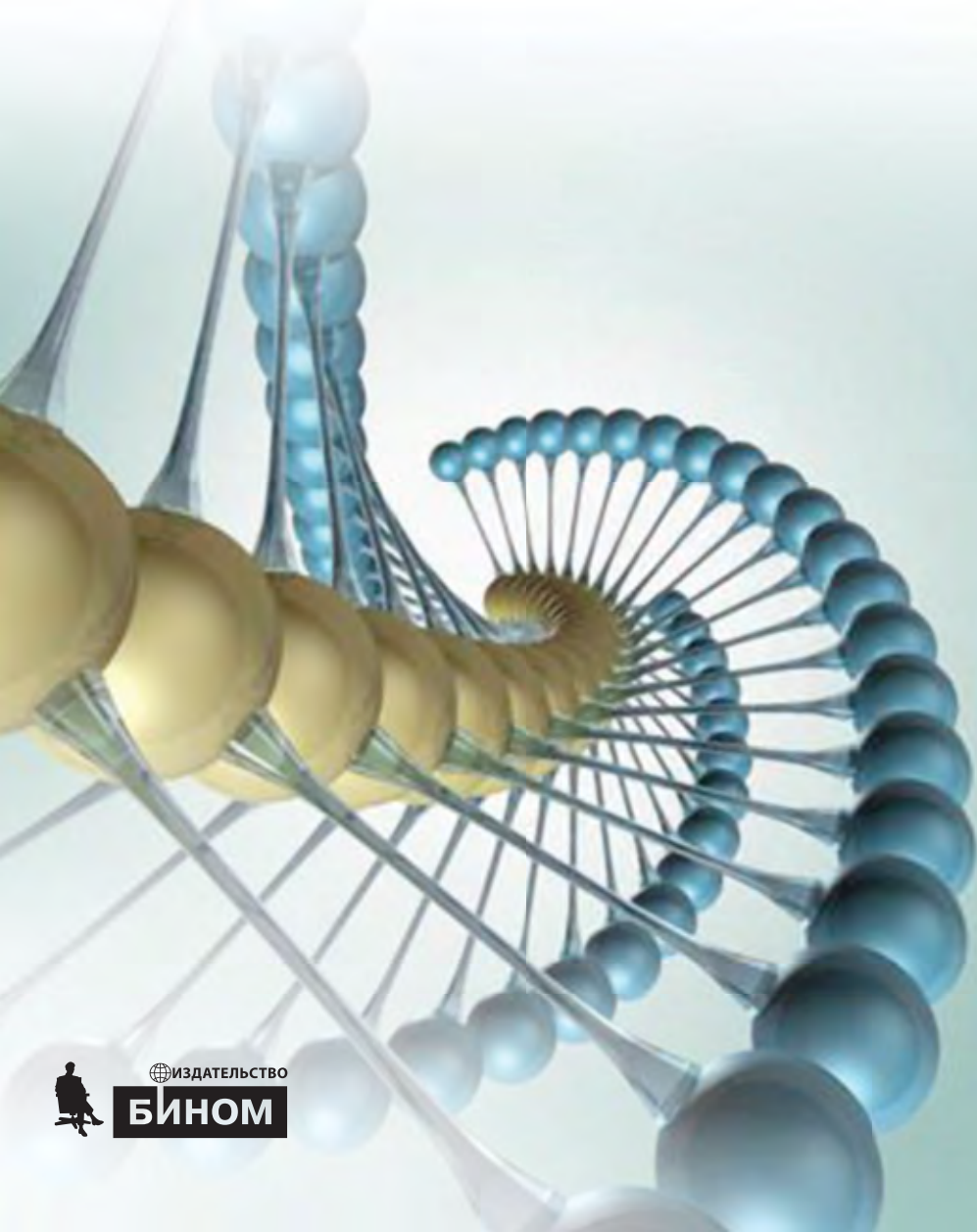


Ю.И. Головин

НАНОМИР БЕЗ ФОРМУЛ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

Ю. И. Головин

НАНОМИР БЕЗ ФОРМУЛ

Под редакцией
профессора Л. Н. Патрикеева



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2011

УДК 60
ББК 20
Г60

Головин Ю. И.

Г60 Наномир без формул / Ю. И. Головин ; под ред. проф. Л. Н. Патрикеева. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 543 с. : ил.

ISBN 978-5-9963-0292-5

Основные идеи и принципы нанонауки и нанотехнологий изложены в этой книге доступно для понимания школьников, учителей, инженерно-технических работников смежных отраслей, представителей социально-гуманитарных профессий, которые в ближайшем будущем могут столкнуться с нанотехнологиями в своих предметных областях или на бытовом уровне.

