

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 631.4:577.4:502.7

### ИНЖЕНЕРНЫЕ НАНОМАТЕРИАЛЫ В ПОЧВЕ: ИСТОЧНИКИ ПОСТУПЛЕНИЯ И ПУТИ МИГРАЦИИ\*

М.М. Гладкова, В.А. Терехова

В обзоре анализируются современные проблемы и пути распространения инженерных наноматериалов в окружающей среде, прежде всего, в почвах и сопряженных средах (водной и воздушной). Рассмотрены источники непреднамеренного и преднамеренного поступления наночастиц в природные комплексы. Акцентируется внимание на проблеме биодоступности инженерных наноматериалов в почве в связи с вариабельностью условий их нахождения.

*Ключевые слова:* наноматериалы, поллютант, токсичность, миграция, почвы.

#### Введение

Последние достижения в области нанотехнологий и соответствующее увеличение использования наноматериалов (НМ) во многих отраслях индустрии, а также в производстве потребительских товаров неизбежно ведет к их рассеиванию в окружающей среде (ОС). Очевидно, что такое широкое внедрение в нашу жизнь и распространение наночастиц (НЧ), накопление в природных средах дает основание рассматривать их как особый вид загрязняющих веществ. Специалисты приходят к выводу, что процессы переноса наночастиц с воздушными и водными потоками, их накопление в почве, воде, донных отложениях значительно отличаются от поведения частиц более крупного размера [5, 7, 11]. Активное развитие работ по анализу инженерных наноматериалов в природных средах способствует прояснению следующих вопросов: каковы пути их распространения, сохраняют ли искусственные НМ свои свойства (размер, оригинальную структуру, реакционную способность) в водных, воздушных, почвенных и осадочных объектах, каковы последствия распространения наночастиц в жидкой среде, в чем различия в воздействиях НЧ и молекулярных и атомных форм того же материала на биоту в водных и почвенных условиях?

В литературе можно встретить несколько определений наноматериалов и разные варианты их классификации [6, 24]. Общепринятым признаком, характеризующим принадлежность объектов к наноматериалам, считается размерность составляющих их частиц в интервале 1–100 нм хотя бы в одном измерении. Под это определение подходят как природные (ультрадисперсные частицы в воздухе, биологические объекты — вирусы и т.п.), водные и почвенные коллоиды, так и сконструированные с помощью нанотехнологий материалы.

Почвенные коллоиды изучаются на протяжении многих десятилетий. Это прежде всего наночастицы в составе глины, органических веществ, оксиды железа и другие минералы, играющие важную роль в биогеохимических процессах. Особое внимание уделяется анализу их влияния на почвообразование, изменение структуры почв [12].

**Классы инженерных наноматериалов.** Спектр продуктов современных нанотехнологий велик и может быть представлен разными классами в соответствии с их физико-химическими особенностями, составом и формой. Классы наноматериалов представляют следующим образом: 1) углеродсодержащие — фуллерены, многослойные и однослойные нанотрубки, графены, наноалмазы; 2) металлсодержащие — оксиды металлов, такие как диоксид титана ( $\text{TiO}_2$ ), оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), диоксид церия ( $\text{CeO}_2$ ) и др.; 3) квантовые точки (КТ) — полупроводниковые нанокристаллы, имеющие реактивное ядро из металлов или полупроводников (селенид кадмия ( $\text{CdSe}$ ), теллурид кадмия ( $\text{CdTe}$ ), фосфид индия ( $\text{InP}$ ) или селенид цинка ( $\text{ZnSe}$ ), которое защищено от окисления оболочкой (диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ) или монослой  $\text{ZnS}$ ); 4) инертные металлы — железо, серебро и золото (при этом отмечают, что наиболее распространенными в потребительской сфере являются наноматериалы с частицами серебра); 5) дендримеры, или многофункциональные полимеры, размером, структурой и молекулярной массой которых можно управлять [24].

Исследование источников поступления и путей распространения инженерных НМ в природных средах представляет одну из актуальных экологических и экотоксикологических проблем современности.

**Источники поступления наночастиц в окружающую среду** можно разделить на природные и техногенные. Природные процессы были и являются

\* Работа выполняется при поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Живая природа: современное состояние и проблемы развития».

