

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2020

Соседова Л.М.^{1,2}, Новиков М.А.¹, Титов Е.А.¹

Воздействие наночастиц металлов на почвенный биоценоз (обзор литературы)

¹ФГБНУ «Восточно-Сибирский институт медико-экологических исследований», 665827, Ангарск;²ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», 665835, Ангарск

Обзор литературы содержит анализ и обобщение данных об исследовании эффектов воздействия наночастиц металлов на почву, растения и микробные сообщества. Поглощение наночастиц почвой может неблагоприятно сказываться на состоянии почвенной биоты и растений как её компонентов, представляя серьёзный риск для здоровья человека. Показано, что загрязнение почвы металлами в наноформе носит выраженный негативный характер, заключающийся в нарушении биоценоза, гибели её обитателей и снижении их воспроизводства. При этом степень негативного воздействия определяется видом нанометалла и составом почвенной фауны. Экологические последствия нанотехнологий предложено изучать и по сложным взаимодействиям между растениями и нанопрепаратами. В обзоре представлено новое направление нанотехнологий — способ извлечения наночастиц металлов из растений вследствие их способности к аккумуляции в листьях. Основным преимуществом «зелёного» способа получения перед «химическим» является снижение токсических свойств нанометаллов по сравнению с «химическими» аналогами. Перспективным является создание конъюгатов наночастиц металлов и веществ растительного происхождения. Конъюгаты наночастиц серебра и фенольные группы, содержащиеся в листьях, получили название «растительных антибиотиков» и не имеют побочных эффектов на организм человека. В обзоре представлен неблагоприятный дозозависимый эффект влияния наночастиц TiO₂, CuO и других наночастиц металлов на рост корней, всхожесть семян, наращивание растительной биомассы, видовое разнообразие, антимикробную и ферментативную активность почвенной микрофлоры. Напротив, в некоторых исследованиях подчёркивается перспективность использования наноконструкций таких металлов, как медь, железо, цинк, серебро, на почву и растения в связи с их бактерицидными свойствами. Совместное объединение усилий учёных позволит определить возможные последствия применения наноматериалов и защиту от потенциальной угрозы неконтролируемого развития нанотехнологий для окружающей природной среды. Поиск и отбор источников для обзора осуществлены с использованием открытых баз данных, включая PubMed, Scopus, Google Scholar и РИНЦ, за период с 2005 по 2019 г.

К л ю ч е в ы е с л о в а : обзор; наночастицы металлов; экотоксичность; почвенный биоценоз; растительность; микроорганизмы

Для цитирования: Соседова Л.М., Новиков М.А., Титов Е.А. Воздействие наночастиц металлов на почвенный биоценоз (обзор литературы). Гигиена и санитария. 2020; 99 (10): 1061-1066. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1061-1066>

Для корреспонденции: Соседова Лариса Михайловна, доктор мед. наук, профессор, зав. лаб. биомоделирования и трансляционной медицины ФГБНУ ВСИМЭИ, 665827, Ангарск; профессор кафедры экологии и безопасности деятельности человека ФГБОУ ВО АНГТУ, 665835, Ангарск. E-mail: sosedlar@mail.ru

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. Работа выполнялась по плану НИР в рамках государственного задания.

Участие авторов: концепция, поиск литературы, написание, оформление статьи, ответственность за целостность всех частей статьи – Соседова Л.М.; поиск и перевод литературных источников, написание текста – Новиков М.А.; поиск и перевод литературных источников, написание текста – Титов Е.А.

Поступила 10.07.2020

Принята к печати 18.09.2020

Опубликована 30.11.2020

Larisa M. Sosedova^{1,2}, Michail A. Novikov¹, Evgeniy A. Titov¹

Impact of metal nanoparticles on the ecology of soil biocenosis (literature review)

¹East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation;²Angarsk State Technical University, Angarsk, 665835, Russian Federation

This review contains analysis and synthesis of data on the study of metal nanoparticles' effects on soil, plants, and microbial communities. Absorption of nanoparticles by soil can adversely affect the state of soil biota and plants as its components, posing a serious risk to human health. It is shown soil contamination with metals in nanoform to pronounce negative character, which consists of disrupting the biocenosis, death of its inhabitants, and reducing their reproduction. At the same time, the degree of negative impact was determined by the type of nanometal and composition of soil fauna. It was proposed to study the environmental consequences of nanotechnology by the complex interactions between plants and nano preparation. The review presents a new direction in nanotechnology - the method of extracting metal nanoparticles from plants, due to the ability to accumulate in leaves. The main advantage of the "green" production method over the "chemical" one is the reduction of the toxic properties of nanometals in comparison with the "chemical" analogs. Creation of conjugates of metal nanoparticles and substances of plant origin is promising. Conjugates of silver nanoparticles and phenolic groups contained in leaves are called "plant antibiotics" and do not have side effects on humans. The review presents an adverse dose-dependent effect of the influence of TiO₂, CuO, and other metal nanoparticles on root growth, seed germination, plant biomass growth, species diversity, the antimicrobial and enzymatic activity of soil microflora. Contrary, some studies emphasize the prospect of using nanocomposites of metals such as copper, iron, zinc, silver on soil and plants due to their bactericidal properties. A joint unification of the efforts of scientists will help to determine the possible consequences of

the use of nanomaterials and protect against the potential threat of uncontrolled development of nanotechnology for the natural environment. Search and selection of sources for review were, carried out using open databases, including PubMed, Scopus, Google Scholar, and RSCI, from 2005 to 2019.