В книге систематизированы нанообъекты, методы их получения и исследования, описаны магистральные направления развития науки о наноструктурах и важнейшие сферы применения нанопродуктов: электроника, аэрокосмическая техника, медицина и здравоохранение, оборона и национальная безопасность, потребительские товары. Обсуждаются морально-этические проблемы и социально-экономические последствия нанореволюции.

**УДК 60
ББК 20**

**По вопросам приобретения обращаться:
«БИНОМ. Лаборатория знаний»**

Телефон: (499) 157-5272

e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-9963-0292-5

© БИНОМ. Лаборатория
знаний, 2011

Оглавление

Предисловие	5
Введение	9
<i>Литература к введению</i>	18
Глава 1. Нанотехнологии — что это такое?	21
1.1. Основные понятия	21
1.2. Зачем нужны нанотехнологии?	34
1.3. Зарождение и развитие сферы нанотехнологий и ее перспек- тивы	36
1.4. Организационные финансово-экономические аспекты развития нанотехнологий	43
1.5. Социальные и гуманитарные аспекты развития нанотехнологий	48
<i>Литература к главе 1</i>	51
Глава 2. Азы нанотехнологий.	53
2.1. Специфика наномира	54
2.2. Роль свободных и внутренних поверхностей	60
2.3. Зарождение и рост наночастиц	61
2.4. Размерные эффекты	64
2.5. Самоорганизация и самосборка	81
2.6. Две технологические парадигмы: «сверху вниз» и «снизу вверх»	85
<i>Литература к главе 2</i>	88
Глава 3. Как это «пощупать», увидеть и измерить?	90
3.1. Микроструктурный анализ	94
3.2. Электронная микроскопия	101
3.3. Сканирующая зондовая микроскопия	106
3.4. Дифракционный анализ	127
3.5. Спектральные методы	138
3.6. Методы определения размеров наночастиц	153
<i>Литература к главе 3</i>	155
Глава 4. Наноматериалы	158
4.1. Строительные, конструкционные и функциональные мате- риалы	162
4.2. Наночастицы и нанопорошки	163
4.3. Наноуглеродные частицы и материалы	168
4.4. Тонкопленочные структуры	184
4.5. Объемные наноструктурированные материалы	188
4.6. Природа физико-механических свойств наноматериалов	224
4.7. Стабильность структуры и свойств наноматериалов	227
4.8. Реализованные и перспективные применения наноматериалов .	229
<i>Литература к главе 4</i>	236

Глава 5. Нанoeлектроника	242
5.1. Закон Мура	242
5.2. Основные функции нанoeлектроники	246
5.3. Фундаментальные пределы миниатюризации	250
5.4. Совершенствование традиционной «кремниевой» электроники	251
5.5. Микроэлектроника «рядом с кремнием»	280
5.6. Электроника «без кремния»	285
<i>Литература к главе 5</i>	300
Глава 6. Нанотехника	303
6.1. Наноприборы, наномашинь, наносистемы	303
6.2. Глобальная энергетика, энергосбережение и НТ	349
6.3. Нанотехнологии в аэрокосмической отрасли	361
<i>Литература к главе 6</i>	376
Глава 7. Наноматериалы и нанотехнологии в живых системах ..	378
7.1. Нанобиотехнологии	379
7.2. Наномедицина	400
7.3. Нанотехнологии и защита окружающей среды	413
<i>Литература к главе 7</i>	418
Глава 8. Нанотехнологии и нанопродукты	421
8.1. Строительство	421
8.2. Сельское хозяйство	428
8.3. Пищевые продукты	431
8.4. Потребительские товары	433
<i>Литература к главе 8</i>	439
Глава 9. Военные приложения нанотехнологий	441
9.1. Оборонные нанотехнологические разработки	442
9.2. Перспективы военных приложений нанотехнологических раз- работок	450
<i>Литература к главе 9</i>	455
Глава 10. Социогуманитарные аспекты развития нанонауки и нанотехнологий	456
10.1. Философский взгляд в будущее	461
10.2. Нанозтика	471
10.3. Образование и просвещение в области нанотехнологий	479
10.4. Прогнозирование социально-экономических последствий нано- революции	501
10.5. Юридические аспекты развития нанотехнологий	513
10.6. Охрана интеллектуальной собственности в области нанотехно- логий	522
<i>Литература к главе 10</i>	533
Заключение	539

ПРЕДИСЛОВИЕ

Если бы меня спросили, какая область науки и техники может обеспечить нам прорыв в будущее, я бы назвал нанотехнологию.

