

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ СЕРЕБРА НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

V.I. Polonsky, A.A. Asanova

THE INFLUENCE OF SILVER NANOPARTICLES ON BIOLOGICAL OBJECTS

Полонский В.И. – д-р биол. наук, проф. каф. ландшафтной архитектуры, ботаники, агроэкологии Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Асанова А.А. – асп. каф. ландшафтной архитектуры, ботаники, агроэкологии Красноярского государственного аграрного университета, г. Красноярск. E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Polonsky V.I. – Dr. Biol. Sci., Prof., Chair of Landscape Architecture, Botany, Physiology Agroecology, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Asanova A.A. – Post-Graduate Student, Chair of Landscape Architecture, Botany, Agroecology, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk. E-mail: vadim.polonskiy@mail.ru

Сегодня в мире мощное развитие получили нанотехнологии, объемы промышленного производства наноматериалов увеличиваются с каждым днем, достигая в настоящий момент в развитых странах нескольких тысяч тонн в год. В результате такой деятельности человека в окружающей среде появились неестественные, очень мелкие частицы техногенного происхождения. Наночастицы, создавая беспрецедентный класс промышленных загрязнений окружающей среды, непосредственно воздействуют практически на все виды организмов. Поэтому риски, вызванные техногенными наноматериалами, как для человека, так и для окружающей среды должны быть оценены. Цель работы – анализ мировой литературы по влиянию широко распространенных наночастиц – серебра – на представителей разных уровней биологической организации, населяющих различные среды обитания. Показано, что проблема безопасности техногенных наночастиц исследуется мировым научным сообществом в основном методами биотестирования. При изучении влияния наночастиц на различные биологические объекты в литературе описаны неоднозначные результаты. Это, вероятно, вызвано не только отсутствием единых стандартов для проведения исследования биотестирования наночастиц, выбором различных тест-функций и условий проведения экспериментов, но и характеристикой самих наночастиц. Установлено, что техногенные наночастицы серебра могут иметь как положительное, так и отрицательное или нейтральное влияние на различные тест-объекты. Самыми чувствительными тест-объектами к действию наночастиц серебра оказались одноклеточные водоросли и водные рачки, что делает водные экосистемы одним из самых уязвимых объектов окружающей среды к их воздействию. Высокая чувствительность указанных организмов ставит их в ряд весьма перспективных тест-объектов для проведения оперативного мониторинга качества сред, загрязненных наночастицами серебра.

Ключевые слова: наночастицы серебра, биотестирование, микромицеты, водоросли, рачки, культуры клеток, растения, размеры и форма наночастиц.

At present nanotechnologies have gained powerful development in the world, the volume of industrial production of

nanomaterials is increasing every day, reaching several thousand tons per year in developed countries. Unnatural very small engineered particles are released into the environment as a result of such human activities. Nanoparticles causing an unprecedented type of industrial pollution directly affect all living organisms. Therefore, the risks caused by engineered nanomaterials both to humans and environment have to be evaluated. The purpose of the review is analyzing the world literature about the effects of one of the most widespread silver nanoparticles on living organisms of different levels of biological organization and habitats. It is shown that safety issues with engineered nanoparticles are studied using biotesting methods by the world scientific community. When studying the effect of nanoparticles on various biological objects, the literature describes ambiguous results. This is probably not only due to the absence of standard biotests, test functions and experimental conditions, but also due to nanoparticles characteristics. It has been established that engineered silver nanoparticles can have both positive and negative or neutral effects upon different test objects. The most sensitive organisms to silver nanoparticles were unicellular algae and water crustaceans; this fact makes water ecosystems one of the most vulnerable objects of the environment to their effect. High sensitivity of specified organisms puts them in a row of very perspective test objects for carrying out expeditious monitoring of quality of the environments polluted by silver nanoparticles.

Keywords: silver nanoparticles, biotesting, micromycetes, algae, crustaceans, cell cultures, plants, size and shape of nanoparticles.

