.b.31620.

75. Shaw A.K., Hossain Z. Impact of nano-CuO stress on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere*. – 2013. – Vol. 93. – Pp. 906-915. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.044.

76. Shaymurat T., Gu J.X., Xu C.S. et al. Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study. *Nanotoxicology*. – 2012. – Vol. 6. – Pp. 241-248. doi: 10.3109/17435390.2011.570462.

77. Shen C.X., Zhang Q.F., Li J.A. et al. Induction of programmed cell death in Arabidopsis and rice by single-wall carbon nanotubes. *Am J Bot.* – 2010. – Vol. 97. – Pp. 1602-1609. doi: 10.3732/ajb.1000073.

78. Siddiqi K.S., Husen A. Plant response to silver nanoparticles: a critical review // *Crit. Rev. Biotechnol.* – 2022. – V. 42. – Pp. 973-990. doi: 10.1080/07388551.2021.1975091.

79. Slavin Y.N., Asnis J., Hafeli U.O., Bach H. Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *J. Nanobiotechnol.* – 2017. – Vol. 15. – e65. doi: 10.1186/s12951-017-0308-z.

80. Smith A.H., Wright C.C. Chrysotile asbestos is the main cause of pleural mesothelioma. *Am.J. Ind. Med.* – 1996. – Vol. 30 (3). – Pp. 252-266. doi: 10.1002/(SICI)1097-0274(199609)30:3<252::AID-AJIM2>3.0.CO;2-0.

81. Srikar S.K., Giri D.D., Pal D.B., Mishra P.K., Upadhyay S.N. Green synthesis of silver nanoparticles: A review. *Green Sustain. Chem.* – 2016. – Vol. 6 (1). – Pp. 34-56. doi: 10.1177/15593258221088709.

82. Stampoulis D., Sinha S.K., White J.C. Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants // *Environ Sci Technol*. – 2009. – Vol. 43. – Pp. 9473-9479. doi: 10.1021/es901695c.

83. Symonds D.A., Merchenthaler I., Flaws J.A. Methoxychlor and estradiol induce oxidative stress DNA damage in the mouse ovarian surface epithelium. *Toxicol. Sci.* – 2008. – Vol. 105. – Pp. 182-187. doi: 10.1093/toxsci/kfn100.

84. Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S. et al. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Eco-toxicol Environ Safe.* – 2014. – Vol. 104. – Pp. 302-309. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.03.022.

85. Tripathi D.K., Shweta S.S. et al. An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiol Biochem.* – 2017. – Vol. 110. – Pp. 2-12. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030.

86. Wang L., Hu C., Shao L. The antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects

nology, West Dover, VT, June 21-26, 2015. doi: 10.1016/j.plana.2023.100033.

72. Sabo-Attwood T., Unrine J.M., Stone J.W. et al. Uptake, distribution and toxicity of gold nanoparticles in tobacco (*Nicotiana xanthi*) seedlings. *Nanotoxicology*. 2012; 6: 353-360. doi: 10.3109/17435390.2011.579631.

73. Servin A.D., Morales M.I., Castillo-Michel H. et al. Synchrotron verification of TiO<sub>2</sub> accumulation in cucumber fruit: a possible pathway of TiO<sub>2</sub> nanoparticle transfer from soil into the food chain. *Environ Sci Technol*. 2013; 47: 11592-11598. doi: 10.1021/es403368j.

74. Sevinc B.A., Hanley L. Antibacterial activity of dental composites containing zinc oxide nanoparticles. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2010; 94: 22-31. doi: 10.1002/jbm.b.31620.

75. Shaw A.K., Hossain Z. Impact of nano-CuO stress on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. *Chemosphere*. 2013; 93: 906-915. doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.05.044.

76. Shaymurat T., Gu J.X., Xu C.S. et al. Phytotoxic and genotoxic effects of ZnO nanoparticles on garlic (*Allium sativum* L.): A morphological study. *Nanotoxicology*. 2012; 6: 241-248. doi: 10.3109/17435390.2011.570462.