*Из выступления в Конгрессе США (1998 г.)
проф. Н. Лейна — бывшего директора Национального
научного фонда США и советника президента США
по вопросам науки и техники*

В последние несколько лет мы все чаще и чаще слышим слова с приставкой «нано»: наномир, нанонаука, нанотехнология, нанотехника, наноматериалы, наноэлектроника, нанобиотехнология, наномедицина и т. п., причем не только от ученых и инженеров, но и от администраторов, экономистов, экологов, медиков, политиков, социологов, журналистов. Это и неудивительно — во времена взрывообразного развития новой области науки, ее огромного значения для настоящего и будущего, так и должно быть.

Десятичная приставка «нано» происходит от греческого слова «*νανος*» — карлик, гномик, но сейчас означает одну миллиардную часть чего-либо. Таким образом, 1 нанометр — это одна миллиардная часть метра или, что то же самое, одна миллионная часть миллиметра, или одна тысячная часть микрометра. Аналогично, 1 наносекунда — это одна миллиардная часть секунды и т. д. Десятичные приставки (в том числе и «нано») к основным единицам используются уже многие десятилетия. Но в современном контексте применение терминов «наномасштабные объекты», «наноструктуры», «нанопродукция», «нанотехнологии» означает указание на новую сферу деятельности, изучающую и использующую объекты наномира с очень специфическими (зачастую уникальными) свойствами и обладающую вследствие этого гигантским научно-технологическим и социально-экономическим потенциалом.

Достижения науки и высоких технологий последней четверти прошлого века убедительно продемонстрировали, какие громадные возможности сулит использование специфических явлений и свойств вещества в нанометровом диапазоне размеров. Ключевыми особенностями при этом являются размерные эффекты (сильная зависимость любых характеристик материала от определяющих размеров структуры в нано-

масштабной области), способные радикально изменить свойства вещества, а также явления самосборки и самоупорядочения атомов и молекул на нанометровых расстояниях, как это делает живая природа в биологических объектах. И, воспользовавшись знанием этих особенностей, можно добиться поразительных результатов при создании самых различных изделий и их последующем производстве в промышленных масштабах.

В индустриально развитых странах Запада наступление нанотехнологий началось в конце прошлого столетия. На сегодняшний день уже в 55 странах приняты и выполняются хорошо финансируемые комплексные национальные программы развития nanoиндустрии, в которую входят: фундаментальная наука, разработка и производство нанопродукции, образование, здравоохранение, оборона и безопасность, экология. По всем признакам мир вступает в эпоху тотальной нанореволюции, способной затмить своими результатами последствия компьютерной революции конца XX в. Однако любая революция — это прежде всего переворот в сознании людей. Без него невозможно успешное развитие каких бы то ни было новых отраслей знаний, экономики, социальных отношений. В этой связи в первую очередь необходима экстренная программа ознакомления и обучения основам нанонауки и нанотехнологий не только инженеров и технологов, но и самых широких кругов населения. Подобные программы приняты и получают государственное финансирование в США, Евросоюзе, ряде азиатских стран. Для их постановки и обсуждения в России необходима определенная среда и хотя бы небольшое «затравочное» количество специалистов различного профиля, знакомых с предметом в объеме, достаточном для осознания фронта и объема работ, стратегических, экономических и социальных последствий, преимуществ и опасностей освоения нанотехнологий и нанотехники. Нужна также соответствующая литература.

Другая важная сторона этого вопроса — необходимость быстрого обеспечения нарождающейся nanoиндустрии. По оценкам экспертов из РОСНАНО, созданной в России в 2007 г., к 2015 г. для этой отрасли экономики нашей стране потребуется около 1 млн специалистов разного уровня. Их необходимо готовить уже сейчас, начиная знакомство с азами нанотехнологий прямо со школьной скамьи, чтобы сориентировать молодежь перед выбором профессии. Отчасти книга служит этой цели.

Автор стремился сделать книгу доступной и увлекательной для широкого круга читателей: школьников, учителей, инженерно-технических работников смежных отраслей, представителей социально-гуманитарных профессий различных специальностей. В первую оче-

редь это коснулось стиля изложения и использования формул. Последнее отражено в названии книги. До некоторой степени оно, конечно, условно, поскольку небольшое число формул в книге все-таки есть. Но их наличие не определяет характера изложения, сориентированного на понимание существа вопроса, доступного любому здравомыслящему человеку. При первом чтении их вполне можно пропускать без большого ущерба для восприятия идей и осознания ключевых принципов нанотехнологий. Конечно, формулы изобретены для того, чтобы в максимально компактной и общей форме отображать количественные связи в природе, но, с другой стороны, по остроумному замечанию крупнейшего астрофизика Стивена Хокинга (кстати, не чуравшегося написания замечательных научно-популярных книг), каждая формула уменьшает число потенциальных читателей книги вдвое. Помимо полшутливой сентенции здесь также можно усмотреть и прекрасный пример того, как математическое выражение для показательной функции легко и изящно переводится на обычный, но вместе с тем образный язык.

