

ВСТУПЛЕНИЕ

В 2001 году мне посчастливилось посетить лабораторию Ричарда Смолли в Университете Райса, в которой я работал в составе научной группы. В лаборатории проводили замеры выбросов в атмосферу однослойных углеродных нанотрубок в процессе их производства и обработки. Впервые были опубликованы данные о возможном ингаляционном воздействии этого материала. Главное мое воспоминание — огромный энтузиазм Ричарда в создании нового инновационного материала наряду с равнодушным отношением членов исследовательской группы к воздействию наночастиц на их здоровье. А оно было значительным: в лаборатории можно было провести пальцем по любой поверхности, и он становился черным.

Углеродные нанотрубки стали олицетворением той напряженности, которая возникла между желанием создавать новые наноматериалы и стремлением избежать возможные новые риски. Свойства углеродных нанотрубок сильно отличаются от свойств конструкционных материалов, с которыми работали до их открытия: они прочные, легкие, хорошо проводят тепло и электричество, к тому же их можно комбинировать с другими материалами. Спектр их применения широк: от батарей с лучшими характеристиками, более прочных материалов и прозрачных проводников до препаратов против лучевой болезни. Однако имеются предположения, что при определенных условиях углеродные нанотрубки могут оказаться вредными для людей и окружающей среды. Поэтому успешное внедрение этого материала в промышленность в значительной степени будет зависеть от определения потенциальных рисков токсического воздействия и их устранения.

Стоит отметить, что углеродные нанотрубки — лишь один из бесчисленных новых искусственно созданных наноматериалов. И хотя во многих случаях трудности поиска компромисса между коммерческой выгодой и рисками могут быть не столь очевидными, от выбора приоритета зависит будущее всех новых материалов.

Для написания книги «Нанотехнологии и экология: риски, нормативно-правовое регулирование и управление» Мэтью Халлу и Дайане Боумен удалось объединить многих известных авторов, каждый из которых имеет собственное мнение о перспективах развития сферы нанотехнологий, и показать с разных сторон неопределенности, с которыми сталкиваются представители этой области. Обозначив проблемы, стоящие перед учеными и производителями, а также некоторые возможные варианты управления рисками, авторы предложили пути максимально безопасного использования наноматериалов.

С момента моего первого посещения лаборатории Ричарда Смолли в области нанотехнологий произошли заметные изменения. Если энтузиазм в практическом применении углеродных нанотрубок в полной мере сохранился, то методы работы с ними кардинально изменились, все операции выполняются гораздо строже. Узнав о возможных рисках, научная группа Ричарда Смолли воспользовалась рекомендациями о безопасных методах работы, что позволило снизить потенциально вредное воздействие углеродных нанотрубок на здоровье.

Надеюсь, эта книга заставит задуматься о собственном здоровье всех людей, чья жизнь и работа связаны с нанотехнологиями, и позволит серьезно относиться к технике безопасности. Конечно, из нее вы не узнаете всего, что следует знать о безопасной работе с наноматериалами: такая задача для одной книги представляется невозможной, особенно если учесть недостаток научных исследований в области токсичности наноматериалов. Но эта книга, несомненно, поможет исследователям, производителям и потребителям этих материалов принять необходимые меры, которые помогут значительно снизить вероятность вредного воздействия на людей и окружающую среду.

Эндрю Мэйнард
12 июля 2009 года

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА

Опыт показывает, что только после ряда несчастных случаев, связанных с новыми технологиями, мировое сообщество пересматривает свои предшествующие действия. В современном обществе подход к внедрению технологии новых материалов должен быть более рациональным и основываться на предварительном всестороннем изучении их свойств. Эта книга во многом написана с точки зрения выбора в подобных случаях своевременных обоснованных решений. Предметом обсуждения является воздействие продуктов нанотехнологии на среду обитания человека, в первую очередь — на здоровье. В ней освещены технологические аспекты (т. е. токсикология нанообъектов), вопросы правового регулирования (например, пути решения правовых вопросов в США и Европейском союзе), а также пути управления рисками. Большое внимание уделяется практическим вопросам: в разделе об управлении рисками вы найдете несколько типовых примеров.

Авторы указывают на недостаток актуальных данных в обозначенном вопросе, поэтому в полной мере принимать рациональные решения пока не удастся. Однако отдельные изобретатели и компании все равно будут предлагать коммерческую продукцию с наноматериалами, не дожидаясь формирования нормативно-правовой базы. Такая проблема отсутствует в традиционных отраслях промышленности, где основа регулирования уже создана.