Key words: review; metal nanoparticles; ecotoxicity; soil biocenosis; vegetation; microorganisms

For citation: Sosodova L.M., Novikov M.A., Titov E.A. Impact of metal nanoparticles on the ecology of soil biocenosis (literature review). *Gigiena i Sanitaria (Hygiene and Sanitation, Russian journal)*. 2020; 99 (10): 1061-1066. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-10-1061-1066> (In Russ.)

For correspondence: Larisa M. Sosodova, MD, Ph.D., DSci., Professor, Head of Laboratory of biomodeling and translational medicine of the East-Siberian Institute of Medical and Ecological Research, Angarsk, 665827, Russian Federation; Professor of Department of Ecology and Human Activities Safety, Angarsk State Technical University, Angarsk, 665835, Russian Federation. E-mail: sosedlar@mail.ru

Information about the authors:

Sosodova L.M., <https://orcid.org/0000-0003-1052-4601>; Novikov M.A., <https://orcid.org/0000-0002-6100-6292>; Titov E.A., <https://orcid.org/0000-0002-0665-8060>

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgment. The study has no sponsorship and was carried out according to the State plan of research.

Contribution: Sosodova L.M. – conception, literature search, writing, manuscript design, responsibility for the integrity of all parts of an article. Novikov M.A. – search and translation of literary sources, writing text; Titov E.A. – search and translation of literary sources, writing text. All coauthors – approval of the final version of the article, responsibility for the integrity of all parts of the article

Received: July 10, 2020

Accepted: September 18, 2020

Published: November 30, 2020

При регистрации новых загрязняющих веществ в наноформе химическая промышленность сталкивается с серьёзной проблемой: необходимостью токсикологической характеристики и регулирования разрабатываемых и внедряемых в технологические циклы нанопрепаратов и наноматериалов. С учётом лавинообразного возрастания их синтеза вопросы нанобезопасности, оценки риска воздействия приобретают первоочередное значение. Однако система составления паспортов безопасности, классификации опасности химических веществ для предупреждения о возможных негативных эффектах на окружающую среду и определения мер их устранения не имеет ни методов с высокой пропускной способностью, ни альтернативы испытаний на животных, чтобы справиться с этой проблемой. В этой ситуации крайне необходима разработка унифицированных скрининговых методологических подходов к оценке биобезопасности инновационных нанопрепаратов и наноматериалов для объектов окружающей среды [1]. Только в данном случае появится возможность объективной сравнительной оценки экобезопасности наноматериалов и нанопрепаратов [2].

В настоящий момент происходит фактологическое накопление данных о влиянии тех или иных веществ в наноформе на объекты окружающей среды. Исследований в данной области всё ещё недостаточно. Полученные знания о потенциальном риске воздействия наноматериалов для окружающей природной среды в будущем дадут возможность подойти к объективной оценке их экологической безопасности.

В результате производственной деятельности из объектов окружающей среды именно почва считается наиболее вероятным длительным накопителем загрязняющих веществ в наноформе, причём с течением времени содержание их в почвах будет только возрастать. Почвенный биоценоз представляет собой сложную биологическую систему, содержащую минеральные и органические компоненты неживой природы наряду со сложнейшим микробным сообществом. Вместе с тем поглощение наночастиц почвой может неблагоприятно сказываться на состоянии почвенной биоты и растений как её компонентов, нарушая течение нормальных физиологических и биохимических процессов. Попадание наночастиц в любой компонент почвенного биоценоза путём передачи по пищевой цепи представляет серьёзный риск для здоровья человека и животных.

В промышленной наноиндустрии наноконкомпозиты металлов получают всё более широкое распространение, что приводит к повышению концентраций этих элементов в почвах. Исследование вторичной экотоксичности и загрязнения почв наночастицами металлов показало, что данные наночастицы оказывают отрицательное воздействие на почвенную фауну. Предполагается, что токсичность нанометаллов в по-

чве зависит от концентрации их растворённой фракции [3]. Во многих исследованиях использовались различные виды почвенных червей. Выбор модельного организма обусловлен способностью дождевых червей аккумулировать и биотрансформировать ионы металлов, что делает их удобными биоиндикаторами и широко используется для биомониторинга почвенных загрязнений. Также в процессе жизнедеятельности черви пропускают через себя огромное количество почвы, в результате чего загрязнители оказывают на них наибольшее токсическое действие.

Наноконкомпозиты висмута широко используются в получении легкоплавких сплавов, косметических средств и фармакологии. В течение ряда лет висмут широко применялся как нетоксичная альтернатива свинца, что привело к резкому увеличению его производства. Всё это способствовало повышению концентрации висмута и его производных в почве и в водной среде. В экспериментальных исследованиях взрослых дождевых червей подвергали воздействию естественной песчаной почвы, искусственно загрязнённой цитратом висмута. Средние общие концентрации висмута в почве составляли от 75 до 289 мг/кг. Показано, что содержание висмута до 289 мг/кг почвы не оказывает летального эффекта на почвенных червей, а также не приводит к снижению их массы, но способствует снижению функции воспроизводства [4]. Авторами показано, что наличие в почве червей увеличивало биодоступность висмута по сравнению с почвой, в которой черви отсутствовали. Сделано предположение о способности почвенных червей освобождать висмут из связанных органических соединений и вновь возвращать его в почву, а также менять pH почвы. Из-за особенностей питания черви способны накапливать в теле высокую концентрацию наночастиц висмута, при этом характер накопления зависит от вида почвы, её влажности и времени [4].