Введение. Нанотехнологии представляют быстро развивающиеся области науки и техники, которые в среднесрочной перспективе могут стать основой нового технологического уклада. С каждым днем в результате расширения области использования продукции, содержащей наноразмерные частицы, увеличиваются объемы промышленного производства наноматериалов, достигая в настоящий момент в развитых странах нескольких тысяч тонн в год [1, 2]. Широкое распространение получили наночастицы серебра, которые входят в состав потребительских продуктов, таких как косметика, пищевая упаковка [3], биомедицинские продукты [4, 5], функционализированная пластмасса [6], текстиль [7], фильтры для воды [8].

Для комплексной оценки экотоксикологического воздействия наночастиц необходимо иметь данные сравнительного учета их влияния на представителей разных биологических видов.

Цель работы. Анализ мировой литературы по влиянию наночастиц серебра на представителей разных уровней биологической организации и сред обитания.

Результаты и их обсуждение

Источники поступления наночастиц в окружающую среду. Появление наночастиц в атмосфере возможно вследствие старения полимеров [9], входящих в состав разнообразных покрытий [2], в результате сжигания отходов [10], сварки [11]. Механизмом попадания наночастиц в почву является обработка полей и сельскохозяйственных угодий препаратами, содержащими наночастицы, с целью стимуляции роста растений и ингибирования развития фитопатогенов [12]. Кроме того, наночастицы серебра используются в технологиях обработки помещений и строительных материалов, например для снижения грибкового и бактериального обсеменения их поверхностей [13].

Очевидно, что увеличение производства и использования наночастиц серебра неизбежно ведет к их появлению и концентрированию в окружающей среде [14]. Частично вымываясь из почвы и атмосферы, они попадают в водоемы, и затем в Мировой океан. В природных водных средах наносеребро оказывает прямое воздействие на обитателей этих экосистем [15]. Поэтому риски, вызванные наночастицами серебра, следует принимать во внимание.

Влияние наночастиц серебра на микроицеты и водные организмы. Значительное число исследований оценки токсичности наночастиц серебра выполнено на патогенных грибах, поражающих растения и вызывающих заболевания животных и человека. Согласно литературным данным, наносеребро проявляет выраженные фунгицидные свойства в отношении ряда грибов при довольно низких концентрациях, что предполагает их широкую перспективу использования в медицине и агрохимии [16]. Так, для патогенных микроорганизмов рода *Candida* ингибирующий эффект наступал уже при концентрации 0,4–25 мкг/л, а для *Trichophyton mentagrophytes* – при 1–4 мкг/л [17,18]. Наночастицы оказали значительное негативное действие на рост *Trichosporon asahii*, минимальная ингибирующая концентрация составила 0,5 мг/л [19]. Угнетение роста культуры *Bipolaris sorokiniana* происходило при гораздо большей концентрации, равной 50 мг/л, а при значении 100 мг/л наблюдалось полное ингибирование роста мицелия [20].

Среди обитателей пресноводных водоемов наиболее чувствительными организмами к действию наночастиц являются водные рачки *Daphnia magna*. Это было доказано при сравнении их с одноклеточной водорослью *Pseudokirchneriella subcapitata*, рыбками *Danio rerio* [21], бактериями *Escherichia coli*, *Pseudomonas fluorescens*, дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* и линией клеток фибробластов мыши [22].

Воздействие наночастиц серебра на высшие растения. При исследовании действия наночастиц на высшие растения в литературе приводятся противоречивые результаты: одними авторами показано негативное

влияние наносеребра, другими утверждается стимулирующий эффект, третьими зафиксировано отсутствие влияния вовсе, четвертые говорят о разнонаправленной реакции растений различных видов [23]. Так, обработка семян кукурузы, огурцов и томатов наносеребром в концентрации 500 мг/л оказывала ингибирующее действие на рост корней и надземной части проростков, а также содержание белка и ДНК [24]. В исследовании, выполненном на томатах, наблюдалось значительное уменьшение длины корня при концентрации частиц 50 мг/л [25]. Было найдено снижение прорастания семян райграса при концентрации наночастиц 10 мг/л, при этом показатели прорастания льна не изменялись даже при концентрации наночастиц, равной 1000 мг/л [26]. В работе, выполненной на проростках бобов, установлен генотоксический эффект при концентрации наночастиц 12,5–100 мг/л [27].