Осторожность, которую проявляют к наноматериалам, основана на опыте прошлых поколений: еще 2000 лет назад греки Страбон и Плиний Старший в своих работах указывали на опасность асбеста для здоровья. Однако знаний о потенциальном вреде этого материала оказалось недостаточно для предотвращения тяжелых заболеваний, вызванных воздействием амфиболового асбеста, которому уделяли повышенное внимание во второй половине XX века. Фактически оценка риска — относительно новое направление в регулировании технических процессов, которым в 1975 году первым занялось американское Управление по охране окружающей среды. Неспособность (или нежелание) своевременно воспользоваться имеющимися знаниями мешает устойчивому развитию экономики, базирующейся, как считается, на знаниях. До изобретения книгопечатания знания технологии процессов или свойств какого-либо материала действительно были редким товаром, они передавались от поколения к поколению в устной форме. В настоящее время ситуация кардинальным образом изменилась: фактически любой человек может получить доступ к научной и технической литературе через Интернет. Однако, как это ни парадоксально, обычно приводимые цитаты из базовой научной литературы все больше и

больше свидетельствуют о том, что в наши дни исследователи не интересуются аналогичными исследованиями других научных групп, и, как правило, меньше знают не только об уже известных открытиях, но даже о современном состоянии науки в целом. Эту проблему также необходимо решать, так как в противном случае она станет реальным препятствием для ответственного развития передовых технологий в XXI веке.

Авторы книги поднимают главный вопрос: как максимально использовать преимущества нанотехнологий и при этом минимизировать риски для здоровья людей? Для ответа на этот вопрос авторы предоставляют большой объем информации и результатов проведенных исследований, которые могут оказаться полезными для частных и государственных компаний, органов государственного управления и других организаций, участвующих в страховании, разработке нормативно-правовой базы и защите своего персонала от неоправданных рисков. Эта книга также станет важной вехой на пути развития теоретических основ этого направления.

*Джеремии Рамсден
Сентябрь 2009 года*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Мэтью Халл, Дайана Боумен и Штеффи Фридрихс

Существуют риски, связанные с продуктами, в состав которых входят наноматериалы, и процессами их производства, распространения и утилизации. Хотя новые схемы управления, стратегии снижения рисков, а также правовое регулирование позволят в значительной степени их сократить, в редких случаях удастся полностью их избежать. Технологические достижения нашей эпохи, от создания автомобиля до, например, биотехнологий, в этом отношении ничем не отличаются от предшествующих предложений. Все они поступают на прилавки в виде своего рода упаковок, содержащих наряду с выгодами, предложенными покупателю, уникальный набор рисков.

Конечно, *прогресс никогда не бывает бесплатным: за него всегда приходится платить*¹. Размер «оплаты» за прогресс в виде новых технологий и их продуктов обычно определяется предельным риском, на который мы готовы пойти, в то время как сам предел восприятия новой технологии формируется обществом. Хотя этот процесс с течением времени и в разных странах претерпевает изменения, по сути он предоставляет сложное переплетение общественных отношений, а также культуры, экономики, политики, истории и науки. С точки зрения возможного риска, то, что для одних людей является приемлемым, для всех остальных может оказаться совершенно неподходящим.

Некоторые пороговые значения воздействия различных материалов, особенно те значения, которые можно получить спустя длительное время экспонирования материала на человека, могут оказаться точными и хорошо известными. Такие предельные значения можно внести в содержание законодательных актов, регулирующих документов (государственных или частных) или стандартов. Другие пороговые значения, особенно те, которые еще находятся на стадии изучения, могут быть, как это ни удивительно, неточными и постоянно меняющимися. В ситуациях, относящихся ко второй категории, слишком мало информации, чтобы в полной мере оценить реальные риски или даже выгоды для общества, поэтому подготовка решения о дальнейшей судьбе этого направления, скорее всего, будет все более запутанной и сложной.

В основе дискуссий о развитии нанотехнологий лежит тесная взаимосвязь выгод от новой сферы экономики и неизбежных рисков. Конечно, каждая заинтересованная сторона по-своему относится к этим выгодам и рискам и, исходя из своих интересов, планирует дальнейшую работу. Данная книга не только обращает внимание читателей на существование потенциальных рисков вредного воздействия наноматериалов на здоровье и окружающую среду, но и знакомит

¹ Цит. по: Inherit the Wind. 1960, Stanley Kramer Productions.