Вместе с тем автору хотелось выстроить определенную логику изложения и систематизировать все основные направления развития науки и нанотехнологий, а не давать «нарезку» разрозненных, пусть и интересных фактов. Разумеется, имелось в виду не только привести классификации этой обширной сферы, но и насытить материал наиболее яркими примерами уже осуществленных и используемых на практике разработок или обещающих быть таковыми в ближайшем будущем. Насколько удалось соединить и примирить эти зачастую противоречивые устремления — судить читателю.

В значительной мере материал книги является обобщением опыта международного сообщества и, до некоторой степени, — опыта автора в деле организации наноцентра, разработки программ фундаментальных исследований и обучения основам нанотехнологий, инновационного развития и социализации знаний в этой области. Постановка и решение проблем нематериального характера (одновременно с естественнонаучными и технологическими) составляют важнейшую часть стратегии общекультурного освоения продуктов нанотехнологий обществом.

Нет никакой возможности охватить и даже перечислить все аспекты этой многообразной междисциплинарной деятельности в небольшой книге. Вместе с тем автор стремился хотя бы кратко представить все ключевые направления развития и сферы приложения нанотехнологий, отражая наиболее яркие и привлекательные стороны и очерчивая круг вопросов первостепенной важности. Разумеется, предлагаемая читателю книга не может служить заменой специальных изданий по каж-

дому из затронутых направлений, список которых дан в конце каждой главы.

В столь широкой по охвату книге, безусловно, не везде удалось выдержать одинаковую глубину и стиль изложения, правильно расставить акценты, сослаться на все существенные источники и избежать неточностей. Конечно, эта книга, как и всякая другая, не свободна от некоторой субъективности, обусловленной профессиональными пристрастиями автора, эстетическими предпочтениями, ограниченностью объема и т. д. Авторские книги — это ведь переплетенные люди, как однажды сказал А. С. Макаренко. Автор вполне отдает себе в этом отчет и будет признателен за любые конструктивные замечания.

Книга написана при поддержке грантов Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009...2013 гг.) и Аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009...2010 гг.). Многие темы и ракурсы навеяны многолетним общением с многочисленными коллегами, среди которых особо хотелось бы отметить В. И. Альшица, Р. А. Андриевского, Ю. В. Баранова, В. И. Бетехтина, П. Ю. Бутягина, А. М. Глезера, В. Е. Громова, С. Н. Дуба, За-кревского, Э. В. Козлова, Н. Л. Клячко, М. М. Кришталла, Д. Л. Мерсона, Ю. В. Мильмана, Ю. А. Осипьяна, Б. И. Смирнова, Б. Я. Фарбера, С. З. Шмурака. Большую помощь в оформлении рукописи оказали О. В. Зайцева и С. С. Разливалова. Ряд полезных критических замечаний высказал мой сын Д. Ю. Головин. Инициировал издание книги профессор Л. Н. Патрикеев. Всем им автор выражает свою искреннюю признательность.

ВВЕДЕНИЕ

Размеры — «нано»,
возможности — «гига»!

Всего 4 или 5 лет назад лишь очень немногие российские ученые и инженеры работали в области исследования наноструктур и разработки нанотехнологий (НТ), и далеко не все специалисты смежных областей имели представление об этой сфере деятельности, не говоря уж о широких слоях общества. Однако после принятия нескольких федеральных целевых программ, создания Российской государственной корпорации нанотехнологий (РОСНАНО) с миллиардным в долларовом исчислении бюджетом, выступлений Президента РФ и членов Правительства в средствах массовой информации о необходимости ускоренного освоения новых революционных технологий трудно найти человека, который ничего не слышал о НТ. Более того, возникла волна ажиотажа, и в ее шуме и пене могут потеряться ориентиры и затушеваться ключевые моменты.

