



УДК 504.5:620.3

ББК 20.1+30.6

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Н.И. Латышевская, А.С. Стрекалова

В статье обоснована необходимость развития наноэкологии (экологии наноиндустрии). Систематизированы ключевые экологические проблемы развития нанотехнологий. Сделан вывод о необходимости интенсификации изучения эколого-гигиенических аспектов нанотехнологий и наноматериалов.

Ключевые слова: наноэкология, наноиндустрия, нанотехнологии, наноматериалы, риски, токсичность, безопасность.

Быстрый прогресс нанотехнологий в глобальных масштабах создает систему разноплановых эффектов для каждого отдельного человека, в том числе для его здоровья и окружающей среды: «Расшифровка генома человека, успехи трансплантологии, манипуляции со стволовыми клетками, экстра-корпоральное оплодотворение, клонирование, нанотехнологии... Как и насколько можно все это применять? Какие последствия ждут человечество?» [9]. Экологическая наука на современном этапе своего развития сталкивается с мощным вызовом «в лице» нанотехнологий, что требует формирования программы перспективных исследований фундаментального и прикладного характера. При этом следует учесть, что «никакой отдельной “нанонауки” нет и быть не может», напротив, «свой специфический наноуровень строения имеют или должны иметь как природные... так и социальные... объективно существую-

щие системы, а следовательно, и системы знаний, их отражающие» [4, с. 6]. Очевидна необходимость целенаправленного и системного развития наноаспекта предметной области экологии.

Наноэкология (экология наноиндустрии) – новый раздел экологических исследований, предметом которых являются потенциал и риски, внешние и внутренние эффекты глобальной наноиндустриализации для окружающей среды человеческой жизнедеятельности, а также проблемы влияния нанотехнологий и наноматериалов на здоровье людей в целях разработки эффективных нормативов и стандартов. Данное направление научного поиска находится пока в стадии формирования, однако многие актуальные проблемы уже обсуждаются научной медицинской общественностью.

Безусловно, первым шагом на пути становления наноэкологии является объективное осмысление сути нанотехнологий и их четкое определение во избежание чрезмерного разнообразия трактовок.

Отмечается, что «термин нанотехнология объединяет разнородные представления

и подходы, а также разные методы воздействия на вещество» [7, с. 16]. При этом верхняя граница «нанообласти» соответствует минимальным элементам больших интегральных схем, широко применяемых в полупроводниковой технике. К данной области относятся также фуллерены и нанотрубки. Кроме того, ряд вирусов и белковых молекул имеют размерность от 1 до 10 нм, радиус спирали ДНК составляет 1 нм, размеры молекул многих веществ находятся в диапазоне до 1 нм. Это, по мнению А.Г. Малышевой, свидетельствует о том, что «нанотехнология как бы объединяет все процессы, происходящие непосредственно с атомами и молекулами» [там же].

Существует также мнение, что «термин наночастицы не отражает принципиально нового содержания, вкладываемого в данное понятие» [12, с. 4]. Наночастицы имеют двумерную метастабильную фазу, отличную от объемного материала, и за счет этого приобретают качественно новые структурные и энергетические свойства. В силу наличия у наиболее реакционно способных наноструктур двумерной формы происходит межмолекулярное сопряжение, параллельное границам плоскостей. Особая форма наноструктур в виде молекулы фуллерена и нанотрубок способствует достижению принципиально нового электрофизического состояния. В принципе, это можно объяснить с помощью сформировавшихся на данный момент квантовых представлений.

Ученые-физики, занимающиеся непосредственно разработкой и испытанием новых углеродных структур, под термином «нанотехнология» подразумевают «совокупность технических приемов и исследовательских методик, позволяющих создавать объекты размером 1–100 нм и манипулировать ими» [6, с. 216]. Несколько расширенную трактовку использует Г.Г. Онищенко, определяя нанотехнологии как «совокупность методов направленного манипулирования материальными объектами в пределах размеров менее 100 нм, которые позволяют создавать из веществ традиционного химического состава структуры в нанометровом диапазоне (наноматериалы) и придавать им принципиально новые свойства, такие как уникальная механическая прочность, особые спектральные,

электрические, магнитные, химические, биологические характеристики» [8, с. 4]. Заметим, что к продуктам нанотехнологий относятся наряду с наноматериалами также наноинтермедиаты (нанотехнологические компоненты) и продукты с наноконпонентами, или нанотрансформированные товары [5], которые также подлежат охвату санитарно-гигиеническими нормами.