Наночастицы железа используются в процессе рекультивации почвы в виде химических адсорбентов загрязнителей почвенного покрова. Поэтому оценка токсического действия наночастиц железа на почвенную фауну является довольно актуальным вопросом. Характерной особенностью наноконкомпозитов железа является их быстрое окисление и образование оксидов железа, которые и так распространены в почве. Проведённое исследование показало, что воздействие наночастиц железа в лабораторных условиях вызывало снижение массы тела червей [5]. При дозировке наночастицами железа 300 мг на килограмм почвы отмечалась гибель почвенной фауны. Наиболее значимые изменения наблюдались при дозировке в 500 мг/кг. В дозе 1000 мг/кг отмечалась 100% гибель животных. Установлено, что наночастицы железа приводили к резкому снижению массы тела червей и нарушению функции воспроизводства. Одной из особенностей

токсического действия нанокomпозитов железа являлось снижение выраженности процесса в отдалённом периоде.

Наночастицы серебра составляют примерно 25% наноматериалов, используемых в коммерческой продукции. В связи с доказанными антимикробными свойствами нанокomпозиты серебра входят в состав пищевых продуктов, косметических средств и средств медицинского назначения. В результате нанокomпозиты серебра в большом количестве поступают в сточные воды и промышленные отходы, что вызывает накопление данных нанокomпозитов в водной и почвенной среде. При этом ионы серебра являются одними из наиболее токсичных форм тяжёлых металлов. Исследование влияния нанокomпозита серебра на почвенных червей в лабораторных условиях показало снижение массы тела и снижение функции их воспроизводства, гибель животных наступает уже при концентрации 100 мг/кг почвы [6].

Наночастицы меди, обладая антимикробными свойствами, имеют широкое применение в производстве, например, в виде консерванта в деревообрабатывающей промышленности, пищевых продуктах и средствах медицинского назначения. Наночастицы меди способны нарушать иммунный статус почвенных червей, вызывая развитие выраженной фагоцитарной реакции, нарушая репродуктивную функцию почвенных червей и, как результат, приводить к снижению их популяции. Установлено, что наночастицы меди в концентрации 50 мг/кг почвы уже способны вызывать гибель почвенной фауны и снижение функции воспроизведения [7, 8]. Оценка состояния почвенно-микробной биомассы является чувствительным индикатором нарушения почвенного микробиоценоза. Обнаружено, что наночастицы CuO высокотоксичны для почвенных бактерий, снижается их общая численность, особенно бактерий рода *Azotobacter* [9]. При искусственном загрязнении почвы наночастицами CuO и ZnO по 1000 мг/кг установлено, что активность почвенных ферментов и биомасса растений в наибольшей степени ингибируются CuO [10, 11]. Лабораторное исследование показало, что загрязнение серопесков наночастицами меди, никеля и цинка ухудшает их биологические свойства: снижаются общая численность бактерий и обилие бактерий рода *Azotobacter*, активность каталазы, дегидрогеназ, всхожесть семян и длина корней редиса [12]. Наночастицы меди нарушают природную способность почвы к самоочищению, влияя на биохимическую характеристику биоты, тем самым снижая содержание питательных веществ для растений, в частности гороха [13]. Исследование влияния наночастиц Co₃O₄, NiO, CuO и ZnO на биологические свойства почвы проводили на чернозёме обыкновенном (Россия, Ростов-на-Дону). Исследовали воздействие различных концентраций загрязняющих веществ в зависимости от содержания их в почве – 3, 10, 30 фонов. Использовали наночастицы Co₃O₄, NiO, CuO и ZnO размером < 50 нм, TiO₂ – < 100 нм. Сравнительный анализ экотоксичности наночастиц металлов показал, что наиболее сильным воздействием на почвенную биоту обладают наночастицы меди, наименьшим – никеля. Более чувствительны к воздействию наночастиц металлов микробиологические и фитотоксические свойства, в свою очередь ферментативная активность остается более стабильной [14].

При изучении воздействия наночастиц Al₂O₃ на почвенный микробиоценоз получен прямой дозозависимый эффект с возрастанием бактерицидного действия наночастиц на почвенную и кишечную микрофлору кишечника красного калифорнийского червя (*Eisenia foetida*). При этом наблюдались адаптационные способности антиоксидантной системы *E. foetida* на фоне внесения в почву наночастиц Al₂O₃. В то же время выявленное обеднение почвенной биоты на фоне введения наночастиц алюминия свидетельствует о необходимости продолжения исследований [15].

Таким образом, загрязнение почвы металлами в наномасштабе носит выраженный негативный характер, заключающийся в нарушении биоценоза, гибели её обитателей и

снижении их воспроизводства. Данные изменения имеют дозную зависимость. При этом степень негативного воздействия определяется видом нанометалла и составом почвенной фауны. Наиболее выраженной токсичностью для почвенных червей обладают наночастицы меди и серебра. Для изучения экологического риска и степени воздействия нанометаллов на почвенный биоценоз необходимо проводить исследования не только в лабораторных условиях, но и в естественных [16].

Не только почва, но и растительный мир может подвергаться воздействию наноматериалов. В настоящее время имеются противоречивые данные о механизмах их токсичности. Кроме того, не хватает информации о сложных взаимодействиях и преобразованиях, которым наночастицы подвергаются в естественной среде, например, при взаимодействии с растениями [17].