В то же время в работах других авторов регистрировались эффекты стимуляции. Так, сообщалось, что воздействие коллоидного раствора наночастиц размером 18 нм на саженцы резуховидки Таля в течение 21 дня привело к ускорению роста корня при концентрации наночастиц до 30 мг/л [28]. Продемонстрировано стимулирующее влияние наносеребра на ростовые процессы горчицы сарептской [29], рукколы [30], фасоли, кукурузы [31].

Влияние наночастиц серебра на клеточные культуры. Эксперименты с участием млекопитающих тест-организмов, хоть и способны приблизить нас к пониманию воздействия наночастиц на здоровье человека, в настоящее время окутаны спорами об этичности методов. Поэтому преимущество использования первичных клеточных культур и непрерывных культур клеток высших позвоночных организмов *in vitro* является очевидным. Так, при исследовании цитотоксического действия наночастиц серебра на первичные клеточные культуры рыб (гепатоциты) и непрерывные клеточные культуры рыб (RTL-W1, RTL-149, RTG-2) выяснилось, что последние являются весьма чувствительными индикаторами их токсичности [32]. Аналогичный эффект для тех же частиц был продемонстрирован в исследовании на мезенхимальных стволовых клетках человека и мононуклеарных клетках периферической крови, где наночастицы серебра проявили токсичность ко всем тест-объектам в узком диапазоне концентраций от 12,5 до 50 мг/л [33].

В другом исследовании выявлены цитотоксические эффекты наночастиц серебра у первичных жаберных клеток и гепатоцитов радужной форели [34, 35]. В результате было отмечено, что индикация уровня глутатиона и АФК могут выступать биомаркерами токсичности наночастиц серебра.

Механизм действия наночастиц серебра на живые организмы. По мнению ряда авторов, наночастицы серебра могут проявлять некоторую степень токсичности по отношению ко всем организмам и клеточным культурам [36]. Установлено [37], что наносеребро оказывает почти одинаковое негативное воздействие в диапазоне концентраций от 1 до 100 мг/л независимо от выбора тест-объекта (вирусы, бактерии, микроводоросли, грибы, клетки животных и человека). Отмеченный эффект, вероятно, связан с их способностью легко образовывать ионы [38]. Наночастицы и их ионы активируют сигнальные пути

клетки, проникают сквозь клеточную стенку и мембрану, изменяют проницаемость последней, повреждают мембранные белки, нуклеиновые кислоты и ферменты, индуцируя образование в клетке АФК [39].

Зависимость токсичности наночастиц от их размеров и формы. В ряде работ показано увеличение негативного действия наночастиц серебра с уменьшением их размера. Это было найдено на культурах бактерий *E. coli*, *P. fluorescens*, дрожжей *S. Cerevisiae*, микроводоросли *P. subcapitata*, водных рачках *D. magna* и линии клеток фибробластов мыши в присутствии наночастиц от 10 до 80 нм [22, 40]. Однако в эксперименте на растениях риса был зафиксирован противоположный эффект: частицы размером 20 нм не оказали никакого действия, в то время как частицы размером 150 нм приводили к значительному снижению прорастания семян и последующему ингибированию роста при концентрациях до 100 мг/л [41].

В исследованиях ряда авторов проведено сравнение токсичности суспензий наночастиц, имеющих разную форму. В экспериментах, выполненных на рачках и микроводоросли, было найдено, что палочковидная форма частиц менее токсична, чем шарообразная [42]. На линию эпителиальных клеток радужной форели и эмбрионы рыбок *D. rerio* наночастицы шаровидной формы оказали менее выраженное токсическое действие по сравнению с таковыми, имеющими форму пластин, несмотря на более низкие темпы растворения и биодоступности этой формы материала [43].