77. Shen C.X., Zhang Q.F., Li J.A. et al. Induction of programmed cell death in Arabidopsis and rice by single-wall carbon nanotubes. *Am J Bot.* 2010; 97: 1602-1609. doi: 10.3732/ajb.1000073.

78. Siddiqi K.S., Husen A. Plant response to silver nanoparticles: a critical review. *Crit. Rev. Biotechnol.* 2022; 42: 973-990. doi: 10.1080/07388551.2021.1975091.

79. Slavin Y.N., Asnis J., Hafeli U.O., Bach H. Metal nanoparticles: Understanding the mechanisms behind antibacterial activity. *J. Nanobiotechnol.* 2017; 15; e65. doi: 10.1186/s12951-017-0308-z.

80. Smith A.H., Wright C.C. Chrysotile asbestos is the main cause of pleural mesothelioma. *Am.J. Ind. Med.* 1996; 30(3): 252-266. doi: 10.1002/(SICI)1097-0274(199609)30:3<252::AID-AJIM2>3.0.CO;2-0.

81. Srikar S.K., Giri D.D., Pal D.B., Mishra P.K., Upadhyay S.N. Green synthesis of silver nanoparticles: A review. *Green Sustain. Chem.* 2016; 6 (1): 34-56. doi: 10.1177/15593258221088709.

82. Stampoulis D., Sinha S.K., White J.C. Assay-dependent phytotoxicity of nanoparticles to plants. *Environ Sci Technol*. 2009; 43: 9473-9479. doi: 10.1021/es901695c.

83. Symonds D.A., Merchenthaler I., Flaws J.A. Methoxychlor and estradiol induce oxidative stress DNA damage in the mouse ovarian surface epithelium. *Toxicol. Sci.* 2008; 105: 182-187. doi: 10.1093/toxsci/kfn100.

84. Thuesombat P., Hannongbua S., Akasit S. et al. Effect of silver nanoparticles on rice (*Oryza sativa* L. cv. KDML 105) seed germination and seedling growth. *Eco-toxicol Environ Safe.* 2014; 104: 302-309. doi: 10.1016/j.ecoenv.2014.03.022.

85. Tripathi D.K., Shweta S.S. et al. An overview on manufactured nanoparticles in plants: uptake, translocation, accumulation and phytotoxicity. *Plant Physiol Biochem.* 2017; 110: 2-12. doi: 10.1016/j.plaphy.2016.07.030.

