

Перспективы развития нанотехнологии: национальные программы, проблемы образования*

М. Роко

МАЙКЛ РОКО — доктор наук, председатель подкомитета по нанонауке, нанотехнике и нанотехнологии Национального совета по науке и технологии при президенте США, старший советник Национального научного фонда США. Область научных интересов: нанотехнология, наночастицы, многофазные системы, жидкое состояние.

National Science Foundation (NNF), 4201 Wilson Blvd., Suite 525, Arlington, VA, 22230, E-mail: mroco@nsf.gov

Введение

Нанонаука, нанотехника и нанотехнология открывают новую эру в фундаментальных исследованиях, объединяя науку, технику и образование. Экономичный выпуск нанопродукции закладывает основы долговременного прогресса человечества. Сама возможность работы на атомарно-молекулярном уровне (с последующей «атомной» сборкой больших структур с принципиально новыми свойствами) создает беспрецедентные возможности для понимания природы этих основных «строительных блоков», а также для управления свойствами разнообразных природных и искусственных продуктов. Таким образом, речь идет о возможности создания на основе «атомной» сборки сложных структур и управления их функциональными характеристиками.

В данной статье рассмотрены лишь два аспекта многообразной нанопроблематики — программное финансирование исследований и проблемы образования в этой области.

Финансирование нанотехнологии в мировом масштабе

За последние пять лет (1997–2002 гг.) объемы государственного финансирования исследований и разработок в области нанотехнологии в разных странах увеличились примерно в пять раз (табл. 1). Национальные программы по развитию нанотехнологии приняты уже более чем в тридцати странах мира [1], что, по крайней мере частично, было инициировано утверждением в США Национальной нанотехнологической инициативы (ННИ) [2, 3]. Новейшие открытия в этой области затрагивают важнейшие проблемы физики, биологии и техники. Промышленные круги постепенно убедились в том, что нанотехнология создает новые возможности для развития бизнеса и конкуренции. В соответствии с существующими прогнозами мировой объем производства в области нанотехнологий через 10–15 лет должен превысить 1 трлн долларов, что приведет к созданию 2 млн новых рабочих мест [4].

Таблица 1

Государственные расходы на развитие нанотехнологии в различных странах (в млн дол./г)

Регион	Годы					
	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Западная Европа ¹	126	151	179	200	225	400
Япония	120	135	157	245	465	750
США	116	190	255	270	422	604
Другие страны ²	70	83	96	110	380	520
Общие расходы ³	432	559	687	825	1502	2274
	(100)	(129)	(159)	(191)	(348)	(503)

Примечание. Бюджетный год в США начинается 1 октября предыдущего года, а в большинстве других стран — 1 марта или 1 апреля текущего года. Затраты на нанотехнологию оценивали в соответствии с рекомендациями ННИ (см. [2] и сайт <http://nano.gov>), т. е. в них включены только официальные объявленные данные по ассигнованиям на начало указанного бюджетного года. Реальные расходы обычно превышают эту цифру (например, в 2001 бюджетном году реальный бюджет ННИ составил 465 млн дол., а расходы стран Западной Европы — около 270 млн долл.), но их трудно оценить с достаточной точностью.

¹ Страны Евросоюза и Швейцария.

² Австралия, Канада, Китай, страны СНГ, Корея, Сингапур, Тайвань и др.

³ В скобках приведены расходы в % от уровня 1997 г.

* Перевод с английского канд. физ.-мат. наук А. В. Хачояна

Таблица 2

Государственные расходы США на НИИ (в млн дол.) по различным министерствам и ведомствам в 2001, 2002 и 2003 бюджетные годы (данные обновлены по сведениям на 2 мая 2002 г.)