Некоторые искренне верят в безграничные возможности НТ, обещающие настоящую революцию в промышленном производстве и социально-экономической сфере. Другие, и среди них есть серьезные ученые, с явным неодобрением относятся к поднятой вокруг нанотехнологий суете и рассматривают это как неизбежное зло, всегда сопровождающее крупные проекты. Есть и те, кто считает крикливые заявления и оголтелую рекламу признаками очередного околонучного «пузыря», основной задачей которого является выкачивание бюджетных средств для финансирования своих лабораторий и исследований, проводившихся, в общем-то, и до нанотехнологического бума.

Во взвешенной оценке ситуации нуждаются как сами ученые, так и органы управления, отвечающие за распределение бюджетных средств. Заинтересованы в этом и промышленные круги, и население в целом. В конечном итоге, особенно в условиях рыночной экономики и развитого гражданского общества, именно обыватель и рынок должны решить (в том числе и путем инвестирования, голосования за бюджеты и выбора тех или иных продуктов и услуг на рынке), жизнеспособно ли и насколько конкурентно предлагаемое новое по отношению к традици-

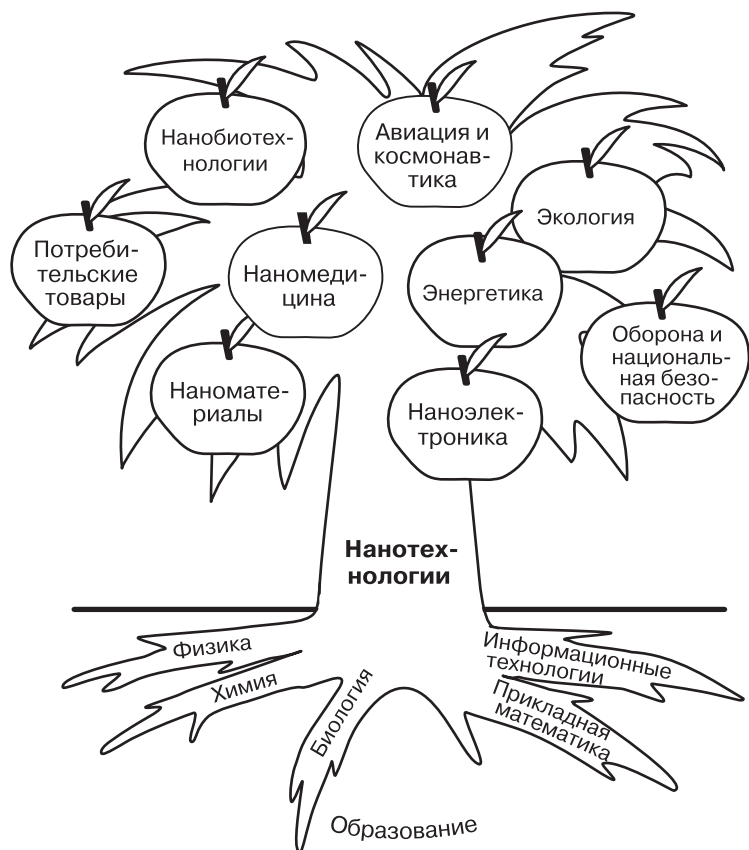


Рис. В.1. Почва, корни и плоды нанотехнологий

онному. Для осознанного выбора необходима объективная и доступная информация, полученная всесторонним анализом достоинств и недостатков новых продуктов и услуг.

Большинство экспертов в области стратегического планирования, научно-технической политики и инвестирования уверены, что в ближайшее десятилетие нас ждет новая научно-техническая революция — нанореволюция, задействующая все области науки, производства, национальной безопасности, медицины, быта, отдыха и развлечений. Последствия ее будут обширнее и глубже, чем изменения, вызванные компьютерной революцией последней трети XX в. — ожидается широко-масштабное и системное вторжение наноструктурированных материалов, изделий и способов их получения буквально во все сферы жизни (рис. В.1) [В.1– В.8]. Поэтому 55 развитых и развивающихся стран мира к 2009 году имели в качестве приоритетных государственные программы

развития НТ, а число городов мира, в которых проводятся крупномасштабные исследования в нанонауке и жители которых опубликовали более 1000 статей по НТ, приближается к 100 (рис. В.2). Из них только три находятся в России (Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск) [В.9].

Так, например, в США в 2000 г. была принята федеральная программа «Национальная нанотехнологическая инициатива» (ННИ). Запланированные в ней ежегодные объемы инвестиций увеличились за 5 лет почти в 4 раза и приблизились в 2004 г. к 1 млрд долларов. В настоящее время (2011 г.) программа продолжает выполняться и имеет ежегодный бюджет свыше 1,5 млрд долларов. Важность развития НТ также подтверждает тот факт, что инвестиции частных фирм и темпы их роста заметно превышают правительственные, вследствие чего их доля неуклонно возрастает (в США уже превышает объем ежегодного федерального финансирования).