Заключение. Таким образом, сегодня интенсивно развиваются нанотехнологии, следствием чего стало присутствие техногенных наночастиц серебра в окружающей среде. Они непосредственно воздействуют на все виды организмов, поэтому риски, вызванные указанными наноматериалами, как для человека, так и для окружающей среды должны быть оценены. При изучении влияния наносеребра на различные биологические объекты в литературе описаны неоднозначные результаты и зафиксированы как положительные, так и отрицательные эффекты. При этом в работах не прослеживается четкая зависимость чувствительности тест-объектов к наночастицам серебра от уровня их биологической организации. Неоднозначность публикуемых результатов объясняется различными характеристиками самих наночастиц. Например, в экспериментах на рачках *D. magna* при использовании наночастиц серебра трех различных производителей полученные значения ЕС₅₀ различались в 100 раз [44].

Самыми чувствительными тест-объектами к воздействию наночастиц серебра оказались одноклеточные водоросли и водные рачки, что в условиях неконтролируемой утилизации наночастиц посредством сточных вод делает водные экосистемы одним из самых уязвимых объектов окружающей среды к их воздействию. Высокая чувствительность указанных организмов ставит их в ряд весьма перспективных тест-объектов для проведения оперативного мониторинга качества сред, загрязненных наночастицами серебра.

Обзор современной научной литературы показывает, что зависимости ответных реакций тест-объектов от уровня их биологической организации исследованы недостаточно; в литературных источниках приводятся про-

тиворечивые результаты влияния наночастиц различного размера и формы на ростовые показатели тест-организмов; практически не изучены молекулярные механизмы воздействия наночастиц на клетку. Все эти вопросы требуют дальнейшего рассмотрения.

Литература

1. Piccinno F., Gottschalk F., Seeger S. [et al.]. Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world // *Journal of Nanoparticle Research*. – 2012. – V. 14. – № 9. – P. 1109–1120.
2. Talreja N., Kumar D. Engineered Nanoparticles' Toxicity: Environmental Aspects // In: *Nanotechnology in Environmental Science*. Editors: C.M. Hussain, A.K. Mishra. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. – 2018. – Chapter 23. – P. 737–758.
3. Carbone M., Donia D., Sabbatella G. [et al.]. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging // *Journal of King Saud University Science*. – 2016. – V. 28. – № 4. – P. 273–279.
4. Ovais M., Ahmad I., Khalil A. [et al.]. Wound healing applications of biogenic colloidal silver and gold nanoparticles: recent trends and future prospects // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2018. – V. 102. – № 1. – P. 1–14.
5. Monteiro D.R., Gorup L. F., Silva S. [et al.]. Silver colloidal nanoparticles: antifungal effect against adhered cells and biofilms of *Candida albicans* and *Candida glabrata* // *Biofouling*. – 2011. – V. 27. – № 7. – P. 711–719.
6. Blaser S., Scheringer M., MacLeod M. [et al.]. Estimation of cumulative aquatic exposure and risk due to silver: contribution of nanofunctionalized plastics and textiles // *Science of the Total Environment*. – 2008. – V. 390. – № 2-3. – P. 396–409.
7. Lombi E., Donner E., Scheckel K.G. [et al.]. Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing // *Chemosphere*. – 2014. – V. 111. – № 2. – P. 352–358.
8. Praveena S., Karuppiah K., Than L. Potential of cellulose paper coated with silver nanoparticles: a benign option for emergency drinking water filter // *Cellulose*. – 2018 – P. 1–12.
9. Benn T., Westerhoff P. Nanoparticle silver released into water from commercially available sock fabrics // *Environmental Science and Technology*. – 2008. – V. 42. – № 11. – P. 4133–4139.
10. Forster H., Thajudeen T., Funk C. [et al.]. Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants // *Waste Management*. – 2016. – V. 52. – P. 346–352.
11. Albuquerque P., Gomes J., Pereira C. [et al.]. Assessment and control of nanoparticles exposure in welding operations by use of a Control Banding Tool // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – V. 89. – P. 296–300.
12. Thakur S., Kumar R. Bio-Nanotechnology and its Role in Agriculture and Food Industry // *Journal of Molecular*