Новым направлением нанотехнологий является способ извлечения наночастиц металлов из растений вследствие способности к аккумуляции в листьях [19]. Перспективность данного метода лежит в основе сокращения загрязнённости почвенного покрова токсичными наночастицами металлов путём извлечения их из листьев растений. Основным преимуществом «зелёного» способа получения перед «химическим» является снижение токсических свойств нанометаллов по сравнению с «химическими» аналогами. Ещё одним преимуществом является совокупное действие наночастиц металлов и веществ растительного происхождения. Так, исследования, проведённые на *Mukia Maderaspatana*, показали, что фенольные группы, содержащиеся в листьях этого растения, работают стабилизаторами и восстановителями наночастиц серебра, а в совокупности с ними усиливают свои антиоксидантные свойства. Предположительно подобные конъюгаты станут широко востребованы в фармакологии [20]. Подобные же исследования проведены для *Pongamia Pinnata* и *Carica Papaya* [21]. Данные растения также способны аккумулировать наночастицы серебра, а содержащиеся в них соединения значительно усиливают антимикробные и антиоксидантные свойства наночастиц. Подобные конъюгаты наночастиц серебра и компонентов растений получили название «растительных антибиотиков» и не имеют побочных эффектов на организм человека [22].

В некоторых исследованиях подчёркивается перспективность использования нанокomпозитов таких металлов, как медь, железо, цинк, серебро, на почву и растения в связи с их бактерицидными свойствами [23, 24]. Положительный эффект получен в сельском хозяйстве для химического обеззараживания посевных семян в целях снижения потерь посевного фонда [25, 26]. Установлено, что обработка семян нанопрепаратами серебра при низких концентрациях никак не влияла на их всхожесть и может применяться в качестве антисептического средства при их хранении. Более того, низкие концентрации наночастиц серебра (0,001%) вызывали увеличение роста корневой системы растений, что, как предполагают авторы, обусловлено способностью серебра катализировать метаболические реакции [27]. При увеличении концентрации нанокomпозит серебра, наоборот, приобретает фитотоксические свойства: ингибирует прорастание семян, затормаживает рост проростков. Возможно, это связано с тем, что жидкая среда паренхимы семенной оболочки облегчает поступление наночастиц серебра к зародышевой камере. При прорастании семян основная концентрация серебра наблюдается в корневой системе проростка. При увеличении концентрации отмечается нарушение в развитии корневых волосков зоны всасывания, разрушается корневой чехлик, клетки эпидермиса и кортекса корня вакуолизованы [28]. Предполагается, что фитотоксические свойства наночастиц серебра связаны либо непосредственно с токсическим действием нанокomпозита, либо опосредованно путём изменения метаболической активности корня или развития в ткани оксидативного стресса. При этом фитотоксичность

также зависит и от размера наночастицы, что, по-видимому, связано с тем, что более мелким частицам легче проникать в ткани растения [29].

Определённый интерес вызывают исследования воздействия на растения наночастиц оксида титана в связи с чрезвычайно широким применением данного материала в различных аспектах жизнедеятельности человека. Проведённые исследования показывают, что данные наночастицы способны накапливаться в растениях в довольно высоких концентрациях, в основном в корневой системе, но при этом не отмечено какого-либо токсического действия оксида титана на растения [30]. При обработке наночастицами оксида титана семян редиса они никак не повлияли на всхожесть семян, более того, наличие данных наночастиц в семенах позволяет снизить степень токсического действия на них кадмия [17]. Установлен дозозависимый эффект влияния наночастиц TiO на ранний рост корней, связанных с *Brassica juncea* L. Ингибирующее действие было максимальным при дозе TiO₂ 500 мг/л. Однако добавление гумата Le-PhK 5 мг/л приводило к снижению токсичных свойств. Авторы делают вывод об устранении ингибирующего действия наночастиц титана гумусовыми веществами, являющимися естественными компонентами почвы, необходимыми для роста высших растений [31].

Неблагоприятное действие наночастиц меди показано в многочисленных лабораторных исследованиях. Оксид меди в наноформе тормозит рост рассады кукурузы [32], огурца [33], отрицательно влияет на всхожесть семян редиса, салата [34]. При воздействии наночастиц меди и никеля снижается энергия прорастания семян пшеницы *T. Vulgare* [35]. Установлено, что наночастицы меди концентрируются на поверхности корня растения *Iris pseudoacorus* [36].

Взаимодействия между растениями и нанопрепаратами могут пролить свет на экологические последствия нанотехнологий. Установлено, что растения обладают и механизмами регуляции содержания в них наночастиц металлов. Так, исследование, проведённое на рисе, показало, что поглощение и распределение наночастиц золота в рисе в отсутствие или в присутствии одной из двух аминокислот: аспарагиновой кислоты или лизин, действующих как компоненты экссудатов корней риса, зависело от электрического взаимодействия между наночастицами и каждой аминокислотой. Авторы делают вывод, что ряд аминокислот, например, аспарат и лизин, способны регулировать накопление наночастиц металла в оболочке семян и корнях растения. Механизм подобной регуляции требует дальнейшего изучения [18]. В исследованиях А.М. Коротковой и соавт. установлено, что мишенью воздействия наночастиц металлов чаще всего является корневая система растений, что и определяет интерес к изучению фитотоксичности наноматериалов в клетках этой части растений. Авторами показана избирательность действия наночастиц меди и никеля на активность антиоксидантной системы растений: медь вызывает избирательное накопление перекиси водорода и гидроксильных радикалов, а никель – гидроксильных радикалов [36].

В целом наночастицы металлов могут обладать как положительным, так и отрицательным действием на растения. Довольно перспективной является способность растений накапливать в тканях наночастицы металлов, что может быть использовано при разработке лекарств растительного происхождения, а также в качестве инструмента утилизации наночастиц из окружающей среды. Не менее интересным является открытие механизмов регуляции растениями содержания в них наночастиц металлов. Способность наночастиц проникать в ткани растений, накапливаясь в них, напрямую зависит от агрегатного состояния. В растворённом виде они более биодоступны, а значит, и возрастает их фитотоксичность. Наряду с растворимостью и размерностью наночастиц биодоступность определяется разнообразием естественных почвенных свойств (кислотность, наличие катионов, органических веществ и др.) [3].