В перспективе ни одна отрасль народного хозяйства не дает столько возможностей для развития прогресса в других отраслях, как наноиндустрия. Имеются прогнозы, что после 2010 г. нанотехнологии станут широко использоваться в производстве товаров, особенно в медицине и фармации [2, с. 33]. Успехи нанотехнологии позволят осуществить более эффективное проектирование генома, сделают возможным использование дистанционных и вживляемых устройств, оптимизируют составы и транспорт лекарственных препаратов, что положительно отразится на развитии отраслей медицины и здравоохранения. Медицина приобретет антибактериальные и самоочищающиеся покрытия, нанокапсулы с метками-идентификаторами, позволяющие доставлять лекарственные препараты непосредственно в очаг поражения. Несомненна польза наноматериалов для экологии и энергосберегающей энергетики. Так, открытие упорядоченных мезопористых материалов с размерами пор в интервале 10–100 нм позволит использовать их для удаления ультратонких загрязнений; упрочненные полимерные наноматериалы снизят потребление бензина и уменьшат выделение углекислого газа автомобилями. В русле развития энергосберегающих технологий прорывной станет технология «поток через конденсатор», созданная для опреснения морской воды (10-кратная экономия энергии), и наночастицы для контроля состояния воздуха и воды. Применение биоразрушаемых химикатов, созданных с использованием нанотехнологий, в сельском хозяйстве позволит сократить до минимума применение традиционных пестицидов и гербицидов, в результате чего появятся возможности улучшения генофонда животных и растений [17, с. 24–25].

Уникальные полезные свойства наноматериалов имеют и обратную сторону – не менее феноменальные и пока что трудно про-

гнозируемые риски [16]. Например, в 2004 г. научное сообщество было всерьез обеспокоено статьей Ч.-В. Лэма и соавторов, в которой говорилось о значительной токсичности нанотрубок [19]. При их введении в легкие грызунов у последних развивались гранулемы. Не случайно в отчете Научного комитета по новым рискам для здоровья (SCENIHR) Европейской комиссии и в «Руководстве по рискам нанотехнологий» Международного совета руководства рисками была выдвинута гипотеза о возможности возникновения у наночастиц уникальных вредных эффектов, никогда ранее не наблюдававшихся у химических веществ в других физических формах [3, с. 13]. Именно на их выявление, анализ и нормирование должны быть в первую очередь направлены усилия наноэкологов и наногигиенистов. Ведь «несмотря на то, что наноматериалы в мире используются уже более 10 лет, ни один вид не был изучен в полном объеме на безопасность ни в одной стране мира» [8, с. 4].

Общепринято мнение, что необычные свойства наноматериалов связаны с их размерами: так, диаметр молекулы фуллерена C_{60} равен 0,7 нм. Однако возникает и встречный вопрос: является ли размер частиц основной характеристикой, определяющей их опасность? [3, с. 12]. Есть основания предполагать, что наиболее существенным свойством, детерминирующим специфику токсического действия наночастиц, является их чрезвычайная стабильность. В силу данного свойства они практически не подвержены биотрансформации и не элиминируются из клеток, вызывая в них деструктивные процессы [там же, с. 13–14]. По мнению Г.В. Яковлевой и А.А. Стехина, «основное токсическое действие наночастиц обусловлено не самим веществом, из которого они получены, а их электрофизическими особенностями» [18, с. 26], способствующими доставке токсичных соединений к активным центрам рецепторов и формированию аномально большого количества свободных радикалов.