- and Genetic Medicine. – 2018. – V. 12. – № 1. – P. 324–329.
13. Ogar A., Tylko G., Turnau K. Antifungal properties of silver nanoparticles against indoor mould growth // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 521. – P. 305–314.
 14. Hedberg J., Skoglund S., Karlsson M. [et al.]. Sequential studies of silver released from silver nanoparticles in aqueous media simulating sweat, laundry detergent solutions and surface water // Environmental Science and Technology. – 2014. – V. 48. – № 13. – P. 7314–7322.
 15. McGillicuddy E., Murray I., Kavanagh S. [et al.]. Silver nanoparticles in the environment: Sources, detection and ecotoxicology // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 575. – P. 231–246.
 16. Liu R., Lal R. Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 514. – P. 131–139.
 17. Kim K., Sung W., Moon S. [et al.]. Antifungal effect of silver nanoparticles on dermatophytes // Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2008. – V. 18. – № 8. – P. 1482–1484.
 18. Panacek A., Kolar M., Vecerova R. [et al.]. Antifungal activity of silver nanoparticles against *Candida* spp // Biomaterials. – 2009. – V. 30. – № 31. – P. 6333–6340.
 19. Xia Z., Ma Q., Li S. [et al.]. The antifungal effect of silver nanoparticles on *Trichosporon asahii* // Journal of Microbiology, Immunology and Infection. – 2016. – V. 49. – № 2. – P. 182–188.
 20. Mishra S., Singh H. Silver nanoparticles mediated altered gene expression of melanin biosynthesis genes in *Bipolaris sorokiniana* // Microbiological Research. – 2015. – V. 172. – P. 16–18.
 21. Ribeiro F., Gallego-Urrea J.A., Jurkschat K. [et al.]. Silver nanoparticles and silver nitrate induce high toxicity to *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia magna* and *Danio rerio* // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 466. – P. 232–241.
 22. Ivask A., Kurvet I., Kasemets K. [et al.]. Size-dependent toxicity of silver nanoparticles to bacteria, yeast, algae, crustaceans and mammalian cells *in vitro* // PLoS ONE. – 2014. – V. 9. – № 7. – P. 102–108.
 23. Yin L., Colman B., McGill B. [et al.]. Effects of silver nanoparticle exposure on germination and early growth of eleven wetland plants // PLoS ONE. – 2012. – V. 7. – № 10. – P. 47–67.
 24. Kuamri M., Ernest V., Mukherjee A. [et al.]. In Vivo Nanotoxicity Assays in Plant Models // Nanotoxicity. – 2012. – V. 926. – P. 399–410.
 25. Song U., Jun H., Waldman B. [et al.]. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2013. – V. 93. – P. 60–67.
 26. El-Temsah Y., Joner E. Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil // Environmental Toxicology. – 2012. – V. 27. – № 1. – P. 42–49.
 27. Patlolla A., Berry A., May L. [et al.]. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Vicia faba*: a pilot study on the environmental monitoring of nanoparticles // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2012. – V. 9. – № 5. – P. 1649–1662.
 28. Mirzajani F., Askari H., Hamzelou S. [et al.]. Effect of silver nanoparticles on *Oryza sativa* L. and its rhizosphere bacteria // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2013. – V. 88. – P. 48–54.
 29. Sharma P., Bhatt D., Zaidi M. [et al.]. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea* // Applied Biochemistry and Biotechnology. – 2012. – V. 167. – № 8. – P. 2225–2233.
 30. Vannini C., Domingo G., Onelli E. [et al.]. Morphological and proteomic responses of *Eruca sativa* exposed to silver nanoparticles or silver nitrate // PLoS ONE. – 2013. – V. 8. – № 7. – P. 68–75.
 31. Salama H. Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) // International Research Journal of Biotechnology. – 2012. – V. 3. – № 10. – P. 190–197.
 32. Connolly M., Fernandez-Cruz M., Quesada-Garcia A. [et al.]. Comparative cytotoxicity study of silver nanoparticles (AgNPs) in a variety of rainbow trout cell lines (RTL-W1, RTH-149, RTG-2) and primary hepatocytes // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2015. – V. 12. – № 5. – P. 5386–5405.
 33. Greulich C., Braun D., Peetsch A. [et al.]. The toxic effect of silver ions and silver nanoparticles towards bacteria and human cells occurs in the same concentration range // RSC Advances. – 2012. – V. 2. – № 17. – P. 6981–6987.
 34. Farkas J., Christian P., Gallego-Urrea J. [et al.]. Uptake and effects of manufactured silver nanoparticles in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) gill cells // Aquatic Toxicology. – 2011. – V. 101. – № 1. – P. 117–125.
 35. Massarsky A., Abraham R., Nguyen K.C. [et al.]. Nanosilver cytotoxicity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) erythrocytes and hepatocytes // Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology and Pharmacology. – 2014. – V. 159. – P. 10–21.
 36. Chernousova, S., Epple M. Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal // Angewandte Chemie International Edition. – 2013. – V. 52. – № 6. – P. 1636–1653.
 37. Vazquez-Munoz R., Borrego B., Juarez-Moreno K. [et al.]. Toxicity of silver nanoparticles in biological systems: Does the complexity of biological systems matter? // Toxicology Letters. – 2017. – V. 276. – P. 11–20.
 38. Cvjetko P., Milosic A., Domijan A. [et al.]. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2017. – V. 137. – P. 18–28.
 39. McShan D., Ray C., Yu H. Molecular Toxicity Mechanism of Nanosilver // Journal of Food and Drug Analysis. – 2014. – V. 22. – № 1. – P. 116–127.
 40. Kennedy A.J., Hull M.S., Bednar A.J. [et al.]. Fractionating nanosilver: importance for determining toxicity to