Министерство, ведомство	2001 г.		2002 г.	2003 г.
	ассигновано	реально истрачено	ассигновано	запрошено конгрессом США
Министерство обороны	110	123	180	201
Министерство энергетики	93	87,95	91,1	139,3
Министерство юстиции	—	1,4	1,4	1,4
Министерство транспорта	—	0	2	2
Агентство по защите окружающей среды	—	5	5	5
НАСА	20	22	46	51
Национальный институт здоровья	39	39,6	40,8	43,2
Национальный институт стандартов и технологии	10	33,4	37,6	43,8
Национальный научный фонд (ННФ)	150	150	199	221
Министерство сельского хозяйства	—	1,5	1,5	2,5
Всего	422	463,85	604,4	710,2

НИИ включает в себя прежде всего выработку общенациональной стратегии междисциплинарных исследований в нанонауке. Аналогичные крупные программы на ближайшие четыре–пять лет, учитывающие потребности науки и промышленности, приняты и поддержаны правительствами Японии и некоторых европейских стран. Кроме того, некоторые страны поддерживают отдельные направления нанотехнологических исследований или концентрируют внимание на конкретных задачах или отраслях производства. Например, Южная Корея в ближайшем десятилетии будет тратить около 10 млн дол./год на разработку чипов для нанoeлектронных запоминающих устройств (этот проект входит в число других, на которые правительство Южной Кореи выделяет около 100 млн дол./год), а Австралия объявила приоритетной областью правительственного финансирования разработку наномасштабных устройств фотоники. Конечно, программы разных стран значительно отличаются друг от друга по масштабам, длительности, направленности, степени связи с промышленным производством и практическим целям, однако нанотехнология в целом развивает и ускоряет процессы международного сотрудничества в области науки, образования и технологии, что требует в свою очередь выработки общей стратегии взаимодействия программ, профессиональных научных сообществ и различных международных организаций, связанных с нанотехнологией.

В табл. 2 приведены данные (см. также сайт <http://nano.gov>) по финансированию различных научно-исследовательских проектов, связанных с нанотехнологией (под этим термином объединены научные и инженерные разработки), десятью ведущими министерствами, агентствами и правительственными организациями США в 2003 финансовом году. Поддерживаются в первую очередь долгосрочные фундаментальные исследования, нацеленные на открытие новых явлений и процессов или разработку новых типов измерительной аппаратуры, а также уже существующие (или организация новых) междисциплинарные исследовательские центры и «сети», дающие возможность совместно пользоваться

сложной и дорогой измерительной аппаратурой. Финансируется также развитие научной инфраструктуры и образовательных или исследовательских проектов, которые относятся к социальным и общественно-экономическим проблемам, связанным с развитием нанотехнологий. Во всех случаях финансовая поддержка осуществляется на конкурсной основе (как между отдельными проектами, так и между направлениями исследований в рамках всей НИИ). Федеральные расходы, связанные с нанотехнологическими исследованиями, в предложенном президентом США проекте бюджета на 2003 финансовый год составляют около 710 млн дол., что на 17 % превышает аналогичные расходы в бюджете 2002 г. (в утвержденном конгрессом бюджете 2002 г. они составляли около 604 млн дол.).

В настоящее время работы в области нанонауки и нанотехнологии не носят характера острой конкуренции (значительной реализации нанотехнологии ожидается лет через пять), вследствие чего на данном этапе наблюдаются партнерские отношения и некоторое «распределение» областей исследования между странами. Для будущего развития нанотехнологии и ее утверждения в качестве самостоятельной научной дисциплины очень важно уже сейчас организовать международное сотрудничество в финансировании работ, сформулировать долгосрочные цели и приоритеты, создать единую метрологическую систему, разработать общие учебные и социальные программы и т. д.

Как уже отмечалось, принятая в США модель НИИ (формально объявленная в январе 2000 г.), основанная на идее сотрудничества, уже получила международное признание и за короткое время стимулировала активность во многих странах. В течение 2001 г. практически все развитые страны также приняли соответствующие национальные программы или приступили к их выработке. Некоторые страны (Япония, Корея, Китай) создали организации, координирующие нанотехнологические исследования в национальном масштабе (подобно Национальному совету по науке и технологии в США).