В 7-й Рамочной программе научно-технического развития Евросоюза на 2007–2013 гг. (ЕР7) раздел «Нанонаука, нанотехнологии, материалы и новые производственные технологии» относится к приоритетным и так же обильно финансируется (4,8 млрд евро, т. е. около 7 млрд долларов США). Суммарно всеми странами, участвующими в нанотехнологической гонке, в исследования и разработки в области «нано» инвестировано в 2008 г. около 15 млрд долларов (примерно половина из них — вложения частного бизнеса). Стоимость продукции, выпущенной с использованием этих технологий, превышает 150 млрд долларов в год. А если учесть, что современная микроэлектроника фактически уже тоже вошла в нанобласть (технологический шаг 45 нм уже применяется в серийном производстве процессоров Intel с 2008 г., а шаг 32 нм освоен к началу 2010 г.), то суммарный рынок прямых и косвенных продуктов нанотехнологий вырос за последние три года примерно в три раза (т. е. он рос со средней скоростью более 40% в год) и сейчас составляет около 2 трлн долларов. Нет сомнений, что и в условиях глобального экономического кризиса этот сегмент будет быстро нарастать из года в год, и именно ускоренное освоение новых революционных технологий и поможет преодолеть накопившиеся проблемы и трудности.

До 2007 г. в России отсутствовала комплексная государственная программа развития НТ, хотя в рамках программ исследований и разработок по приоритетным направлениям научно-технологического комплекса было предусмотрено выполнение работ по некоторым конкретным темам. Однако суммарный объем их финансирования не превышал нескольких десятков миллионов долларов США, что было несопоставимо с ассигнованиями любой из развитых стран. Также удручает доля России на мировом рынке продукции НТ — всего 0,07%.



Рис. В.2. Города, в которых количество публикаций, попадающих в разделы «нанонаука и нанотехнологии», превышает 1000

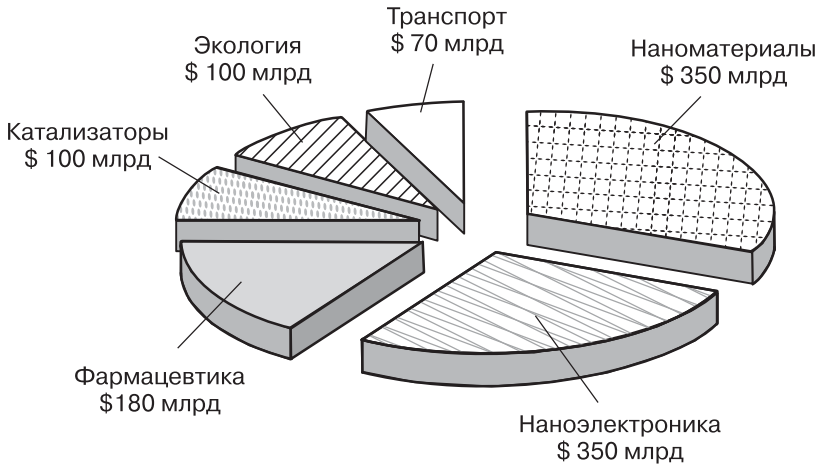


Рис. В.3. Прогноз развития рынка продукции нанотехнологий на 2015 год

В апреле 2007 г. Президент РФ выступил с инициативой «Стратегия развития наноиндустрии», в том же году было принято несколько масштабных национальных программ, создана Российская государственная корпорация нанотехнологий, в Российской академии наук было организовано «Отделение нанотехнологий и информационных технологий». Суммарный объем финансирования по этим программам измеряется десятками миллиардов рублей в год, что вполне соизмеримо с бюджетами крупнейших национальных нанотехнологических программ развитых стран. В результате выполнения этих программ к 2015 г. планируется довести долю нашей НТ-продукции на мировых рынках до 3% (к этому времени прогнозируемый объем рынка НТ составит около 1 трлн долларов (см. рис. В.3), не считая рынка компьютерной наноэлектроники, который на порядок больше), что превысит нынешний уровень более чем в 40 раз. Это очень трудная и амбициозная задача, но если она будет решена, Россия не сравняется по этому показателю даже с Тайванем, который планировал иметь те же 3% рынка уже в 2010 г.