- aquatic test organisms // Environmental Science and Technology. – 2010. – V. 44. – № 24. – P. 9571–9577.
41. *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 // Ecotoxicology and Environmental Safety. – 2014. – V. 104. – P. 302–309.
 42. *Sohn E., Johar S., Kim T.* [et al.]. Aquatic toxicity comparison of silver nanoparticles and silver nanowires // BioMed Research International. – 2015. – V. 2015. – P. 1–12.
 43. *George S., Lin S., Ji Z.* [et al.]. Surface defects on plate-shaped silver nanoparticles contribute to its hazard potential in a fish gill cell line and zebrafish embryos // ACS Nano. – 2012. – V. 6. – № 5. – P. 3745–3759.
 44. *Asghari S., Johari S., Lee J.* [et al.]. Toxicity of various silver nanoparticles compared to silver ions in *Daphnia magna* // Journal of Nanobiotechnology. – 2012. – V. 10. – № 1. – P. 14–25.

Literatura

1. *Piccinno F., Gottschalk F., Seeger S.* [et al.]. Industrial production quantities and uses of ten engineered nanomaterials in Europe and the world // Journal of Nanoparticle Research. – 2012. – V. 14. – № 9. – P. 1109–1120.
2. *Talreja N., Kumar D.* Engineered Nanoparticles' Toxicity: Environmental Aspects // In: Nanotechnology in Environmental Science. Editors: C.M. Hussain, A.K. Mishra. Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA. – 2018. – Chapter 23. – P. 737–758.
3. *Carbone M., Donia D., Sabbatella G.* [et al.]. Silver nanoparticles in polymeric matrices for fresh food packaging // Journal of King Saud University Science. – 2016. – V. 28. – № 4. – P. 273–279.
4. *Ovais M., Ahmad I., Khalil A.* [et al.]. Wound healing applications of biogenic colloidal silver and gold nanoparticles: recent trends and future prospects // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2018. – V. 102. – № 1. – P. 1–14.
5. *Monteiro D.R., Gorup L. F., Silva S.* [et al.]. Silver colloidal nanoparticles: antifungal effect against adhered cells and biofilms of *Candida albicans* and *Candida glabrata* // Biofouling. – 2011. – V. 27. – № 7. – P. 711–719.
6. *Blaser S., Scheringer M., MacLeod M.* [et al.]. Estimation of cumulative aquatic exposure and risk due to silver: contribution of nanofunctionalized plastics and textiles // Science of the Total Environment. – 2008. – V. 390. – № 2-3. – P. 396–409.
7. *Lombi E., Donner E., Scheckel K.G.* [et al.]. Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing // Chemosphere. – 2014. – V. 111. – № 2. – P. 352–358.
8. *Praveena S., Karuppiyah K., Than L.* Potential of cellulose paper coated with silver nanoparticles: a benign option for emergency drinking water filter // Cellulose. – 2018 – P. 1–12.
9. *Benn T., Westerhoff P.* Nanoparticle silver released into water from commercially available sock fabrics // Environmental Science and Technology. – 2008. – V. 42. – № 11. – P. 4133–4139.