источником поступлений наноматериалов в окружающую среду на протяжении тысячелетий. К ним относятся лесные пожары, песчаные бури, пыль, взмученные воды, образование аэрозолей, кластеризация в газах, вулканические выбросы, соляное испарение, а также биообъекты (вирусы, продукты жизнедеятельности — пленки, коллоиды и др.) [3, 7, 8].

Многие техногенные объекты и процессы являются источниками так называемого ненамеренного поступления наночастиц в окружающую среду. К таковым относятся: сжигание мусора и топлива с присадками в двигателях транспортных средств и электростанциях, бытовые отходы и добыча полезных ископаемых, карьеры и шахты, промышленное производство и выбросы, строительство, сварка, пайка, приготовление пищи и др. Контаминация объектов окружающей среды НЧ происходит при производстве, транспортировке и использовании различных средств гигиены и бытовой химии (солнцезащитные средства, детергенты), резины автомобильных покрышек, типографских красок, изделий из текстиля и пр.

Развитие некоторых отраслей промышленности и нанотехнологий привело к резкому росту количества инженерных наночастиц в окружающей среде. Нанотехнологии сегодня стали источником преднамеренного распространения значительного числа наноматериалов в различных природных средах. Сюда относятся очистка и переработка с использованием НМ загрязненных грунтовых вод и рекультивация почвы, использование для сельскохозяйственных нужд. В почвы наночастицы могут попадать в результате применения НМ в системах очистки почвы и воды, для сельскохозяйственных нужд (в качестве нанодобавок, пестицидов, препаратов для обработки семян, материалов для агропленок, приготовления гидропонических растворов и др.). К таким материалам относят фуллерены, нанотрубки, неорганические нанокристаллы, квантовые точки, нанопленки, мицеллы, коллоиды, лекарства «точечного» действия.

Множество естественных источников наночастиц могут создавать локальные экологические проблемы, но в эволюционном плане они относятся к факторам,

оказывающим влияние на окружающую среду лишь периодически, не нарушая общих законов развития циклических сукцессий в природных системах. Инженерные материалы становятся постоянно действующими факторами, которые могут создавать глобальные проблемы в ОС [3]. Согласно современным нормативным документам, в ряде контролируемых объектов (атмосферный воздух, водные объекты, почвы, гидробионты, водоросли, грибы, ткани наземных растений, ткани наземных животных) рекомендовано определять наличие наночастиц. Выбор этих объектов регламентирован методическими рекомендациями (МР 1.2.2639-10) [8]. Он обусловлен путями попадания НЧ и НМ в экосистемы и закономерностями циркуляции там в нативной либо модифицированной форме.

**Пути попадания наночастиц в почву** характеризуют их поступление, накопление (содержание) и миграцию. Поступление НЧ в почву возможно с атмосферными осадками, осаждением в виде пыли и аэрозолей, непосредственным поглощением почвой газообразных соединений, с растительным опадом, в результате антропогенной деятельности и др.

После попадания НМ в водную систему посредством сточных вод или промышленных выбросов возможна аккумуляция наночастиц в растительных организмах (например, водорослях), а также организмах беспозвоночных животных (планктон, бентос, ракообразные), являющихся первичными звеньями пищевой цепи, и далее переход в организмы водных позвоночных, участвующих в пищевой цепи человека.

В наземной экосистеме НЧ могут накапливаться в почве, поверхностных, сточных и грунтовых водах. Результаты исследований в этом направлении обобщены в таблице [33].

Поллютанты, поступающие из различных источников, в конечном итоге попадают на поверхность почвы, и их дальнейшая судьба зависит от ее химических и физических свойств. Продолжительность пребывания загрязняющих компонентов в почвах гораздо дольше, чем в других объектах биосферы. Известно большое число примеров прямых антропо-