Широко известны антимикробные свойства наночастиц металлов, используемые в медицинских целях, однако токсичность наночастиц в отношении микробов окружающей среды мало изучена. Почвенные микробы играют важную роль в круговороте элементов (углерода, серы, азота и т. д.), в то время как другие разлагают загрязнители и способствуют росту растений. Вместе с тем неконтролируемое накопление наночастиц в окружающей среде может иметь негативные последствия, в первую очередь для эффективности полезных микробов [37, 38]. Учитывая присутствие наночастиц в почве, важно изучить их влияние на биоразнообразие почв [39]. Показана антимикробная активность наночастиц Ag, CuO и ZnO против полезного почвенного микроба *Pseudomonas putida* KT2440. Токсичность была обнаружена в конструкции KT2440, содержащей плазмиду, несущую luxA/luxR репортерные гены. Препараты nano-Ag, -CuO и -ZnO вызвали быструю дозозависимую потерю светового потока в биосенсоре. Гибель клеток сопровождалась потерей активности Lux при обработке nano-Ag и -CuO, но с -ZnO лечение было скорее бактериостатическим, чем бактерицидным [40]. В эксперименте исследовали влияние их сублетальных уровней на продукцию клетками бактериальных метаболитов сидерофоров пиовердина, которая оценивалась флуориметрическим методом и экспрессией генов биосинтеза и экспорта. Выявлено ингибирование экспрессии гена наночастицами CuO [41]. Авторы предполагают, что агрегация наночастиц в более крупные частицы, возможно, из-за факторов, присутствующих в окружающей среде, может снизить их нецелесообразную антимикробную активность. Антибактериальный потенциал наночастиц оксидов металлов TiO₂ и ZnO определяли по кинетике роста *P. aeruginosa*, *P. fluorescens* и *B. amyloliquefaciens*. Значительное снижение жизнеспособности клеток на основании измерений оптической плотности наблюдалось при обработке увеличивающимися концентрациями наночастиц [42]. Почвы, собранные с лугов Калифорнии, подвергались воздействию различных доз наночастиц TiO₂ (0; 0,5; 1 и 2 мг г (-1) почвы) и ZnO (0,05; 0,1 и 0,5 мг г (-1) почвы) более 60 дней. Воздействие на микробную биомассу почвы оценивали по субстрат-индуцированному дыханию и общей экстрагируемой почвенной ДНК. Влияние на состав бактериального сообщества оценивали с помощью анализа полиморфизма длины концевой рестрикционного фрагмента (T-RFLP). Оба типа наночастиц изменили состав бактериального сообщества почвы. Эффект nano-ZnO был сильнее, чем у nano-TiO₂, о чём свидетельствуют более низкий уровень ДНК и более сильные сдвиги в составе бактериального сообщества для nano-ZnO при одинаковой концентрации воздействия (0,5 мг г (-1) почвы) [43]. Предполагается, что морфология наночастиц ZnO может влиять на их токсичность также из-за различной растворимости в ионных формах внутри клеток и в производстве активных форм кислорода [44].

При инкубации почвы с добавками nano-TiO₂ в диапазоне водных потенциалов в течение 288 дней установлены сдвиги бактериального сообщества, характеризующиеся полиморфизмом длины терминального рестрикционного фрагмента (T-RFLP). Обнаружено, что nano-TiO₂ изменяет состав бактериального сообщества и снижает его разнообразие [45]. Негативный эффект в отношении почвенного бактериального сообщества показан и при воздействии наночастиц CuO и Fe₃O₄ [46]. В этом исследовании два типа наночастиц оксида металлов, CuO и Fe₃O₄, были смешаны с двумя типами почвы (суглинок и дёрново-карбонатные) и было оценено влияние наночастиц на различные свойства почвы. Установлено, что под влиянием наночастиц CuO происходят значительные изменения в составе бактериального сообщества и трансформация микроскопических свойств двух типов почвы. Обнаружено, что наночастицы не изменяют общее количество органических материалов в почве или общий органический углерод в почвенной вытяжке; однако трёхмерная флуоресцентная спектроскопия пока-

зала изменения в гуминовых веществах. В другом исследовании этих же авторов эффекты воздействия наноразмерных (< 50 нм) частиц оксида меди (CuO) и магнетита (Fe₃O₄) на бактериальное сообщество оценивались на различных типах почв: супесчаный (Bet-Dagan) и супесчаный (Yatir) при двух концентрациях ENP (1 и 0,1%). Результаты показывают, что бактериальное сообщество в почве Bet-Dagan было более восприимчивым к изменениям из-за воздействия по сравнению с почвой Yatir. В частности, CuO оказал сильное влияние на гидролитическую активность бактерий, окислительный потенциал, состав и размер сообщества в почве Bet-Dagan. Fe₃O₄ изменил гидролитическую активность и состав бактериального сообщества в первом образце почвы, но не повлиял на бактериальное сообщество почвы Yatir. Эти результаты показывают, что оба вида наночастиц потенциально вредны для почвенной среды. Авторы предположили, что глинистая фракция и органическое вещество в различных почвах взаимодействуют с наночастицами и снижают их токсичность [47].

Показано также, что металлы и оксиды металлов могут вызывать модификации ферментативной активности микробов в почве, которые являются биоиндикаторами качества и здоровья почвы. Активность почвенных протеаз, каталазы и пероксидазы подавлялась в присутствии наночастиц титана и цинка, не влияя на активность уреазы [48].