**Примеры учебных курсов по нанонауке и нанотехнологии,
предлагаемых некоторыми университетами и институтами США**

Название курса	Организация (лектор)
Нанокурс (летний курс для студентов)	Корнеллский университет (А. Кларк, М. Исааксон)
Курс нанотехнологии для студентов университетов и двухгодичных колледжей	Пенсильванский университет (С. Дж. Фонаш)
Получение нанополупроводников (лаборатория)	Калифорнийский университет, Лос-Анджелес (Дж. П. Чанг)
Перспективные квантовые устройства (для аспирантов)	Университет Нотр-Дам
Нанотехнология	Вирджинский университет (М. Эль-Шалл)
Новые технологии	Висконсинский университет, Мэдисон (Р. Хамерс)
Наноструктурные материалы	Ренселерский политехнический институт (Р. Сигел)
Получение наночастиц и наноматериалов методами коллоидной химии	Университет Кларксон (Дж. Н. Фендлер)
Процессы с участием наночастиц	Йельский университет (Д. Рознер)
Наноробототехника	Южнокалифорнийский университет (С. Реквиша)
Химия и физика наноматериалов	Вашингтонский университет (Й. Хиа)
Сканирующая микроскопия и нанофизика	Университет Клемсон (Д. Корелл)
Нанопроизводственные процессы (обучение в системе распределенного интерактивного обучения, объединенная мультимедийная лаборатория)	Университет Арканзаса, совместно со штатами Арканзас, Оклахома и Небраска (А. П. Мальш)
Нанонаука и нанотехника	Пурдю университет

Можно отметить обширные программы стран Евросоюза и Швейцарии. Нанотехнологические исследования ведутся также в России и на Украине, причем основное внимание уделяется перспективным методам синтеза и обработки новых материалов. Некоторые проекты и программы начаты в странах Восточной Европы. В Азиатско-Тихоокеанском регионе нанотехнология успешно развивается в целом ряде стран (Япония, Китай, Южная Корея, Тайвань и Сингапур). В Северной Америке по инициативе Канадского национального совета по научным исследованиям создан Национальный нанотехнологический институт (г. Калгари, провинция Альберта), бюджет которого на пять лет составляет около 80 млн долл. Около 20 научных групп независимо друг от друга работают в Мексике. Необходимость международного сотрудничества очевидна, и уже сейчас подписаны, например, соглашения о сотрудничестве и взаимодействии между Национальным научным фондом США и Европейским Сообществом, штатами Нью-Йорк (США) и Квебек (Канада) и т. д. Кроме этого, Национальный научный фонд регулярно проводит международные семинары (например, в 2002 г. запланировано проведение четырех семинаров: производство и нанотехнология, социальные проблемы нанотехнологии, приборы и инструменты нанотехнологии, наноматериалы). По заявкам финансируется также целый ряд совместных мероприятий.

НИИ США в 2002–2003 гг. будет по-прежнему нацелена на развитие фундаментальных исследований (через систему финансирования ведущих научных программ), а также исследовательских центров, «сетей» и соответствующей инфраструктуры. Ожидается, что в ближайшие два года начнется переход от этапа научных исследований к промышленному производству, что приведет к интенсификации разработок. Приоритет в финансировании будет отдаваться следующим направлениям:

- 1) работы, позволяющие организовать эффективное промышленное производство на основе нанотехнологий;
- 2) разработки в области нанотехнологий, непосредственно связанные с методами детектирования различных видов биологического, химического и бактериологического оружия или защиты от их применения;
- 3) разработки новых типов исследовательской аппаратуры и стандартов;
- 4) образовательные программы и методики подготовки рабочего персонала для будущих нанотехнологических производств;
- 5) повышение участия промышленности в нанотехнологической революции.

После 1 апреля 2002 г. (начало финансового года в некоторых странах) направления (1), (3) и (5) были введены в программы Японии, Тайваня и некоторых других стран. Роль образовательных программ (пункт (4)) особо учитывается в планах Евросоюза, Южной Кореи и Канады. Дополнительным стимулом развития может служить и нарастающее «слияние» нанотехнологий с информационными технологиями, новейшими методами биологии и даже с некоторыми социальными науками; этому посвящен специальный доклад Национального научного фонда США (июнь, 2002 г.) [5].