их со стратегиями управления рисками, которыми уже успешно пользуются некоторые организации.

Если выбрать наиболее часто цитируемое определение, при изучении нанотехнологий рассматриваются явления, возникающие благодаря новым свойствам исследуемых материалов, которые имеют размер, равный 1–100 нм, хотя бы в одном направлении (National Nanotechnology Initiative, 2001). Для сравнения: диаметр вируса обычного гриппа составляет 40 нм, а диаметр человеческого волоса больше его примерно в 1000 раз. При уменьшении размеров веществ до нанодиапазона их свойства значительно меняются по сравнению со свойствами объемных материалов: например, углеродные нанотрубки диаметром до 100 нм и длиной до нескольких микрометров обладают прочностью на растяжение во много раз больше, чем у стали; наночастицы титана обладают новыми фотокаталитическими свойствами; изменяя размер квантовых точек, можно «настраивать» их флуоресценцию.

За последние два десятилетия (временной отрезок, которые многие считают «периодом младенчества» нанотехнологии) в области нанотехнологии удалось добиться некоторых заслуживающих внимания достижений, важных для науки, техники и промышленности. Эти достижения можно сравнить с лучшими изобретениями промышленной революции. По мнению аналитиков, мы находимся на пике развития «нанореволюции» (см., например, Merkle, 2000; Drexler, Peterson and Pergamit, 2003; Sparrow, 2008). Эта революция «разразилась» или «возникла» (в зависимости от точки зрения) как результат создания новых инструментов и последующего объединения широких возможностей для визуализации исследуемых материалов и управления ими на молекулярном уровне, а также благодаря крупным инвестициям государственного и частного секторов в нанотехнологические программы.

Учитывая устойчивые темпы прогресса, трудно точно предсказать, какие инновации в сфере нанотехнологий появятся в ближайшие годы. Однако, если судить по результатам обсуждения возможности использования космических лифтов (Appell, 2002; Pugno, 2006) и наносборщиков, меняющих форму (Crichton, 2002), отсутствие четкой траектории развития в этом направлении, конечно, не является ограничением для воображения творческих людей. Для любознательных читателей, которые хотят познакомиться с более прагматичной перспективой нанотехнологий, Роко (Roco, 2004) показывает четыре поколения структур и устройств, чье появление частично совпадает с появлением научно-технических возможностей, которые необходимы для их фактического производства.

Несмотря на прогресс в науке и технике, один факт остается неизменным: в прошлом общество усвоило несколько тяжелых и хорошо запомнившихся уроков, которые были связаны с перспективами новых технологий. Такие уроки были обусловлены появлением новых классов химических веществ или материалов, они давались сравнительно часто и усваивались дорого. Примеров много: эффективные для борьбы с болезнями, вызываемыми насекомыми, ДДТ и подобные ему пестициды оказали непредвиденное вредное воздействие на воспроизводство пернатых хищников; охлаждающие хлорфторуглероды (CFC)

считались безопасными, хотя эти вещества разрушали защитный озоновый слой Земли; и наконец, асбест, провозглашенный в свое время чудом природы, который можно использовать почти в любом продукте, от строительных материалов и до автомобильных элементов, в конечном счете стал синонимом хронических заболеваний дыхательных путей и коллективных судебных исков (глава 2).

Пожалуй, самым интересным является тот факт, что описанные события произошли относительно недавно, поэтому их последствия по-прежнему ощущаются в обществе. Может показаться, что в отличие от предыдущих поколений у современного общества сформировался условный рефлекс: общество ставит под сомнение не только потенциальные риски новых технологий, но и риски, сущность которых современная наука пока не понимает. Мы стали чувствительны к социальным рискам, и хотя вновь возникшая чувствительность сопровождается, оправданно или нет, определенным цинизмом, она способствует появлению *опасений в отношении техники*. Возможно, это необходимая мера, поскольку она заставляет представителей науки более ответственно относиться к вопросам безопасности.