Еще одним важным свойством наночастиц является значительная кривизна их поверхности, которая в сочетании с трансформацией топологии связи атомов на поверхности ведет к существенному усилению раство-

римости, реакционной способности и иных физико-химических свойств. Токсичность наночастиц также связана с повышенной адсорбцией ими ксенобиотиков, что резко расширяет возможности транспорта внутрь клеток и клеточных органелл, нарушая их биологические функции. При этом «наночастицы не распознаются защитными системами организма... Это ведет к накоплению их в растениях, животных организмах и микроорганизмах, что увеличивает возможность поступления в организм человека» [14, с. 21]. В частности, фуллерены способны проникать через липидные мембраны, модулировать транспорт ионов и преодолевать гематоэнцефалический барьер организма, а также переносить токсичные соединения в виде иммобилизованных комплексов [18, с. 22]. Следует учитывать, что для наночастиц также характерна функциональная зависимость уровня токсичности от дозы и времени воздействия, как и для других химических веществ. Вместе с тем наноразмер сам по себе вызывает радикальные изменения токсикологических свойств веществ: «Наноматериалы не всегда демонстрируют такие же свойства, что и объемные материалы, из которых они были получены» [17, с. 21]. Например, инертный в обычной форме оксид железа при его преобразовании в наноформу приобретает выраженные нейротоксические свойства [3, с. 14].

Негативное влияние наноматериалов на организм человека может носить не только прямой, но и отсроченный характер. Ученые предполагают возможность наличия у наночастиц генотоксического и мутагенного действия, обусловленных высокой проницаемостью для них клеток и тканей, индукцией ими свободных радикалов, способностью проникать в ядро клетки и конъюгировать с ДНК. Поэтому «стремительное развитие нанотехнологий требует столь же быстрой разработки подходов к оценке токсичности наноматериалов, в том числе их мутагенных свойств» [15, с. 26].

На современном этапе установлены три пути поступления наночастиц в организм: ингаляционный, кожный и пероральный (per os) [16, с. 16–21]. Методические подходы к оценке ингаляционного воздействия наночастиц обсуждаются учеными достаточно подробно,

что связано с обширной базой эпидемиологических и токсикологических исследований ультрамалых частиц в воздухе. При этом в отношении методик анализа и контроля воздействия нанопродукции на кожу и *per os* присутствует явная асимметрия. Этот факт тревожен еще и тем, что потребитель нанопродукции чаще всего будет сталкиваться с новыми материалами, улучшенными с помощью нанотехнологий (воздействие на кожу) и лекарственными препаратами, созданными или улучшенными с применением нанотехнологий (пероральное воздействие).

Обращаясь к вопросу безопасности лекарственных препаратов, улучшенных нанотехнологическими способами, отметим, что, несмотря на контроль со стороны Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), полностью подтвердить безопасность лекарственных препаратов, изготовленных с применением нанотехнологий и наноматериалов, нельзя. Так, до сих пор нет однозначного мнения по поводу токсичности фуллеренов, считающихся идеальным средством, обладающим исключительной избирательностью и высокой биодоступностью. Например, была открыта умеренная токсичность фуллеренов в качестве «молекул-повозок». В рамках своих исследований биолог Г. Обердорстер с коллегами проводили испытания токсичности фуллеренов, покрытых белковыми маркерами раковых клеток («клеток-мишеней»). Было обнаружено, что при добавлении раствора фуллеренов (в концентрации 800:1 000 000 000) в аквариумы с дафниями (ракообразные) происходит гибель половины испытуемых особей, а при воздействии раствора фуллерена на рыб возникают повреждения мембран клеток мозга [20]. Несомненно, что и перечень испытаний препаратов на токсичность, и длительность самих клинических испытаний будут расти пропорционально открытию новых, ранее неизвестных негативных эффектов нанолечарств.

Нанотехнологии воздействуют на окружающую среду не только сами по себе, но и в виде отходов нанопроизводства, а также при их превращении в отходы потребления [14]. Так, ученые, проанализировав один из самых распространенных методов производства нанотрубок – химическое осаждение в паровой

фазе (CVD), – обнаружили, что в процессе химических превращений в окружающую среду поступает свыше 10 ароматических углеводородов, в том числе канцероген – полициклический бензапирен. Остальные компоненты «коктейля» негативно влияют на озоновый слой планеты.