Проблемы образования

Одним из важнейших условий быстрого и успешного развития нанотехнологии является разработка учебных курсов и программ, которые позволяют профессионально подготовить новое поколение исследователей, инженеров и рабочих, способных работать в этой новой, достаточно сложной и мультидисциплинарной области науки и техники. В течение ближайшего десятилетия основные идеи и концепции структуры вещества в нанометровом масштабе (включая представление об атомарном, молекулярном и супрамолекулярном строении)

Таблица 4

Проекты интегрированного обучения, исследования и профессиональной подготовки

Название проекта	Организация (руководитель)	Год начала
Нанофазные вещества в окружающей среде, сельском хозяйстве и технологии	Калифорнийский университет, Дэвис (А. Навроцки)	1999
Наноструктурные материалы и устройства	Нью-Йоркский университет (Д. Л. Аткинс)	2000
Нанобиотехнология	Университет штата Вашингтон (В. Фогель)	2000
Нанотехнология получения новых электронных и оптических материалов	Университет штата Орегон (Д. Джонсон)	2001
Получение и свойства наночастиц	Университет штата Миннесота (У. Кортшаген)	2001
Мультидисциплинарная программа по методам получения новых материалов	Калифорнийский университет, Лос-Анджелес (Ф. Вудл)	2001
Исследования макромолекулярного строения и инфраструктуры	Политехнический институт штата Вирджиния (Дж. Риффл)	2001
Материалы биофотоники и их применение	SUNY-Буффало (Ф. Картрайт)	2001

Таблица 5

Образовательные программы в университетских центрах (2001–2006 гг.)

Направления деятельности центров (организация)	Основные образовательные программы (добавление к учебному процессу)
Электронный перенос в молекулярных наноструктурах (Колумбийский университет)	Привлечение студентов к сотрудничеству с Нью-Йоркским университетом; специализированные годичные и летние курсы для студентов и аспирантов
Наномасштабные системы в информационных технологиях (Корнеллский университет)	Сотрудничество с промышленностью для поддержки учительской программы; лабораторный практикум по нанотехнологии; вводный курс нанотехнологии; сотрудничество с научным центром в г. Итака (передвижная выставка)
Наносистемы и их использование в приборах (Гарвардский университет)	Программы повышения квалификации учеников и преподавателей средней школы; популяризация достижений нанотехнологии (совместно с Музеем науки в Бостоне)
Интегрированные технологии детекторов и наношаблонов (Северозападный университет)	Повышение квалификации преподавателей высшей школы и распространение учебных материалов в Интернете; поощрение развития малого бизнеса; проведение совместных мероприятий с Музеем науки в Чикаго; летние исследовательские программы для студентов, принадлежащих к национальным и иным меньшинствам
Направленная сборка наноструктур (Ренселерский политехнический институт)	Сотрудничество с промышленностью и колледжами (Монтхаус, Маунт Холуок, Смит, Спеллман и Вильямс) для привлечения к исследованиям непрофессионалов; проведение учительской программы в сотрудничестве с Музеем Джуниор в г. Трой
Нанонаука в биологии и экологии (Университет Райса)	Набор и подготовка персонала для нанотехнологии, привлечение новых кадров; сотрудничество с Высшей школой управления им. Джонса в разработке программ общего образования по нанотехнологии для управленческого аппарата

должны быть включены в учебные программы всех уровней обучения (начиная с дошкольного), подобно тому, как в 40–50 гг. прошлого века система образования вообрала в себя идеи микроскопического строения вещества. О проблемах нанотехнологии должны быть информированы также общественные круги и организации, непосредственно не связанные с наукой, поскольку от них в значительной степени зависят возможности финансирования новых программ.

Ключевую роль в финансировании программ образования и профессиональной подготовки в областях, прямо или косвенно связанных с нанотехнологией,

и мероприятий в США играет Национальный научный фонд совместно с Министерством обороны, Национальным институтом стандартов и технологии, Национальным институтом здоровья и рядом других федеральных агентств [6].

В табл. 3 перечислены некоторые образовательные курсы и программы по нанонауке и нанотехнологии, уже включенные в учебные планы университетов США и рассчитанные на студентов и аспирантов.