Сообщается также, что наночастицы металлов и оксидов металлов оказывают более сильное токсическое воздействие на почвенные микроорганизмы, чем фуллерены и углеродные нанотрубки, даже при очень низких концентрациях (< 1 мг/кг) [49].

Таким образом, ещё совсем недавно никто даже не предполагал, что нанотехнологии в промышленности будут иметь столь обширное практическое применение. Однако при этом возникают определённые опасения и достаточно обоснованная тревога по поводу возможного неблагоприятного воздействия продукции нанотехнологий на окружающую среду и человека. Почва представляет собой сложную и динамичную биологическую систему, в которой обитают многочисленные организмы, которые преобразуют органические и неорганические соединения и связанные с ними питательные вещества из одной формы в другую. Наночастицы металлов, накапливающиеся в почвенных экосистемах, представляют угрозу для растений и живых организмов, поэтому важно понимать поведение наночастиц в почве для оценки риска нарушений экологии почвенного биоценоза. Только совместное объединение усилий учёных и исследователей всех стран позволит определить возможные последствия их применения и защиту от потенциальной угрозы неконтролируемого развития нанотехнологий для окружающей природной среды.

Литература

(п.п. 1, 2, 4–11, 13, 14, 17–24, 27–34, 36–49 см. References)

3. Гладкова М.М., Терехова В.А. Инженерные наноматериалы в почве: источники поступления и пути миграции. *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2013; (3): 34–9.
12. Тимошенко А.Н., Колесников С.И., Казеев К.Ш., Акименко Ю.В. Изменение биологических показателей серопесков после загрязнения наночастицами Cu, Zn и Ni. *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2019; (2): 106–11. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-2-106-111>
15. Яшуева Е.В., Сизова Е.А., Гавриш И.А., Лебедев С.В., Каюмов Ф.Г. Действие наночастиц Al₂O₃ на почвенный микробиоценоз, состояние антиоксидантной системы и микрофлору кишечника красного калифорнийского червя (*Eisenia foetida*). *Сельскохозяйственная биология*. 2017; 52(1): 191–9. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.191rus>
16. Цицушвили В.С., Минкина Т.М., Невидомская Д.Г., Раджпут В.Д., Манджиева С.С., Сушкова С.Н. и соавт. Воздействие наночастиц меди на растения и почвенные микроорганизмы (обзор литературы). *Вестник аграрной науки Дона*. 2017; (3): 93–100.
25. Баутин В.М., ред. *Нанотехнологии и наноматериалы в сельском хозяйстве*. М.; 2008.
26. Федоренко В.Ф., Ерохин М.Н., Балабанов В.И., Буклагин Д.С., Голубев И.Г., Ищенко С.А. *Нанотехнологии и наноматериалы в агропромышленном комплексе*. М.; 2011.
35. Короткова А.М., Кван О.В., Быкова Л.А., Кудрявцева О.С., Виденева Т.С., Вишняков А.И. Сравнительный анализ морфологических особенностей проростков *Triticum vulgare* после воздействия наночастиц металлов. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018; 80(3): 190–5. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-190-195>

References

1. Corsi I., Winther-Nielsen M., Sethi R., Punta C., Della T. C., Libralato G., et al. Ecofriendly nanotechnologies and nanomaterials for environmental applications: Key issue and consensus recommendations for sustainable and ecosafe nanoremediation. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 154: 237–44. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.02.037>
2. George S., Xia T., Rallo R., Zhao Y., Ji Z., Lin S., et al. Use of a high-throughput screening approach coupled with in vivo zebrafish embryo screening to develop hazard ranking for engineered nanomaterials. *ACS Nano*. 2011; 5(3): 1805–17. <https://doi.org/10.1021/nn102734s>
3. Gladkova M.M., Terekhova V.A. Engineered nanomaterials in soil: source of entry and migration pathways. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2013; (3): 34–9. (in Russian)
4. Omouria Z., Hawarib J., Fourniera M., Robidouxa P.Y. Bioavailability and chronic toxicity of bismuth citrate to earthworm *Eisenia andrei* exposed to natural sandy soil. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 147: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.018>
5. El-Temsah Y.S., Joner E.J. Ecotoxicological effects on earthworms of fresh and aged nano-sized zero-valent iron (nZVI) in soil. *Chemosphere*. 2012; 89(1): 76–82.
6. Brami C., Glover A.R., Butt K.R., Lowe C.N. Effects of silver nanoparticles on survival, biomass change and avoidance behaviour of the endogeic earthworm *Allolobophora chlorotica*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017; 141: 64–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.015>
7. Gautama A., Raya A., Mukherjee S., Dasa S., Palb K., Dasc S., et al. Immunotoxicity of copper nanoparticle and copper sulfate in a common Indian earthworm. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 148: 620–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.008>
8. Gomes S.I.L., Murphy M., Nielsen M.T., Kristiansen S.M., Amorim M.J.B., Scott-Fordsmand J.J. Cu-nanoparticles ecotoxicity – explored and explained? *Chemosphere*. 2015; 139: 240–5. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.045>
9. Concha-Guerrero S.I., Souza Brito E.M., Piñón-Castillo H.A., Tarango-Rivero S.H., Caretta C.A., Luna-Velasco A., et al. Effect of CuO nanoparticles over isolated Bacterial strains from agricultural soil. *J. Nanomaterials*. 2014; 2014: 148743. <https://doi.org/10.1155/2014/148743>
10. Joskoo I., Oleszczuk P., Futa B. The effect of inorganic nanoparticles (ZnO, Cr₂O₃, CuO and Ni) and their bulk counterparts on enzyme activities in different soils. *Geoderma*. 2014; 232–234: 528–37. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.012>
11. Kim S., Sin H., Lee S., Lee I. Influence of metal oxide particles on soil enzyme activity and bioaccumulation of two plants. *J. Microbiol. Biotechnol.* 2013; 23(9): 1279–86. <https://doi.org/10.4014/jmb.1304.04084>
12. Timoshenko A.N., Kolesnikov S.I., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V. The change in the biological indicators of gray sand after contamination with nanoparticles Cu, Zn and Ni. *Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki*. 2019; (2): 106–11. <https://doi.org/10.23683/0321-3005-2019-2-106-111> (in Russian)
13. Janvier C., Villeneuve F., Alabouvette C., Edel-Hermann V., Mateille T., Steinberg C. Soil health through soil disease suppression: which strategy from descriptors to indicators? *Soil Biol. Biochem.* 2007; 39(1): 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.07.001>
14. Kolesnikov S.I., Timoshenko A.N., Kazeev K.Sh., Akimenko Yu.V., Myasnikova M.A. Ecotoxicity of copper, nickel, and zinc nanoparticles assessment on the basis of biological indicators of chernozems. *Eurasian Soil Sc.* 2019; 52(8): 982–7. <https://doi.org/10.1134/S106422931908009X>