Однако было бы однобоко в этом обсуждении рассматривать только те примеры или аспекты технологии, которые имели негативные, хотя и непреднамеренные, последствия для общества. Конечно, на протяжении прошлого столетия были выявлены многие потенциальные опасности новых направлений, но одновременно были продемонстрированы и поразительные достижения, которые помогли справиться с самыми серьезными проблемами человечества. Тот же ДДТ, например, позволил спасти жизни миллионов людей в развивающихся странах, страдающих от малярии. Положительные результаты игнорировать нельзя. Можно ли было спасти жизни этих людей без катастрофических последствий для экосистемы? Могут ли современные материалы быть созданы без ущерба для здоровья миллионов работников, которые их производят? Разумеется, такие вопросы нужно задавать при взвешивании потенциальных выгод и рисков, связанных с любой новой технологией.

Какими бы замечательными ни были последние достижения в области нанотехнологий, по-своему замечательна и активная позиция мировой общественности к возникающим рискам EHS, причем не только к уже известным, но и тем, которые пока неочевидны. Не только на международном уровне, но и на уровне отдельных государств проводят исследования и реализуют национальные нанотехнологические программы, в том числе выделяя деньги на изучение потенциальных рисков. Хотя адекватность, эффективность и легитимность многих из этих мероприятий порой ставятся под сомнение (см., например, Powell and Colin, 2008; Friends of the Earth Australia, 2009), такой подход, тем не менее, в значительной степени отличается от опыта прошлых десятилетий, когда основное внимание уделялось только развитию новой отрасли. Наряду с государственными программами, свои инициативы по управлению рисками в области нанотехнологии также разрабатывают отдельные корпорации, некоммерческие организации и научно-исследовательские учреждения. Хотя эта деятельность не является в полной мере всеобщей, некоторые из таких инициатив

демонстрируют признание отрасли того факта, что, когда речь идет о рисках новых технологий и продуктов, компании, действующие рационально, могут активно сотрудничать друг с другом, а не ограничиваться лишь ответными действиями. Торговые организации, международные комитеты стандартов и поставщики профессиональных услуг также стали участвовать в обсуждении нанотехнологических рисков EHS и получении информации о методах их снижения.

Нанотехнологии уже не ограничиваются масштабами лабораторий. Нанопроизводство в промышленных масштабах является реальностью во всем мире. Так, в Африке реализуется программа South African Nanotechnology Initiative (SANi, 2009), одна из задач которой — синтез наноразмерных частиц для их применения в солнечных элементах, катализе, топливных элементах и композиционных материалах. Азиатские компании тоннами получают фуллерены и наночастицы серебра. В Австралии нанотехнологи производят различные продукты, начиная с наночастиц оксидов металлов для солнцезащитных поверхностей и заканчивая таким широким классом материалов, как дендримеры. Развивающаяся промышленность Северной Америки и Европейского союза устойчиво развивается и выпускает как полупроводниковые квантовые точки, так и наночастицы оксидов металлов, углеродные нанотрубки. В последнее время в Южной Америке появилась широкая сеть государственных и отраслевых центров поддержки исследований в области нанотехнологии. Специалисты этих центров активно сотрудничают с партнерами из Индии, Африки и Европейского союза.

В заключение хочу отметить, что основной вопрос формулируется так: *почему, получая все преимущества нанотехнологий и поддерживая их развитие, мы одновременно минимизируем зачастую плохо понятные потенциальные риски?* В последующих главах этой книги поставленный вопрос анализируется с точки зрения опыта, накопленного представителями научных кругов, профсоюзов, корпораций, входящих в Fortune 500, предпринимателей, страховщиков, руководителей нанотехнологических предприятий и ответственных экспертов по безопасности продуктов, а также экспертов в области экологического права. Итогом этой работы стало всестороннее обсуждение ситуации, возникающей в области нанотехнологических рисков EHS, а также практических стратегий, разработанных для их управления на предприятиях различного масштаба и сложности.

Реферативная литература

Appell D. Nanotechnology: Wired for Success. Nature. 419 (6907). 2002. 553–555.

Crichton M. Prey. New York: Harper Collins, 2002.

Drexler K., Peterson C., Pergamit G. Unbounding the Future: the Nanotechnology Revolution. New York: Quill Books, 2003.

Friends of the Earth Australia, accessed May 28, 2009. Questioning government's role as chief nanotechnology proponent — a biased adjudicator? См. об этом на <www.nano.foe.org.au/node/307>.