**Объекты окружающей среды, в которых возможно накопление наночастиц разных типов (по [33])**

Отрасль, применение	Тип наноматериала	Объекты ОС					
		почва	поверхностные воды	грунтовые воды	сточные воды	отходы	воздух
Продукты косметики, средства личной гигиены	TiO <sub>2</sub> , ZnO, фуллерен C <sub>60</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Ag	—	+	—	+	—	—
Катализаторы, смазки, присадки к топливу	CeO <sub>2</sub> , Pt, MoS <sub>3</sub>	—	+	—	+	—	+
Краски, покрытия	TiO <sub>2</sub> , SiO <sub>2</sub> , Ag, квантовые точки	—	+	—	+	—	+
Обработка воды, восстановление ОС	Fe, Fe—Pd	+	+	+	+	—	—
Агрохимические препараты	SiO <sub>2</sub> (пористый) в качестве носителя	+	+	—	—	—	+
Пищевая упаковка	Ag, наноглина, TiO <sub>2</sub>	+	—	—	—	+	—
Фармацевтические препараты	нанопрепараты, наполнители	+	—	+	+	—	—

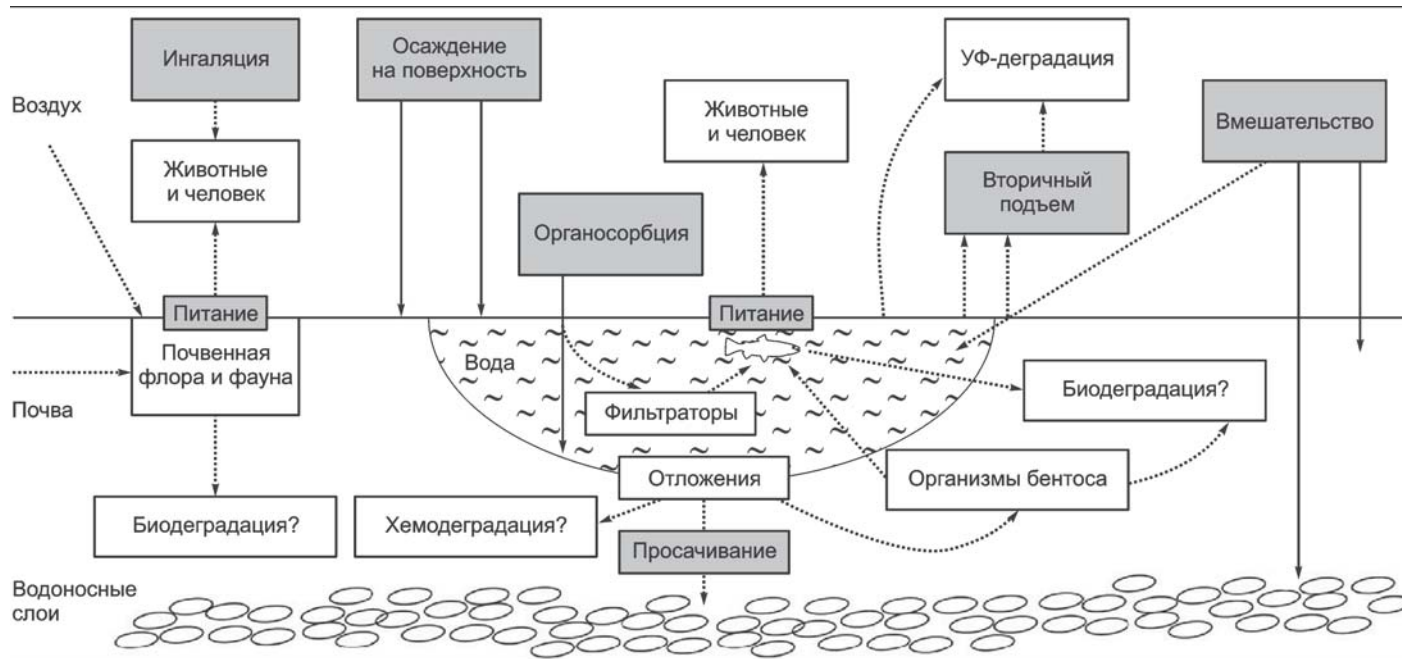


Рис. 1. Возможные пути попадания и миграции наночастиц, подтвержденные экспериментально (сплошная линия) и предполагаемые (пунктир) (по [7])

генных, а также опосредованных человеком вредных воздействий природных сред на почву, поэтому она является своего рода депонирующим объектом техногенных загрязнителей [1] и источником вторичного загрязнения вод и других.

Загрязнение почв наноматериалами представляет серьезный риск попадания в организм человека, ткани наземных растений и животных. Проникновение НЧ в любой компонент биоценоза может привести к внедрению их в другие объекты данной системы, к передаче по пищевой цепи.