Это вполне объяснимо после двух десятилетий вовсе не лечебного «голодания» российской науки. Да и сейчас, несмотря на плановое бюджетное финансирование РАН, вузов, отраслевых НИИ, запуск нескольких крупных целевых научно-технических программ, расходы на науку в России составили в 2008 г. чуть больше 1% ВВП. Лишь к 2020 г. их планируется довести до 3%. Для сравнения: расходы на те же цели в странах Европейского союза составляют сейчас 1,84% от ВВП, и их планируется довести до 3% гораздо раньше, чем к 2020 г. Еще более впечатляющие цифры демонстрируют страны Тихоокеанского региона:

за период с 2000 по 2006 г. Япония увеличила этот показатель с 3,04 до 3,39%, Южная Корея — с 2,39 до 3,23%, а Китай — с 0,9 до 1,42%.

Согласно мнению многих авторитетных экспертов, с которым можно согласиться с некоторыми оговорками и дополнениями, высокотехнологичный сектор экономики — так называемый блок NBIC (нано-, био-, информ- и когнитивные технологии) — может успешно развиваться только в условиях прогресса в трех связанных и взаимозависимых сферах:

- 1) фундаментальная наука,
- 2) образование и просвещение,
- 3) инновационные разработки и бизнес.

Для успешного развития НТ и их внедрения во все сферы жизни необходимо углублять представления о структуре и свойствах нанобъектов и наноматериалов, фундаментальных принципах и закономерностях их поведения, разрабатывать специальные технологии их получения, исследования, крупномасштабного производства и контроля качества. Помимо этого следует расширять существующие и подготавливать новые области применения нанопродуктов, системно и комплексно оценивать последствия их глобального внедрения во все сферы жизни человека.

Разработка и производство нанопродукции требует высококачественного естественно-научного образования, что поднимет престиж и внимание к учебным заведениям всех уровней, интеллектуальный потенциал общества в целом. Необходимо воспитать специалистов нового поколения, владеющих этой новой сферой деятельности, объединяющей фундаментальную науку и прикладные знания. Они должны знать всю цепочку: концептуальный дизайн → техническое проектирование → разработка технологии изготовления → производство и оценка качества → эксплуатация и утилизация отслужившей свой срок нанопродукции.

Чтобы не оказаться на обочине мировой цивилизации, нам необходимо энергично выстраивать инфраструктуру инновационной экономики, формировать соответствующую среду на всех уровнях управления, совершенствовать систему образования, разумно инвестировать в фундаментальную науку и поддерживать инновационные разработки, быстро доводя их до рынка.

Однако научно-технический прогресс сам по себе не может быть самоцелью цивилизации. Его генеральной задачей является расширение границ познавательной активности, обогащение мировоззрения, формирование и удовлетворение духовных и материальных потребностей людей, улучшение качества жизни, гармоничное развитие общества и его социальных институтов, сохранение и приумножение природ-