В табл. 4 приведены относящиеся к нанонауке и нанотехнологии примеры так называемых интегрированных программ обучения, исследования и профессиональ-

Проекты развития интегрированных (исследовательских и образовательных) программ

Тематика проекта	Организация (ведущий исследователь)
Моделирование поведения материалов на разных масштабах (от атомарных структур до сплошной среды)	Политехнический институт штата Вирджиния (Р. Крилл)
Создание учебника по молекулярному моделированию в Интернете	Университет штата Теннесси в Ноксвилле (П. Каммингз)
Вычислительные методы материаловедения в нанотехнологии	Университет штата Иллинойс, г. Урбана (Д. М. Сеперли)

Примеры образовательных программ по нанотехнологии

Организация	Направление деятельности
Висконсинский университет	Образовательные программы для школ и широкой общественности
Университет Северной Каролины	Программа «НаноМанипулятор»
Ренселерский политехнический институт	Дистанционная лабораторная программа по нанотехнологии для студентов
Университет Райса	Курс «Введение в нанонауку»
Университет Теннесси	Создание сети «Молекулярные модели и моделирование» в Интернете
Университет штата Аризона	Разработка образовательной системы «Интерактивная нановизуализация при обучении в науке и технике»
Иллинойский университет (Чикаго)	Курс «Микро- и нанозлектронные процессы»

ной подготовки, финансируемые Национальным научным фондом США. В рамках этих проектов студенты получают стипендии (на пять лет) для междисциплинарных исследований в лабораториях университетов под руководством ведущих специалистов.

Крупные исследовательские группы, центры и сети, имеющие разнообразное и многоцелевое оборудование, могут играть значительную роль в организации научных исследований, а также программ обучения и профессиональной подготовки. В рамках Национальной нанотехнологической инициативы Национальный научный фонд в сентябре 2001 г. основал шесть центров по нанонауке и нанотехнологии и обеспечил их финансирование на пять лет (предполагается, что финансирование будет продлено и на пять следующих лет). Такие центры позволяют не просто разнообразить и расширить образовательные программы университетов, но и заниматься дополнительной деятельностью (некоторые примеры такого типа приведены в табл. 5). Открытие центров можно рассматривать в качестве развития традиций расширенного обучения и лабораторных исследований, заложенных в ранее существовавших общенациональных системах типа Национальной сети пользователей нанотехнологии, Сети наномасштабного моделирования «Декарт», Научно-технического центра по нанобиотехнологии в Корнеллском университете, а также нескольких центров по материаловедению и техническим исследованиям. Например система обучения в центре Корнеллского университета включает в себя подготовку учителей для школьного и дошкольного образования, вводный курс нанотехнологии для новичков, лабораторный практикум и «библиотеку» описаний соответствующих экспериментов (для преподавателей высшей школы), сотрудничество с передвижной выставкой по нанотехнологии (модульного типа) в Научном центре г. Итака.

Уже с первого года работы этих университетских центров присуждались премии за исследования по социальным аспектам. Специальное внимание социальным проблемам развития нанотехнологии уделяется в центре Университета Райса, специализирующемся на нанотехнологических исследованиях в биологии и экологии. Национальный научный фонд финансирует также создание сайтов в Интернете, содержащих материалы для студентов старших курсов и преподавателей. В качестве примера можно привести сайт Корнеллского университета по нанотехнологии для студентов или сайт для преподавателей по наноструктуре сополимеров, организованный Массачусетским университетом в Амхерсте. Основные образовательные программы центров, финансируемые на сентябрь 2001 г., перечислены в табл. 5. Реализация некоторых проектов по нанотехнологии, разработанных в рамках так называемой системы развития интегрированных (исследовательских и образовательных) программ (табл. 6) создает новые возможности для объединения учебного процесса с научно-исследовательской работой.