Принимая во внимание экологические функции почвы и ее роль в круговороте веществ, выделяют следующие основные миграционные пути попадания наночастиц в этот объект (рис. 1): 1) транслокационный, характеризующий переход вещества из наземных растений и отходов; 2) миграционно-водный, характеризующий способность перехода вещества из грунтовых, сточных вод и водоисточников; 3) миграционно-воздушный, характеризующий переход вещества из атмосферного воздуха [2].

К настоящему времени существует немного исследований по выявлению миграционных процессов наночастиц в почве. Тем не менее известно, что загрязняющие вещества, сорбированные или включенные в коллоиды, транспортируются, когда для этого сложатся благоприятные условия. Например, если природные почвенные коллоиды являются переносчиками металлов через почвенные профили [15, 16, 17, 24].

Разработана модель миграции металлосодержащих наночастиц в системе *отходы—почва* [12]. Выявлено, что распределение по профилю почвы происходит следующим образом: на начальных этапах привноса НЧ максимум концентраций их приходит-

ся на гумусовый горизонт, а в дальнейшем, под действием, как правило, кислых фильтрационных вод, смещается в нижележащие горизонты. Показана высокая опасность миграционной способности металлосодержащих НЧ в растворе. Этот факт согласуется с экспериментальными доказательствами того, что в жидких средах они обладают гораздо большей биодоступностью по сравнению с естественной почвой [22]. Показателем миграционно-водной опасности являются глубина миграции компонентов отхода по профилю почвы и уровень содержания их в фильтрате [11].

Большое значение для понимания воздействия наночастиц на окружающую среду имеет исследование биоактивности наноматериалов в связи с различными условиями их поступления в почву (рис. 2). Инженерные НЧ могут попадать в нее в растворенном состоянии (А), что может повлечь за собой: а) биоаккумуляцию корнями наземных растений; б) накопление беспозвоночными и соответственно токсичность; в) микробную токсичность. Прямое поглощение твердых частиц (В) может вызвать токсичность: а) корней наземных растений; б) беспозвоночных животных; в) микробную. Непосредственное попадание НЧ (С) в почву может привести к их сорбции/агрегации или к миграции по профилю.

Биодоступность наночастиц инженерных наноматериалов различается в зависимости от их агрегатного состояния. В растворенном виде они более биодоступны, а значит, и более токсичны, так как не включены в структуру почвы. Один из предложенных методов определения НЧ по накоплению и растворению в почве может быть использован при оценке их биодоступности для растений. Однако в таких

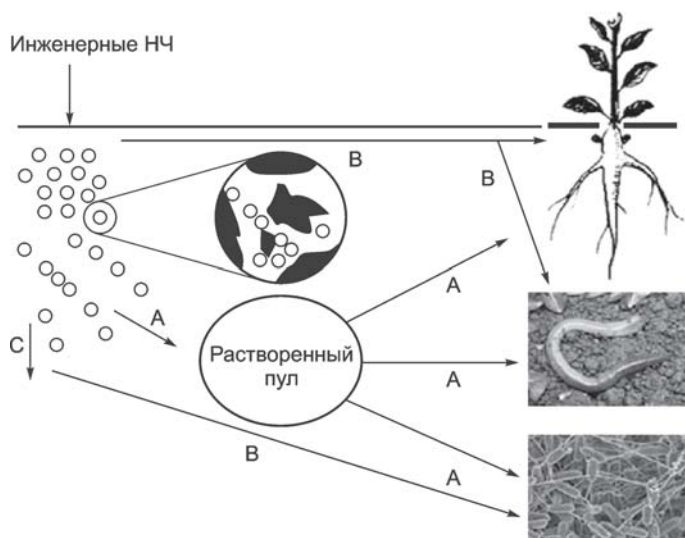


Рис. 2. Биодоступность наночастиц при разных условиях их попадания в почвенную среду: *A* — растворенный пул НЧ, *B* — прямое поглощение твердых НЧ, *C* — непосредственное попадание НЧ, миграция по профилю

экспериментах корневые экссудаты могут влиять на распространение НЧ в ризосфере, тем самым изменив их относительную биодоступность. Таким образом, при изучении биодоступности НЧ необходимо учитывать все разнообразие естественных почв, pH, содержание глины, емкость катионного обмена, текстуру, органическое вещество и минералогический состав, а также использовать модельные образцы [22].