Какими же путями осуществляется биодеградация наночастиц? Как она влияет на экологические цепи в живой природе? Какие методы следует применять для экспресс-идентификации и количественного определения наноматериалов в объектах окружающей среды, биосредах и отходах? Каким условиям должны отвечать полигоны по утилизации nanoотходов? Какова степень опасности технологий, направленных на обезвреживание и уничтожение наноматериалов? Четких ответов на поставленные вопросы у мирового научного сообщества пока нет.

Прорывная технология, несомненно, должна сопровождаться параллельным, а в идеале опережающим изучением и предупреждением негативных эффектов, возникающих в результате ее масштабного внедрения. Но, как отмечает Г.Г. Онищенко, «единая методология и стандарты нанотоксикологических исследований за рубежом находятся в стадии разработки» [8, с. 6], в России же к их разработке приступили пока лишь концептуально.

Зарубежные ученые разрабатывают методы наблюдения, позволяющие отличить углеродные наноматериалы от богатых углеродом клеточных структур. Так, коллектив исследователей под руководством А. Портер в своих разработках применял трансмиссионную электронную и конфокальную микроскопию. Комбинирование указанных методов позволило проследить пути миграции нанотрубок в организме человека. Было установлено, что при попадании нанотрубок внутрь макрофагов человека они проникают не только в цитоплазму, но и в некоторые органеллы и клеточное ядро, ассоциируясь с внутриклеточными белками и молекулами ДНК, что в конечном счете приводило к гибели клеток в течение 4 суток [10].

В России изучение вопросов безопасности нанопродукции ведется с конца 2006 года. Руководство данным направлением исследований осуществляет Федеральная служба по над-

зору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. По решению Пленума Научного совета по экологии человека и гигиене окружающей среды РАМН и Минздравсоцразвития РФ, прошедшего в 2008 г., приоритетными задачами, обеспечивающими качество и безопасность нанопродукции и нанопроизводств, были признаны «разработка гигиенических нормативов, определяющих безопасные уровни приоритетных видов наноматериалов в воздухе рабочей зоны, населенных пунктов и жилых помещений, питьевой воде, продуктах питания и других объектах внешней среды, а также регламентация процессов производства, транспортировки, использования и утилизации токсичных наноматериалов, которая исключала бы возможность их воздействия на человека в опасных для здоровья масштабах» [13, с. 88].

Согласно решению Пленума, безопасность наноматериалов должна оцениваться по следующим основным блокам методически значимых проблем:

- методы обнаружения, идентификации и количественного определения наноматериалов в объектах окружающей среды, пищевых продуктах и биологических средах, позволяющие отличить наноматериалы от их аналогов в традиционной, то есть макродисперсной форме;
- изучение взаимодействия наноматериалов с липидами, белками, нуклеиновыми кислотами (ДНК, РНК, клеточные мембраны, рибосомы, ферменты, цитохромы P-450) в системах *in vitro*;
- изучение механизмов проникновения наноматериалов через биомембраны и связывания с мембранными рецепторами в системе *in vitro*;
- изучение изменения характеристик наночастиц в составе модельных систем, воспроизводящих различные среды организма (желудочное и кишечное содержимое, кровь, лимфа, желчь, моча и др.);
- определение параметров острой, подострой и хронической токсичности, органо-токсичности (нейро-, гепато-, кардио-, иммуно-, нефротоксичность и др.) и отдаленных эффектов (мутагенность, эмбриотоксичность, тератогенность, канцерогенность), а также распределения наноматериалов по органам и тканям;

- определение параметров I и II фазы метаболизма ксенобиотиков и системы антиоксидантной защиты;
- изучение влияния наноматериалов на экспрессию генов, генотоксичность, апоптоз, протеомный и метаболомный профили, потенциальную аллергенность;
- изучение влияния в моделях *in vitro* выживаемости пробиотических микроорганизмов нормальной микрофлоры желудочно-кишечного тракта в присутствии наноматериалов, процессов всасывания наноматериалов в желудочно-кишечном тракте на моделях *in situ* и *in vivo* и определение влияния наноматериалов на микробиоценоз желудочно-кишечного тракта [13, с. 88].