Некоторые из дистанционных программ повышения квалификации (табл. 7) ориентированы на школьное и дошкольное образование и работу с небольшими научными организациями, а также на пропаганду идей нанотехнологии для широкой общественности. В Университете штата Пенсильвания под руководством С. Фонаша успешно осуществляется программа технического образования «Региональный центр обучения методам нанотехнологических производственных процессов», которая поддерживается грантами правительства и ННФ на период 2001–2004 г. Целью этой программы (в рамках которой сотрудничают несколько штатов, 14 университетов, колледжи, летние технические школы, промышленность) является расширенная подготовка рабочего персо-

Таблица 8

Общеобразовательные проекты, финансируемые Национальным научным фондом США

Организатор	Проект
Висконсинский университет, Музей мира науки в Милуоки Научный центр в штате Аризона (обучение студентов и школьных преподавателей основам нанонауки и нанотехнологии) Национальный научный фонд	Сделаем наномир понятным! Подготовка исследователей-медиков по нанотехнологии
Представители промышленных кругов и федеральные агентства, связанные с НИИ	Издание брошюры «Чудеса в малом. Огромный потенциал нанонауки», рассчитанной на широкую общественность (Вашингтон, округ Колумбия, Всемирный торговый центр) Издание «Национальная нанотехнологическая инициатива: от прогнозов к коммерциализации» (обзор исследовательских программ в рамках НИИ)

Таблица 9

Международное сотрудничество в области нанотехнологии

Организация	Направление деятельности
Национальный научный фонд и ряд других агентств	Организация групповых поездок молодых ученых США в Японию, Европу и другие регионы для обсуждения своих результатов и знакомства с ведущими центрами нанотехнологии Организация разнообразных двусторонних и международных мероприятий и встреч с участием представителей Евросоюза, Японии, Кореи, Индии, Швейцарии, Германии, Латинской Америки и других стран Азиатско-Тихоокеанского региона
Национальный научный фонд	Проведение международных семинаров по нанотехнологии (напопроизводство; социальные и образовательные проблемы; приборы; наноматериалы)

нала для нанотехнологических производств в штате Пенсильвания. Программа включает в себя курс «Нанотехнологические производственные процессы» для университетов и колледжей, подготовку преподавателей разных уровней, распространение информации о возможностях профессиональной карьеры в новых областях деятельности. В 2001 г. в Техасском университете в Арлингтоне (Технический колледж) начата программа «Содействие исследованиям и обучению в области нанотехнологий», в рамках которой осуществляются «передача» лабораторной практики и опыта, а также различные образовательные курсы.

В конечном счете, пользователем и спонсором любой новой технологии выступает общество, поэтому пропаганда новых идей и возможностей имеет большое значение. Выше (см. табл. 5) уже приводились примеры деятельности такого рода (например, сотрудничество нанотехнологического исследовательского центра в Гарвардском университете с Музеем науки в Бостоне). Другие примеры финансируемых Национальным научным фондом общеобразовательных программ, рассчитанных на широкую аудиторию, приведены в табл. 8.

Наконец, табл. 9 содержит информацию о международном сотрудничестве в области образования.

Заключение

В статье рассмотрены перспективы двух ключевых проблем развития нанотехнологии на национальном уровне: образование и обучение нового поколения, а также возможности международного сотрудничества и конкуренции, которые быстро растут. В взаимосвязанном мире, основанном на знаниях, роль этих проблем будет

увеличиваться и они должны стать предметом дальнейшего интенсивного изучения.

* * *

Автор благодарит членов Национального совета по науке и технологии, а также членов подкомитета по нанонауке, нанотехнике и нанотехнологии за разработку национальной политики в отношении нанотехнологии и ее применений. Мнение автора не обязательно отражает официальную позицию Национального совета или Национального научного фонда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Roco M. C. J. Nanoparticle Res., 2001, v. 3, № 5–6, 2001, p. 353–360.
2. Nanotechnology Research Directions. Eds. M. C. Roco, W. S. Williams, P. Alivisatos. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2000 (русский перевод: «Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований»). Под ред. М. С. Роко, В. С. Уильямса, П. Аливисатоса. Пер. с англ. под ред. Р. А. Андриевского. М.: Мир, 2002).
3. NSTC, National Nanotechnology Initiative and Its Implementation Plan, Washington, D.C., 2000.
4. Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology. Eds. M. C. Roco, W. S. Bainbridge. Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2001.
5. Converging Technologies for Improving Human Performance. Eds. M. C. Roco, W. S. Bainbridge. NSF-DOC Report, June 2002, Virginia, USA.
6. NSTC, National Nanotechnology Initiative and Its Implementation Plan, Washington, D.C., 2002.