В наших исследованиях показано, что гуминовые вещества, которые, как известно, используются для детоксикации различных загрязнителей органического и неорганического происхождения [10], могут влиять на биоактивность наноматериалов. Впервые установлено, что токсическое действие некоторых концентраций детонационных наноалмазов (DNDs—U) и нанодиоксида титана ( $\text{nano-TiO}_2$ ) снижается в присутствии промышленного гуминового препарата гумата калия из леонардита марки Row-Humus (Le—PhK) производства “Humitech”, Германия. Детоксицирующие свойства Le—PhK (5 мг/л) проявляются в биотестах с высшими растениями (*Brassica juncea*) при совместном применении с DNDs—U и  $\text{nano-TiO}_2$  в той же концентрации; при других концентрациях наночастиц (50 и 100 мг/л) эффект неоднозначен [4, 20]. Обнаруженная разнонаправленность действия свидетельствует о сложных взаимодействиях гуминовых веществ и наноматериалов. На данном этапе очевидна необходимость дальнейших исследований и накопление большей информации о факторах, влияющих на детоксицирующую способность как природных, так и промышленных гуминовых веществ.

К настоящему времени сведений о путях попадания и распространения инженерных наноматериалов и дальнейшей их судьбе в водных и наземных системах относительно немного. Одно из препятствий в изучении НМ в почвах — сложность обнаружения инженерных наночастиц в присутствии при-

родных коллоидов. Природные НЧ в почве (называемые почвенными коллоидами) довольно трудно выделять и характеризовать [18, 19, 28]. Достоверное обнаружение требует выделения частиц из твердой фазы почвы (десорбция) и их дисперсии в водной суспензии, что представляет существенную аналитическую проблему. Работ, направленных на ее решение, на сегодняшний день крайне мало [24].

Так, высказано мнение, что основные положения коллоидной химии могут помочь в исследовании поведения наночастиц. Опираясь на изучение природных водных коллоидов с размерностью в несколько нанометров, зарубежные специалисты пришли к выводу, что они могут вести себя аналогично промышленным НЧ [21, 25, 26]. Такое сравнение возможно, во-первых, потому, что коллоиды подвержены агрегации [14, 21] и в конечном счете агрегируются в частицы > 1 мкм, которые являются достаточно большими, и в их переносе доминирует осаждение (седиментация) [23, 30], что может являться аналогом поведения инженерных наночастиц. Во-вторых, взаимодействие наночастиц и природных коллоидов будет влиять на поведение НЧ в зависимости от их концентрации [13]. Из-за увеличения агрегации и осаждения в условиях более высокой ионной силы можно ожидать снижения концентрации НЧ в почве [24].

Учитывая трудности определения НЧ в почве, альтернативным способом подтверждения воздействия стали исследования на почвенных организмах — аналитическими методами показано их накопление здесь. Так, в опытах с использованием  $^{14}\text{C}$ -меченых однослойных углеродных нанотрубок (ОУНТ) зафиксировано их поглощение червями *Eisenia fetida*, а затем очищение организмов животных [29]. Была предпринята попытка исследовать поглощение тканями нематод наночастиц серебра [27] и дождевыми червями наночастиц золота и меди [31, 32]. При этом, однако, использовались сложные методы, которые вряд ли найдут применение в нормативном тестировании.

### Заключение

Результаты анализа литературы свидетельствуют о все большем обострении проблемы распространения наноматериалов в окружающей среде. Наиболее уязвимой для разработки надежных методов анализа и выявления содержания наночастиц представляется почва. Как очень специфическая часть биосферы она не только геохимически аккумулирует компоненты загрязнений, но и выступает в роли природного буфера, контролирующего перенос химических элементов и соединений в атмосферу, гидросферу и живое вещество. Поллютанты, поступающие из различных источников, в конечном итоге попадают на поверхность почвы, и их дальнейшая судьба зависит от ее химических и физических свойств.

Проблемы обнаружения наночастиц в почве связаны не только с известными техническими сложностями, требующими дорогостоящего специального оборудования, высокого уровня технической квалификации специалистов, но и с тем, что в почве — сложной многофазной системе — присутствует великое множество минеральных и органических макро- и микрокомпонентов, а также природных наночастиц. Современные методы не позволяют детально исследовать биодоступность инженерных наночастиц.