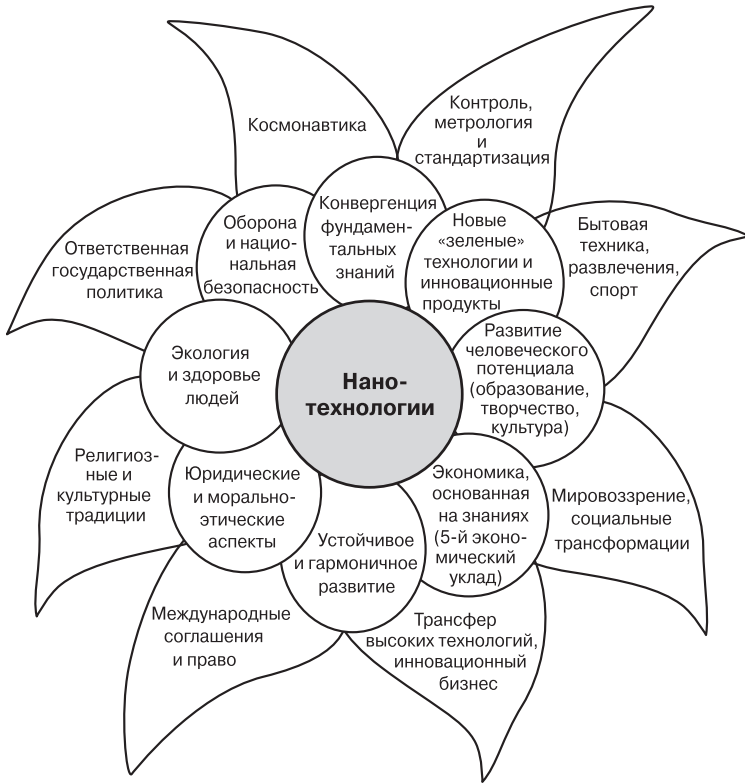
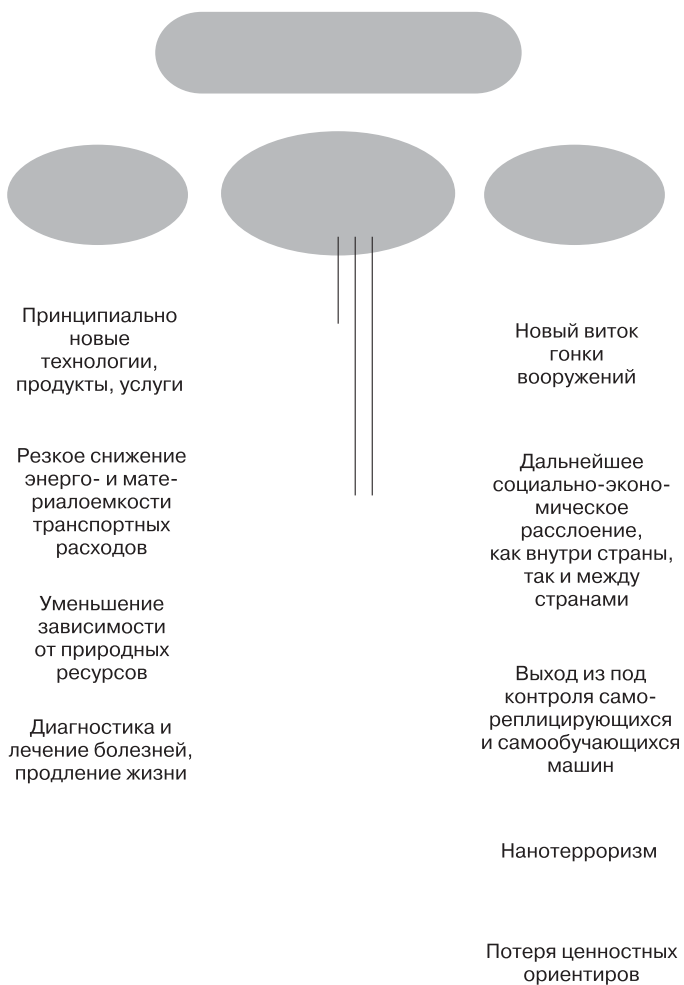


Рис. В.4. Политические, социально-экономические и гуманитарные аспекты развития НТ

ных богатств для будущих поколений. Учитывая громадные, ни с чем не сравнимые возможности НТ, ее всепроникающий, системный характер и способность революционизировать многие сферы жизни, необходимо опережающими темпами анализировать многочисленные политические, социально-экономические, юридические, этические и другие гуманитарные аспекты развития наноауки и нанотехники (рис. В.4).

Наконец, намечая всестороннее обсуждение проблем развития НТ, невозможно уклониться и от рассмотрения неопределенностей и рисков (помимо безусловных благ), связанных с широким внедрением нанопродукции в нашу жизнь (рис. В.5).

Гармоничное и безопасное развитие НТ невозможно без налаживания кооперации между потенциальными пользователями и разработчиками НТ. Только тогда инвестиции будут оправданными и успешными, а нежелательные последствия вовремя обнаружены, проанализированы и погашены. В общем смысле эта проблема не нова. Человеческий по-



[. . .]

Головин Юрий Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ, организатор и директор научно-образовательного центра «Нанотехнологии и наноматериалы» Тамбовского государственного университета им. Г.Р. Державина, автор более 400 научных работ, включая 8 монографий, учебных пособий и обзоров, свыше 40 изобретений. Руководил несколькими десятками проектов, выполняемых по грантам и контрактам РФФИ, Министерства образования и науки Российской Федерации, Королевского научного общества (Великобритания), научно-производственной компании Zircoa Inc. (США). Область научных интересов – электромагнитные явления в системе атомных дефектов твердых тел, наноструктурное материаловедение, физическая наномеханика.

Ю.И. Головин – инициатор и научный редактор издания переводного пособия Ч.Пула и Ф.Оуэнса «Нанотехнологии», выдержавшего в период с 2003 по 2010 гг. пять изданий в издательстве «Техносфера», автор нескольких книг по нанотехнологиям (*Введение в нанотехнологию*. М. 2003; *Введение в нанотехнику*. М. 2007; *Наноидентификация и его возможности*. М. 2009), получивших большую известность и внесших заметный вклад в ознакомление российских ученых и инженеров с ключевыми идеями и достижениями нанотехнологий.