86. Wang L., Hu C., Shao L. The antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects

- for the future. *Int. J. Nanomed.* – 2017. – Vol. 12. – Pp. 1227-1249. doi: 10.2147/IJN.S121956.
87. Wang Q., Ebbs S.D., Chen Y.S. et al. Trans-generational impact of cerium oxide nanoparticles on tomato plants. *Metallomics.* – 2013. – Vol. 5. – Pp. 753-759. doi: 10.1039/c3mt00033h.
88. Weller R.B. Nitric oxide-containing nanoparticles as an antimicrobial agent and enhancer of wound healing. *J. Investig. Dermatol.* – 2009. – Vol. 129. – Pp. 2335-2337. doi: 10.1038/jid.2009.149.
89. Xiang L., Zhao H.M., Li Y.W. et al. Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of Chinese cabbage seeds. *Environ Sci Pollut Res.* – 2015. – Vol. 22. – Pp. 10452-10462. doi: 10.1007/s11356-015-4172-9.
90. Xu Y., Wei M.T., Ou-Yang H.D., Walker S.G., Wang H.Z., Gordon C.R., Guterman S., Zawacki E., Applebaum E., Brink P.R. et al. Exposure to TiO<sub>2</sub> nanoparticles increases staphylococcus aureus infection of HeLa cells. *J. Nanobiotechnol.* – 2016. – Vol. 14. – e34. doi: 10.1186/s12951-016-0184-y.
91. Yang W., Shen C., Ji Q., An H., Wang J., Liu Q., Zhang Z. Food storage material silver nanoparticles interfere with DNA replication fidelity and bind with DNA. *Nanotechnology.* – 2009. – Vol. 20 (8). – e085102. doi: 10.1088/0957-4484/20/8/085102.
92. Yoon S.J., Kwak J.I., Lee W.M. et al. Zinc oxide nanoparticles delay soybean development: a standard soil microcosm study. *Ecotoxicol Environ Safe.* – 2014. – Vol. 100. – Pp. 131-137. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.10.014.
93. Zhang H., Lv X., Li Y., Wang Y., Li J. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst. *ACS Nano.* – 2010. – Vol. 4. – Pp. 380-386. doi: 10.1021/nn901221k.
94. Zhang Z.Y., He X., Zhang H.F. et al. Uptake and distribution of ceria nanoparticles in cucumber plants. *Metallomics.* – 2011. – Vol. 3. – Pp. 816-822. doi: 10.1039/c1mt00049g.
95. Zhao L., Ashraf M.A. Influence of silver-hydroxyapatite nanocomposite coating on biofilm formation of joint prosthesis and its mechanism. *West Indian Med. J.* – 2015. Vol. 64. – Pp. 506-513. doi: 10.7727/wimj.2016.179.
96. Zhao L.J., Peralta-Videa J.R., Rico C.M. et al. CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Agric Food Chem.* – 2014. – Vol. 62. – Pp. 2752-2759. doi: 10.1021/jf405476u.
97. Zhu H., Han J., Xiao J.Q. et al. Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Environ Monit.* – 2008. – Vol. 10. – Pp. 713-717. doi: 10.1039/b805998e.
98. Zhu Z.J., Wang H., Yan B., Zheng H., Jiang Y., Miranda O.R., Rotello V.M., Xing B., Vachet R.W. Effect of surface charge on the uptake and distribution of gold nanoparticles in four plant species. *Environ Sci Technol.* – 2012. – Vol. 46 (22). – Pp. 12391-12398. doi: 10.1021/es301977w.
- for the future. *Int. J. Nanomed.* 2017; 12: 1227-1249. doi: 10.2147/IJN.S121956.
87. Wang Q., Ebbs S.D., Chen Y.S. et al. Trans-generational impact of cerium oxide nanoparticles on tomato plants. *Metallomics.* 2013; 5: 753-759. doi: 10.1039/c3mt00033h.
88. Weller R.B. Nitric oxide-containing nanoparticles as an antimicrobial agent and enhancer of wound healing. *J. Investig. Dermatol.* 2009; 129: 2335-2337. doi: 10.1038/jid.2009.149.
89. Xiang L., Zhao H.M., Li Y.W. et al. Effects of the size and morphology of zinc oxide nanoparticles on the germination of Chinese cabbage seeds. *Environ Sci Pollut Res.* 2015; 22: 10452-10462. doi: 10.1007/s11356-015-4172-9.
90. Xu Y., Wei M.T., Ou-Yang H.D., Walker S.G., Wang H.Z., Gordon C.R., Guterman S., Zawacki E., Applebaum E., Brink P.R. et al. Exposure to TiO<sub>2</sub> nanoparticles increases staphylococcus aureus infection of HeLa cells. *J. Nanobiotechnol.* 2016; 14: e34. doi: 10.1186/s12951-016-0184-y.
91. Yang W., Shen C., Ji Q., An H., Wang J., Liu Q., Zhang Z. Food storage material silver nanoparticles interfere with DNA replication fidelity and bind with DNA. *Nanotechnology.* 2009; 20(8); e085102. doi: 10.1088/0957-4484/20/8/085102.
92. Yoon S.J., Kwak J.I., Lee W.M. et al. Zinc oxide nanoparticles delay soybean development: a standard soil microcosm study. *Ecotoxicol Environ Safe.* 2014; 100: 131-137. doi: 10.1016/j.ecoenv.2013.10.014.
93. Zhang H., Lv X., Li Y., Wang Y., Li J. P25-graphene composite as a high performance photocatalyst. *ACS Nano.* 2010; 4: 380-386. doi: 10.1021/nn901221k.
94. Zhang Z.Y., He X., Zhang H.F. et al. Uptake and distribution of ceria nanoparticles in cucumber plants. *Metallomics.* 2011; 3: 816-822. doi: 10.1039/c1mt00049g.
95. Zhao L., Ashraf M.A. Influence of silver-hydroxyapatite nanocomposite coating on biofilm formation of joint prosthesis and its mechanism. *West Indian Med. J.* 2015; 64: 506-513. doi: 10.7727/wimj.2016.179.
96. Zhao L.J., Peralta-Videa J.R., Rico C.M. et al. CeO<sub>2</sub> and ZnO nanoparticles change the nutritional qualities of cucumber (*Cucumis sativus*). *Agric Food Chem.* 2014; 62: 2752-2759. doi: 10.1021/jf405476u.
97. Zhu H., Han J., Xiao J.Q. et al. Uptake, translocation, and accumulation of manufactured iron oxide nanoparticles by pumpkin plants. *Environ Monit.* 2008; 10: 713-717. doi: 10.1039/b805998e.
98. Zhu Z.J., Wang H., Yan B., Zheng H., Jiang Y., Miranda O.R., Rotello V.M., Xing B., Vachet R.W. Effect of surface charge on the uptake and distribution of gold nanoparticles in four plant species. *Environ Sci Technol.* 2012; 46(22): 12391-12398. doi: 10.1021/es301977w.