Однако, судя по косвенным показателям (изменению стандартных тест-функций в биотестах), можно определенно сказать, что биодоступность наночастиц в природных средах в первую очередь зависит от их размеров и степени агрегированности, а при нахождении в почве важнейшее значение приобретает разнообразие естественных почвенных свойств (кислотность, наличие катионов, органических веществ и др.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багдасарян А.С. Биотестирование почв техногенных зон городских территорий с использованием растительных организмов: Дис. ... канд. биол. наук. Ставрополь, 2005.
2. Веницианов Е.В., Виниченко В.Н., Гусева Т.В. и др. Экологический мониторинг: шаг за шагом / Под ред. Е.А. Заика. М., 2003.
3. Галченко Ю.П. Экологические аспекты образования наноразмерных частиц при освоении недр // Горный информ.-аналит. бюл. 2007. № 10.
4. Гладкова М.М., Терехова В.А. Тестирование нанодиагностики детонационного синтеза по реакции высших растений и детоксицирующая роль гуминового препарата при совместном применении // Мат-лы III Международ. форума по нанотехнол. 1—3 ноября, 2010. М., 2010.
5. Гмошинский И.В., Смирнова В.В., Хотимченко С.А. Современное состояние проблемы оценки безопасности наноматериалов // Российские нанотехнол. 2010. Т. 5, № 9—10.
6. Гусев А.И. Нанокристаллические материалы / Под ред. А.И. Гусева, А.А. Ремпеля. М., 2001.
7. Кричевский Г.Е. Опасности и риски нанотехнологий и принципы контроля за нанотехнологиями и наноматериалами // Нанотехнол. и охрана здоровья. 2010. Т. 2, № 3 (4).
8. Леонтьев А. Наноматериалы могут быть опасными для людей и окружающей среды [Электронный ресурс] // Коммерсантъ наука. 2011. № 7. URL: <http://www.kommer-sant.ru/doc/1776595> (дата обращения 22.08.2012).
9. МР 1.2.2639-10. Использование методов количественного определения наноматериалов на предприятиях nanoиндустрии. Федеральный Центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора. М., 2010.
10. Перминова И.В. Гуминовые вещества — вызов химикам XXI века // Химия и жизнь. 2008. № 1.
11. Трифонова Т.А. Экологическая безопасность наночастиц, наноматериалов и нанотехнологий: Учеб. пособие / Под ред. Т.А. Трифоновой, Л.А. Ширкина. Владимир, 2009.
12. Федотов Г.Н., Шалаев В.С. Основы наноструктурной организации почв: Учеб. пособие / Под ред. Г.В. Добровольского. М., 2012.
13. Voxall A., Chaudhry Q., Sinclair C. et al. Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles // Report by the Central Science Laboratory, Department of the Environment and Rural Affairs. York, UK, 2007.
14. Buffle J., Leppard G.G. Characterisation of aquatic colloids and macromolecules. 1. Structure and behavior of colloidal material // Environ. Sci. Technol. 29.
15. Cornelis G., Kirby J.K., Beak D. et al. A method for determining the partitioning of manufactured silver and cerium oxide nanoparticles in soil environments // Environ. Chem. 2010. Vol. 7, N 7.
16. Darlington T.K., Neigh A.M., Spencer M.T. et al. Nanoparticle characteristics affecting environmental fate and transport through soil // Environ. Toxicol. Chem. 2009. Vol. 28.
17. Fang J., Shan X.Q., Wen B. et al. Stability of titania nanoparticles in soil suspensions and transport in saturated homogeneous soil columns // Environ. Pollution. 2009. Vol. 157.
18. Gimbert L.J., Haygarth P.M., Beckett R., Worsfold P.J. The influence of sample preparation on observed particle size distributions for contrasting soil suspensions using flow field-flow fractionation // Environ. Chem. 2006. Vol. 3.
19. Gimbert L.J., Hamon R.E., Casey P.S., Worsfold P.J. Partitioning and stability of engineered ZnO nanoparticles in soil suspensions using field-flow fractionation // Environ. Chem. 2007. Vol. 4.
20. Gladkova M.M., Terekhova V.A. Phytotoxicity of nano-TiO<sub>2</sub> and effect of humus preparation // Proc. of 6<sup>th</sup> SETAC World Congr., SETAC Europe 22<sup>nd</sup> Annual Meeting, Berlin, Germany, 20—24 May 2012. Session EP03P2. Abstract 810. TH 195.
21. Gustafsson O., Gschwend G. Aquatic colloids: Concepts, definitions and current challenges // Limnology and Oceanography. 1997. Vol. 42.
22. Handy R.D., Cornelis G., Fernandes T. Ecotoxicity test methods for engineered nanomaterials: practical experiences and recommendations from the bench // Environ. Toxicol. and Chem. 2012. Vol. 31, N 1.
23. Honeyman B.D., Santschi P.H. The role of particles and colloids in the transport of radionuclides and trace metals in the ocean // Environ. Particles. 1992. Vol. 1.
24. Klaine S.J., Alvarez P.J.J., Batley G.E. Nanomaterials in the environment: behavior, fate, bioavailability, and effects // Environ. Toxicol. and Chem. 2008. Vol. 27, N 9.
25. Lead J.R., Wilkinson K.J. Environmental colloids and particles: Current knowledge and future developments // IUPAC series on analytical and physical chemistry of environmental systems. Environmental colloids: behavior, structure and characterization / K.J. Wilkinson, J.R. Lead (eds.). 2007. Vol. 10. Ch. 1.
26. Madden A.S., Hochella M.F., Luxton T.P. Insights for size-dependent reactivity of hematite nanomineral surfaces through Cu<sup>2+</sup> sorption // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2006. Vol. 70.
27. Meyer J.N., Lord C.A., Yang X.Y. Intracellular uptake and associated toxicity of silver nanoparticles in *Caenorhabditis elegans* // Aquatic Toxicol. Vol. 100. Iss. 2.