10. *Forster H., Thajudeen T., Funk C.* [et al.]. Separation of nanoparticles: Filtration and scavenging from waste incineration plants // Waste Management. – 2016. – V. 52. – P. 346–352.
11. *Albuquerque P., Gomes J., Pereira C.* [et al.]. Assessment and control of nanoparticles exposure in welding operations by use of a Control Banding Tool // Journal of Cleaner Production. – 2015. – V. 89. – P. 296–300.
12. *Thakur S., Kumar R.* Bio-Nanotechnology and its Role in Agriculture and Food Industry // Journal of Molecular and Genetic Medicine. – 2018. – V. 12. – № 1. – P. 324–329.
13. *Ogar A., Tylko G., Turnau K.* Antifungal properties of silver nanoparticles against indoor mould growth // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 521. – P. 305–314.
14. *Hedberg J., Skoglund S., Karlsson M.* [et al.]. Sequential studies of silver released from silver nanoparticles in aqueous media simulating sweat, laundry detergent solutions and surface water // Environmental Science and Technology. – 2014. – V. 48. – № 13. – P. 7314–7322.
15. *McGillicuddy E., Murray I., Kavanagh S.* [et al.]. Silver nanoparticles in the environment: Sources, detection and ecotoxicology // Science of the Total Environment. – 2017. – V. 575. – P. 231–246.
16. *Liu R., Lal R.* Potentials of engineered nanoparticles as fertilizers for increasing agronomic productions // Science of the Total Environment. – 2015. – V. 514. – P. 131–139.
17. *Kim K., Sung W., Moon S.* [et al.]. Antifungal effect of silver nanoparticles on dermatophytes // Journal of Microbiology and Biotechnology. – 2008. – V. 18. – № 8. – P. 1482–1484.
18. *Panacek A., Kolar M., Vecerova R.* [et al.]. Antifungal activity of silver nanoparticles against *Candida* spp // Biomaterials. – 2009. – V. 30. – № 31. – P. 6333–6340.
19. *Xia Z., Ma Q., Li S.* [et al.]. The antifungal effect of silver nanoparticles on *Trichosporon asahii* // Journal of Microbiology, Immunology and Infection. – 2016. – V. 49. – № 2. – P. 182–188.
20. *Mishra S., Singh H.* Silver nanoparticles mediated altered gene expression of melanin biosynthesis genes in *Bipolaris sorokiniana* // Microbiological Research. – 2015. – V. 172. – P. 16–18.
21. *Ribeiro F., Gallego-Urrea J.A., Jurkschat K.* [et al.]. Silver nanoparticles and silver nitrate induce high toxicity to *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Daphnia magna* and *Danio rerio* // Science of the Total Environment. – 2014. – V. 466. – P. 232–241.
22. *Ivask A., Kurvet I., Kasemets K.* [et al.]. Size-dependent toxicity of silver nanoparticles to bacteria, yeast, algae, crustaceans and mammalian cells in vitro // PLoS ONE. – 2014. – V. 9. – № 7. – P. 102–108.
23. *Yin L., Colman B., McGill B.* [et al.]. Effects of silver nanoparticle exposure on germination and early growth of eleven wetland plants // PLoS ONE. – 2012. – V. 7. – № 10. – P. 47–67.