## Информация об авторах

**Дарья Анатольевна Хлебникова**, старший преподаватель, канд. биол. наук, кафедра биотехнологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: khlebnikova@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0001-8188-2276.

**Оксана Борисовна Поливанова**, доцент, канд. биол. наук, кафедра биотехнологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: polivanova@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0002-3992-5452.

**Маргарита Владимировна Бойцова**, студент, направление подготовки 19.03.01 – Биотехнология, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: boytsoffmargaret07@yandex.ru.

**Илья Иванович Чеповой**, студент, направление подготовки 19.03.01 – Биотехнология, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: Ilya.chepovoy@gmail.com.

**Нандин-Оюу Мунхбаатар**, студент, направление подготовки 19.03.01 – Биотехнология, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: nandikamunkhbaatar@gmail.com

**Михаил Юрьевич Чередниченко**, доцент, и.о. заведующего кафедрой биотехнологии, канд. биол. наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 125500, Россия, г. Москва, ул. Тимирязевская, 49; e-mail: cherednichenko@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0002-7856-9454.

Статья поступила в редакцию 03.05.2023  
Одобрена после рецензирования 31.07.2023  
Принята к публикации 13.10.2023

## About authors

**Darya A. Khlebnikova**, CSc (Bio), Associate Professor, Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: khlebnikova@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0001-8188-2276).

**Oksana B. Polivanova**, CSc (Bio), senior teacher, Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: polivanova@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0002-3992-5452).

**Margarita V. Boytsova**, BSc-student, training program – 19.03.01 Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: boytsoffmargaret07@yandex.ru).

**Ilya I. Chepovoy**, BSc-student, training program – 19.03.01 Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: Ilya.chepovoy@gmail.com).

**Nandin-Oyuu Munkhbaatar**, BSc-student, training program – 19.03.01 Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: nandikamunkhbaatar@gmail.com).

**Mikhail Yu. Cherednichenko**, CSc (Bio), Associate Professor, Acting Head of the Department of Biotechnology, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49, Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation; E-mail: cherednichenko@rgau-msha.ru; orcid: 0000-0002-7856-9454).

The article was submitted to the editorial office 03 May 2023  
Approved after reviewing 31 Jul 2023  
Accepted for publication 13 Oct 2023