15. Yausheva E.V., Sizova E.A., Gavriush I.A., Lebedev S.V., Kayumov F.G. Effect of Al_2O_3 nanoparticles on soil microbiocenosis, antioxidant status and intestinal microflora of red Californian worm (*Eisenia foetida*). *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*. 2017; 52(1): 191–9. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.191rus> (in Russian)
16. Tsitsuashvili V.S., Minkina T.M., Nevidomskaya D.G., Radzhput V.D., Mandzhieva S.S., Sushkova S.N., et al. Effects of copper nanoparticles on plants and soil microorganisms (literature review). *Vestnik agrarnoy nauki Dona*. 2017; (3): 93–100. (in Russian)
17. Manesh R.R., Grassi G., Bergami E., Marques-Santos L.F., Faleri C., Liberatori G., et al. Co-exposure to titanium dioxide nanoparticles does not affect cadmium toxicity in radish seeds (*Raphanus sativus*). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 148: 359–66. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.051>
18. Ye X., Li H., Wang Q., Chai R., Ma C., Gaoa H., et al. Influence of aspartic acid and lysine on the uptake of gold nanoparticles in rice. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 148: 418–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.056>
19. Manquian-Cerda K., Cruces E., Rubio M.A., Reyes C., Arancibia-Miranda N. Preparation of nanoscale iron (oxide, oxyhydroxides and zero-valent) particles derived from blueberries: Reactivity, characterization and removal mechanism of arsenate. *Ecotoxicol. Environmen. Saf.* 2017; 145: 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.004>
20. Harshiny M., Matheswaran M., Arthanareeswaran G., Kumaran S., Rajasree S. Enhancement of antibacterial properties of silver nanoparticles-ceftriaxone conjugate through *Mukia maderaspatana* leaf extract mediated synthesis. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015; 121: 135–41. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.04.041>
21. Sathiyi Priya R., Geetha D., Ramesh P.S. Antioxidant activity of chemically synthesized AgNPs and biosynthesized *Pongamia pinnata* leaf extract mediated AgNPs – A comparative study. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2016; 134(Pt. 2): 308–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.07.037>
22. Kokila T., Ramesh P.S., Geetha D. Biosynthesis of AgNPs using *Carica Papaya* peel extract and evaluation of its antioxidant and antimicrobial activities. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2016; 134(Pt. 2): 467–73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.021>
23. Bondarenko O., Juganson K., Ivask A., Kasemets K., Mortimer M., Kahru A. Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: a critical review. *Arch. Toxicol.* 2013; 87(7): 1181–200. <https://doi.org/10.1007/s00204-013-1079-4>
24. Padmavathy N., Vijayaraghavan R. Enhanced bioactivity of ZnO nanoparticles – an antimicrobial study. *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2008; 9(3): 035004. <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/3/035004>
25. Bautin V.M., ed. *Nanotechnologies and Nanomaterials in Agriculture [Nanotekhnologii i nanomaterialy v sel'skom khozyaystve]*. Moscow; 2008. (in Russian)
26. Fedorenko V.F., Erokhin M.N., Balabanov V.I., Buklagin D.S., Golubev I.G., Ischenko S.A. *Nanotechnologies and Nanomaterials in the Agro-Industrial Complex [Nanotekhnologii i nanomaterialy v agropromyshlennom komplekse]*. Moscow; 2011. (in Russian)
27. Barabanov P.V., Gerasimov A.V., Blinov A.V., Kravtsov A.A., Kravtsov V.A. Influence of nanosilver on the efficiency of *Pisum sativum* crops germination. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2018; 147: 715–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.024>
28. Amoaghaie R., Reza Saeri M., Azizi M. Synthesis, characterization and biocompatibility of silver nanoparticles synthesized from *Nigella sativa* leaf extract in comparison with chemical silver nanoparticles. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2015; 120: 400–8. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.06.025>
29. Cvjetko P., Milošić A., Domijan A.M., Vinković Vrček I., Tolić S., Štefanić P.P., et al. Toxicity of silver ions and differently coated silver nanoparticles in *Allium cepa* roots. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2017; 137: 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.11.009>
30. Foltete A.S., Masfaraud J.F., Bigorgne E., Nahmani J., Chaurand P., Botta C., et al. Environmental impact of sunscreen nano materials: Ecotoxicity and genotoxicity of altered TiO_2 nanocomposites on *Vicia faba*. *Environ. Pollut.* 2011; 159(10): 2515–22. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.06.020>
31. Gladkova M.M., Terekhova V.A. Phytotoxicity of nano- TiO_2 and effect of humus preparation. In: *SETAC 6th World Congress/SETAC Europe 22nd Annual Meeting*. Berlin; 2012: 269–70. Available at: http://berlin.setac.eu/embed/Berlin/Abstractbook2_Part1.pdf