Решение поставленных задач при современном состоянии лабораторно-технической базы осуществимо далеко не такими темпами, которые диктует бурное развитие нанопроизводства. Отсутствие современной высокочувствительной аппаратуры, контролирующей состав и воздействие наночастиц, крайне осложняет оценку их влияния на биологические объекты и организм человека. В результате расчетов установлено, что чувствительность комплекса методов физико-химического анализа, применяемых в настоящее время для определения веществ на уровне микроконцентраций (газовая хроматография с селективным детектированием, ВЭЖХ, хромато-масс-спектрометрия, атомная абсорбция и др.), составляет миллиард и выше молекул определяемого вещества. В случае анализа наночастиц это «не всегда пригодно и требует существенной доработки в отношении повышения чувствительности» [7, с. 18].

Исследование поверхности наноматериалов проводят с использованием методов электронной микроскопии высокого разрешения, фотоэлектронной спектроскопии и др. Определение фазового состава осуществляют методами рентгеновской, электронной и нейтронной дифракции. Данные методы, выполненные на современном оборудовании нового поколения, могут быть использованы при аттестации и сертификации наноматериалов, их гигиенической оценке, а также оценке эффективности и безопасности нанотехнологий. Изучение токсичности наноматериалов целесообразно

но проводить по общепринятой методической схеме токсикологических исследований.

Совмещение возможностей оборудования нового поколения и накопленного опыта таких дисциплин, как экология, гигиена, токсикология, патология, молекулярная и клеточная биология, фармакокинетика и биохимия, будет способствовать существенному продвижению к решению *основной цели экологии и гигиены наноматериалов – обеспечению безопасности окружающей среды и здоровья человека в условиях наноиндустриализации.*

В ближайшем будущем контакт человечества с наноматериалами и нанотехнологиями будет усиливаться. Несомненно, окружающая среда также станет объектом положительных и отрицательных воздействий нанотехнологий. Следовательно, «оценка безопасности наноматериалов и нанотехнологий должна иметь наивысший приоритет в условиях ожидаемого их распространения и вероятного воздействия на людей непосредственно или опосредованно через окружающую среду (воздух, воду, почву) и продукты питания» [11, с. 89]. Для обеспечения безопасного будущего человечества необходимо проводить исследования и разработки в области нанотехнологий и наноматериалов параллельно с изучением их экологических и гигиенических аспектов, причем результаты анализа должны находиться в открытом доступе.

Форсированное развитие наноиндустрии способно в корне изменить современные представления о здоровье человека, его долголетию и активном возрасте, комфортности и чистоте окружающей среды. «За нанотехнологиями, или кванторазмерными технологиями, несомненно, будущее. И это не обсуждается» [1, с. 10]. Обсуждаться должны, прежде всего, риски и угрозы нанотехнологического прогресса, требующие глубокого анализа и междисциплинарных научных дискуссий. Не имеет смысла останавливать развитие прогрессивной технологии, которая открывает качественно новые перспективы эволюции человеческого общества. Вместе с тем целесообразно активизировать научный потенциал в области разработки экологических и гигиенических проблем нанотехнологий, стимулиро-