- Merkle R. C.* Are we prepared for the nanotechnology revolution? // Proceedings of the IEEE. 88 (1). 2000. 107–108.
- National Nanotechnology Initiative, 2001. Nanotech Facts: What is Nanotechnology? NNI: Washington, DC. См. об этом на: <www.nano.gov/html/fats/whatIsNano.html>, accessed May 28, 2009.
- Powell M., Colin M.* Meaningful citizen engagement in science and technology: what would it really take? // Science Communication. 30 (1). 2008. 126–136.
- Pugno N. M.* On the strength of the carbon nanotube-based space elevator cable: from nanomechanics to megamechanics // Journal of Physics: Condensed Matter. 18. 2006. S1971–S1990.
- Roco M. C.* Nanoscale science and engineering: unifying and transforming tools // AIChE Journal. 50 (5). 2004. 890–897.
- South African Nanotechnology Initiative, 2009. Welcome to the South African Nanotechnology Initiative. SANi: Johannesburg. См. об этом на at:<<http://sani.org.za/index.php>>, accessed May 27, 2009.
- Sparrow R.* Talkin' 'Bout a (Nanotechnological) Revolution // IEEE Technology and Society Magazine. 27 (2). 2008. 37–43.

[. . .]

РАЗДЕЛ I

РИСКИ

Глава 1

ПРОВЕДЕНИЕ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОМАТЕРИАЛОВ

Аннет Сантамария, Кристи Сайес

1.1. Введение

Полагают, что использование наноматериалов позволит в значительной степени улучшить качество потребительских и промышленных товаров, обеспечить потребность в энергии, увеличить масштабы применения систем безопасности и добиться успехов в области медицины. Эти перспективы обусловлены уникальными физическими свойствами (например, магнитными, оптическими, механическими или электрическими) веществ, размер которых, как правило, не превышает 100 нм, и параметрами квантовой механики, которые с изменением размера материалов с размером 1–100 нм могут меняться как плавно, так и резко. Однако для правильной оценки безопасности химических веществ, материалов и продуктов, которые могут быть разработаны новыми методами, необходимо предварительно идентифицировать их потенциальные риски для здоровья. Уровень опасности и возможного воздействия (экспонирование) варьируется в широких пределах, который зависит от класса наноматериала или продукта, содержащего рассматриваемое вещество. Риски для здоровья людей и для окружающей среды определяются согласно условиям, в которых находится объект, и возможным путям воздействия со стороны наноматериалов. Поскольку непрерывно разрабатываются все новые и новые наноматериалы, необходимо иметь базовую схему оценки таких веществ на возможную токсичность и уровень воздействия, а также для получения информации, полезной при дальнейшем проведении оценки безопасности и потенциального риска.

Уникальность новых свойств наноматериалов объясняется влиянием их размера, электронной конфигурацией, зависящей от структуры, и большим соотношением площади поверхности и объема по сравнению с более крупными по размеру химическими веществами и материалами. Основной характеристикой наноматериалов является их размер, величина которого находится в переходной области от размеров отдельных атомов или молекул до размеров объемных материалов (Nel et al., 2006). С точки зрения токсикологии и безопасности для здоровья, к числу важных характеристик материала относятся его размер и

удельная площадь поверхности. С уменьшением размеров частиц их удельная площадь поверхности возрастает, в результате чего увеличивается доля поверхностных атомов или молекул. Такие атомы или молекулы могут быть химически или биологически активными и могут усилить эффекты, отрицательно влияющие на здоровье. Другие параметры, такие как форма, свойства поверхности, степень агрегации и растворимость, также влияют на физико-химические характеристики и свойства наноматериала. Все обозначенные факторы приводят к усилению или ослаблению любых эффектов, связанных с размерами изучаемых веществ.

Впечатляющие с точки зрения физико-химических параметров новые свойства наноматериалов также вызывают беспокойство потенциально отрицательными воздействиями на биологические системы. По результатам исследований было высказано предположение, что отдельные наноматериалы могут влиять на биологические свойства на клеточном (например, мембраны) и субклеточном (например, протеины, ДНК) уровнях. Также имеются опасения, что некоторые наночастицы способны легко перемещаться по организму, накапливаться в органах-мишенях, проникать через клеточные мембраны, оставаться в митохондриях, катализировать ответные реакции, вредные для организма, в частности воспалительные процессы или производство активных форм кислорода. Однако во многих случаях наноматериалы могут являться компонентами более крупных продуктов, таких как нанокompозиты, или входить в состав покрытий, матриц, поэтому в этом случае их непосредственное воздействие может оказаться пренебрежительно малым. По мере того как область нанотехнологий продолжает развиваться и создаются новые наноматериалы, необходимо учитывать и правильно оценивать последствия их влияния на здоровье людей и окружающую среду. Для этого требуется проведение тщательных исследований токсикологических параметров и экспонирования этих материалов. В настоящее время проводится ряд исследований по оценке многих предсказанных свойств и эффектов, связанных с наноматериалами, которые имеют место при их проникновении через биологические мембраны (например, в легкие, кожу, пищеварительный тракт), вызывая клеточную токсичность, а также при систематическом их распределении в органах и тканях.