32. Wang Z., Zhao J., Liu X., Feng W., White J.C., Xing B., et al. Xylem- and phloem-based transport of CuO nanoparticles in maize (*Zea mays* L.). *Environ. Sci. Technol.* 2012; 46(8): 4434–41. <https://doi.org/10.1021/es204212z>
33. Kim S., Lee S., Lee I. Alteration of phytotoxicity and oxidant stress potential by metal oxide nanoparticles in *Cucumis sativus*. *Water Air. Soil Pollut.* 2012; 223: 2799–806. <https://doi.org/10.1007/s11270-011-1067-3>
34. Wu S.G., Huang L., Head J., Chen D.R., Kong I.C., Tang Y.J. Phytotoxicity of metal oxide nanoparticles is related to both dissolved metals ions and adsorption of particles on seed surfaces. *J. Petrol. Environ. Biotechnol.* 2012; 3(4): 126. <https://doi.org/10.4172/2157-7463.1000126>
35. Korotkova A.M., Kvan O.V., Bykova L.A., Kudryavtseva O.S., Videneeva T.S., Vishnyakov A.I. Comparative analysis of morpho-physiological features of triticum vulgare sprouts after exposure to metal nanoparticles. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*. 2018; 80(3): 190–5. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2018-3-190-195> (in Russian)
36. Manceau A., Nagy K.L., Marcus M.A., Lanson M., Geoffroy N., Jacquet T., et al. Formation of metallic copper nanoparticles at the soil-root interface. *Environ. Sci. Technol.* 2008; 42(5): 1766–72. <https://doi.org/10.1021/es072017o>
37. Parada J., Rubilar O., Fernández-Baldo M.A., Bertolino F.A., Durán N., Seabra A.B. The nanotechnology among US: are metal and metal oxides nanoparticles a nano or mega risk for soil microbial communities? *Crit. Rev. Biotechnol.* 2019; 39(2): 157–72. <https://doi.org/10.1080/07388551.2018.1523865>
38. Shrestha B., Acosta-Martinez V., Cox S.B., Green M.J., Li S., Cañas-Carrell J.E. An evaluation of the impact of multi-walled carbon nanotubes on soil microbial community structure and functioning. *J. Hazard. Mater.* 2013; 261: 188–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.07.031>
39. Bondarenko O., Juganson K., Ivask A., Kasemets K., Mortimer M., Kahru A. Toxicity of Ag, CuO and ZnO nanoparticles to selected environmentally relevant test organisms and mammalian cells in vitro: a critical review. *Arch. Toxicol.* 2013; 87(7): 1181–200. <https://doi.org/10.1007/s00204-013-1079-4>
40. Gajjar P., Pettee B., Britt D.W., Huang W., Johnson W.P., Anderson A.J. Antimicrobial activities of commercial nanoparticles against an environmental soil microbe, *Pseudomonas putida* KT2440. *J. Biol. Eng.* 2009; 3: 9. <https://doi.org/10.1186/1754-1611-3-9>
41. Dimkpa C., Mclean J., Anderson A. CuO and ZnO nanoparticles differently affect the secretion of fluorescent siderophores in the beneficial root colonizer, *Pseudomonas chlororaphis* O6. *Nanotoxicology*. 2012; 6(6): 635–42. <https://doi.org/10.3109/17435390.2011.598246>
42. Harris Z., Ahmad I. Impact of metal oxide nanoparticles on beneficial soil microorganisms and their secondary metabolites. *Int. J. Life Sci. Scient. Res.* 2017; 3(3): 1020–30. <https://doi.org/10.21276/ijlssr.2017.3.3.10>
43. Ge Y., Schimel J.P., Holden P.A. Evidence for negative effects of TiO_2 and ZnO nanoparticles on soil bacterial communities. *Environ. Sci. Technol.* 2011; 45(4): 1659–64. <https://doi.org/10.1021/es103040t>
44. Sirelkhatim A., Shahrom M., Azman S., Noor H.M.K., Chuo A.L., Siti K.M.B., et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Micro. Nano. Lett.* 2015; 7(3): 219–42. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>
45. Ge Y., Priester J.H., Van De Werfhorst L.C., Schimel J.P., Holden P.A. Potential mechanisms and environmental controls of TiO_2 nanoparticle effects on soil bacterial communities. *Environ. Sci. Technol.* 2013; 47(24): 14411–7. <https://doi.org/10.1021/es403385c>
46. Ben-Moshe T., Frenk S., Dror I., Minz D., Berkowitz B. Effects of metal oxide nanoparticles on soil properties. *Chemosphere*. 2013; 90(2): 640–6. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.018>
47. Frenk S., Ben-Moshe T., Dror I., Berkowitz B., Minz D. Effect of metal oxide nanoparticles on microbial community structure and function in two different soil types. *PLoS One*. 2013; 8(12): e84441. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0084441>
48. Du W.C., Sun Y.Y., Ji R., Zhu J.G., Wu J.C., Guo H.Y. TiO_2 and ZnO Nanoparticles negatively affect wheat growth and soil enzyme activities in agricultural soil. *J. Environ. Monit.* 2011; 13(4): 822–8. <https://doi.org/10.1039/c0em00611d>
49. Simonin M., Richaume A. Impact of engineered nanoparticles on the activity, abundance, and diversity of soil microbial communities: a review. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2015; 22(18): 13710–23. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4171-x>