вать субъектов наноиндустрии к разработке экологически безопасных технологий и новых решений в сфере экологии. Необходима модернизация экологического и медицинского образования за счет внедрения «наноконпонентов» во всех изучаемых студентами дисциплинах и развития новых направлений подготовки специалистов широкого профиля для наноэкономики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алферов, Ж. И. За нанотехнологиями будущее. И это не обсуждается / Ж. И. Алферов // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 1. – С. 10–14.
2. Бабкин, В. И. Государственная значимость нанотехнологий / В. И. Бабкин // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 1. – С. 32–36.
3. Жолдакова, З. И. Общие и специфические аспекты токсических свойств наночастиц и других химических веществ с позиций классической токсикологии / З. И. Жолдакова, О. О. Синицына, Н. В. Харчевникова // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 12–16.
4. Иншаков, О. В. Государственная политика развития нанотехнологий: российский и зарубежный опыт / О. В. Иншаков, А. В. Фесюн. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2009. – 48 с.
5. Иншаков, О. В. Нанотрансформация товаров / О. В. Иншаков, А. Р. Яковлев. – Волгоград : Изд-во ВолГУ, 2009. – 32 с.
6. Кац, Е. А. Фуллерены, углеродные нанотрубки и нанокластеры: Родословная форм и идей / Е. А. Кац. – М. : Изд-во ЛКИ, 2008. – 296 с.
7. Малышева, А. Г. Проблемы химико-аналитических исследований при гигиенической оценке наноматериалов и нанотехнологий / А. Г. Малышева // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 16–20.
8. Онищенко, Г. Г. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения в условиях расширенного использования наноматериалов и нанотехнологий / Г. Г. Онищенко // Гигиена и санитария. – 2010. – № 2. – С. 4–7.
9. Петров, В. И. Биоэтика и медицина – союз ради жизни! / В. И. Петров // Биоэтика. – 2008. – № 1. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://www.biosocial.ru/go.php?obj=mgpaper&id=12>. – Загл. с экрана.
10. Подтверждена опасность нанотрубок. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <http://pda.cnews.ru/news/index.shtml?top/2007/11/16/275395>. – Загл. с экрана.

11. Радиков, А. С. Экспериментальная оценка токсичности и опасности наноразмерных материалов / А. С. Радиков, А. В. Глушкова, С. А. Дулов // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 1. – С. 86–89.

12. Рахманин, Ю. А. Влияние квантовых состояний нанобъектов на биологические системы / Ю. А. Рахманин, А. А. Стехин, Г. В. Яковлева // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 4–12.

13. Решение Пленума Научного совета по экологии человека и гигиене окружающей среды РАМН и Минздравсоцразвития РФ «Методологические проблемы изучения и оценки био- и нанотехнологий (нановолны, частицы, структуры, процессы, биообъекты) в экологии человека и гигиене окружающей среды» // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 88.

14. Русаков, Н. В. Эколого-гигиенические проблемы отходов наноматериалов / Н. В. Русаков // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 20–21.

15. Сычева, Л. П. Оценка мутагенных свойств наноматериалов / Л. П. Сычева // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 26–28.

16. Фролов, Д. Развитие nanoиндустрии и экономическая безопасность / Д. Фролов, В. Стратулат // Экономист. – 2010. – № 12. – С. 16–21.

17. Шудегов, В. Е. Дальнейшее развитие nanoиндустрии в Российской Федерации / В. Е. Шудегов, А. Я. Шевченко // Нанотехнологии. Экология. Производство. – 2009. – № 1. – С. 20–27.

18. Яковлева, Г. В. Особенности токсических свойств нанобъектов / Г. В. Яковлева, А. А. Стехин // Гигиена и санитария. – 2008. – № 6. – С. 21–26.

19. Lam, Ch.-W. Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days After Intratracheal Instillation / Ch.-W. Lam, J. T. James, R. McCluskey, R. L. Hunter // Toxicological Sciences. – 2004. – Vol. 77. – P. 126–134.

20. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy / G. Oberdorster [et al.] // Particle and Fibre Toxicology. – 2005. – Vol. 2, № 8. – Electronic text data. – Mode of access: <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/2/1/8>. – Title from screen.

ON ECOLOGICAL ISSUES OF NANOTECHNOLOGIES DEVELOPMENT

N.I. Latyshevskaya, A.S. Strekalova

In the article the necessity of developing nanoecology (ecology of nanoindustry) is substantiated. Key ecological problems of developing nanotechnologies and nanomaterials are defined. The authors intensify the importance of investigating ecological and hygienic aspects of nanotechnologies.

Key words: *nanoecology, nanoindustry, nanotechnologies, nanomaterials, risks, toxicity, safety.*