В этой главе кратко описывается формирующаяся в настоящее время область нанотоксикологии и объясняется, почему наноматериалы вызывают опасения, какие физико-химические характеристики наноматериалов могут влиять на токсикологический потенциал, а также вопросы допустимых концентраций, которые, вполне вероятно, потребуются учесть при разработке методов токсикологических исследований. Далее в обобщенном виде приводятся результаты обсуждения методологии определения рисков, которая в настоящее время применяется для оценки безопасности химических веществ, разрабатываемых для потребительских товаров (продукты питания, пищевые упаковочные материалы, предметы личной гигиены, пестициды, лекарства, а также при проведении медицинских диагностик). Рассмотрен вопрос о том, как модифицировать уже существующие подходы к определению рисков к проблемам наноматериалов. Также приведен обзор токсикологических исследований, которые могут потре-

боваться при оценке опасности наноматериалов, предлагаются общие схемы проведения такой оценки. И наконец, рассказывается о некоторых ограничениях, с которыми сталкиваются ученые, практики и теоретики, регулирующие органы и персонал промышленных предприятий при оценке рисков для здоровья людей и окружающей среды, возникающих при использовании наноматериалов.

1.2. Нанотоксикология

Оценка безопасности наноматериалов скорее всего потребует междисциплинарного подхода токсикологов и привлечения экспертов по материаловедению, химии, физике, биотехнологии, инжинирингу, а также других областей. Точная идентификация того, что именно относится к категории наноразмерных материалов, является трудной задачей, этот вопрос активно обсуждается в научном сообществе, а также представителями регулирующих органов и агентств, устанавливающих стандарты. Однако обычно считается, что к наноматериалам могут относиться структуры, устройства и системы, обладающие новыми свойствами и функциями, которые возникают благодаря их размеру порядка 1–100 нм. Нередко в ходе этих обсуждений высказываются опасения, связанные с потенциально отрицательным влиянием этих веществ на здоровье людей, что объясняется их повышенной активностью (например, химической и магнитной), а также с возможностью токсического воздействия при постоянной работе с ними. Физико-химические свойства наноматериалов могут влиять на клеточный захват, связывание белков, транслокацию от места входа до места мишени, а также на потенциал повреждения тканей (Oberdörster et al., 2005a). Теоретически предсказанная возможность наноматериалов взаимодействовать с биологическими объектами, вызывая изменения в них, порождает повышенный интерес к научным аспектам этой проблемы, особенно токсикологическим, со стороны регулирующих органов. Были опубликованы статьи, посвященные результатам исследований различных аспектов здоровья, возникающие в процессе новых разработок и при использовании наноматериалов (Warheit et al., 2004, 2007a; Lam et al., 2004, Shvedova et al., 2003, 2008, 2009; Monteiro-Riviere et al., 2005, 2008; Sayes et al., 2004, 2007; Gopee et al., 2007; Park et al., 2007; Baker et al., 2008; Hagens et al., 2007; Ji et al., 2007; Helland et al., 2007; Ryman-Rasmussen et al., 2007; Park et al., 2008; Poland et al., 2008; Takagi et al., 2008; Zhang and Monteiro-Riviere, 2008; Guo et al., 2009; Nygaard et al., 2009).

При изучении токсикологического профиля наноматериалов («нанотоксикология») можно получить данные, которые в будущем позволят адекватно оценивать безопасность и риск для аналогичных новых веществ. Теоретически благодаря малым размерам наночастицы способны накапливаться в дыхательных путях и желудочно-кишечном тракте, проникать через кожный покров, а затем — в ткани и органы. Вместе с тем уже имеющиеся данные подтверждают выводы о том, что легкие, желудочно-кишечный тракт и кожа являются своего рода щитом и надежно защищают организм при систематическом воздействии

[. . .]