28. Noack A.G., Grant C.D., Chittleborough D.J. Colloid movement through stable soils of low cation-exchange capacity // Environ. Sci. and Technol. 2000. Vol. 34.

29. Petersen E.J., Huang Q., Weber W.J. Bioaccumulation of radio-labeled carbon nanotubes by *Eisenia fetida* // Environ. Sci. and Technol. 2008. Vol. 42.

30. Sigg L. The regulation of trace elements in lakes: The role of sedimentation // Chemical and Biological Regulation of Aquatic Systems. Boca Raton, USA, 1994.

31. Unrine J., Bertsch P., Hunyadi S. Bioavailability, trophic transfer, and toxicity of manufactured metal and metal oxide nanoparticles in terrestrial environments // Nanoscience and Nanotechnology: Environmental and Health Impacts, 2008.

32. Unrine J.M., Tsyusko O.V., Hunyadi S. Effects of particle size on chemical speciation and bioavailability of Cu to earthworms (*Eisenia fetida*) exposed to Cu nanoparticles // J. Environ. Quality. 2010. Vol. 39.

33. URL: [http://nano.msu.ru/files/basics/lecture\\_Kirpichnikov.pdf](http://nano.msu.ru/files/basics/lecture_Kirpichnikov.pdf) (дата обращения: 22.08.2012).

Поступила в редакцию  
16.09.2012

## ENGINEERED NANOMATERIALS IN SOIL: SOURCE OF ENTRY AND MIGRATION PATHWAYS

**M.M. Gladkova, V.A. Terekhova**

In this review the current problems and distribution pathways of engineered nanomaterials (NMs) in the environment, particularly in soils and related habitats (water and air) are analyzed. The sources of unintentional and intentional entry of nanoparticles (NPs) in natural systems are discussed. The attention is focused on the problems of bioavailability engineered NMs in soils due to high variability of conditions of location.

*Key words:* nanoparticles, pollutant, toxicity, migration, soils.

### *Сведения об авторах*

**Гладкова Марина Михайловна**, аспирант каф. земельных ресурсов и оценки почв ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. *E-mail:* marika230489@gmail.com . **Терехова Вера Александровна**, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. Ин-та проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, зав. лабораторией экотоксикологического анализа почв ф-та почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Тел.: 8(495) 939-28-63; *e-mail:* vterekhova@gmail.com.