24. *Kuamri M., Ernest V., Mukherjee A.* [et al.]. In Vivo Nanotoxicity Assays in Plant Models // *Nanotoxicity*. – 2012. – V. 926. – P. 399–410.
25. *Song U., Jun H., Waldman B.* [et al.]. Functional analyses of nanoparticle toxicity: a comparative study of the effects of TiO₂ and Ag on tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2013. – V. 93. – P. 60–67.
26. *El-Temsah Y., Joner E.* Impact of Fe and Ag nanoparticles on seed germination and differences in bioavailability during exposure in aqueous suspension and soil // *Environmental Toxicology*. – 2012. – V. 27. – № 1. – P. 42–49.
27. *Patlolla A., Berry A., May L.* [et al.]. Genotoxicity of silver nanoparticles in *Vicia faba*: a pilot study on the environmental monitoring of nanoparticles // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2012. – V. 9. – № 5. – P. 1649–1662.
28. *Mirzajani F., Askari H., Hamzelou S.* [et al.]. Effect of silver nanoparticles on *Oryza sativa* L. and its rhizosphere bacteria // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2013. – V. 88. – P. 48–54.
29. *Sharma P., Bhatt D., Zaidi M.* [et al.]. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea* // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. – 2012. – V. 167. – № 8. – P. 2225–2233.
30. *Vannini C., Domingo G., Onelli E.* [et al.]. Morphological and proteomic responses of *Eruca sativa* exposed to silver nanoparticles or silver nitrate // *PLoS ONE*. – 2013. – V. 8. – № 7. – P. 68–75.
31. *Salama H.* Effects of silver nanoparticles in some crop plants, common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and corn (*Zea mays* L.) // *International Research Journal of Biotechnology*. – 2012. – V. 3. – № 10. – P. 190–197.
32. *Connolly M., Fernandez-Cruz M., Quesada-García A.* [et al.]. Comparative cytotoxicity study of silver nanoparticles (AgNPs) in a variety of rainbow trout cell lines (RTL-W1, RTH-149, RTG-2) and primary hepatocytes // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2015. – V. 12. – № 5. – P. 5386–5405.
33. *Greulich C., Braun D., Peetsch A.* [et al.]. The toxic effect of silver ions and silver nanoparticles towards bacteria and human cells occurs in the same concentration range // *RSC Advances*. – 2012. – V. 2. – № 17. – P. 6981–6987.
34. *Farkas J., Christian P., Gallego-Urrea J.* [et al.]. Uptake and effects of manufactured silver nanoparticles in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) gill cells // *Aquatic Toxicology*. – 2011. – V. 101. – № 1. – P. 117–125.
35. *Massarsky A., Abraham R., Nguyen K.C.* [et al.]. Nanosilver cytotoxicity in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) erythrocytes and hepatocytes // *Comparative Biochemistry and Physiology. Part C: Toxicology and Pharmacology*. – 2014. – V. 159. – P. 10–21.
36. *Chernousova, S., Eppe M.* Silver as antibacterial agent: ion, nanoparticle, and metal // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2013. – V. 52. – № 6. – P. 1636–1653.
37. *Vazquez-Munoz R., Borrego B., Juarez-Moreno K.* [et al.]. Toxicity of silver nanoparticles in biological systems: Does the complexity of biological systems matter? // *Toxicology Letters*. – 2017. – V. 276. – P. 11–20.
38. *Cvjetko P., Milosic A., Domijan A.* [et al.]. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2017. – V. 137. – P. 18–28.
39. *McShan D., Ray C., Yu H.* Molecular Toxicity Mechanism of Nanosilver // *Journal of Food and Drug Analysis*. – 2014. – V. 22. – № 1. – P. 116–127.
40. *Kennedy A.J., Hull M.S., Bednar A.J.* [et al.]. Fractionating nanosilver: importance for determining toxicity to aquatic test organisms // *Environmental Science and Technology*. – 2010. – V. 44. – № 24. – P. 9571–9577.
41. *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 // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. – 2014. – V. 104. – P. 302–309.
42. *Sohn E., Johar S., Kim T.* [et al.]. Aquatic toxicity comparison of silver nanoparticles and silver nanowires // *Bio-Med Research International*. – 2015. – V. 2015. – P. 1–12.
43. *George S., Lin S., Ji Z.* [et al.]. Surface defects on plate-shaped silver nanoparticles contribute to its hazard potential in a fish gill cell line and zebrafish embryos // *ACS Nano*. – 2012. – V. 6. – № 5. – P. 3745–3759.
44. *Asghari S., Johari S., Lee J.* [et al.]. Toxicity of various silver nanoparticles compared to silver ions in *Daphnia magna* // *Journal of Nanobiotechnology*. – 2012. – V. 10. – № 1. – P. 14–25.