

ДОКТРИНА*

развития работ в Российской Федерации в области нанотехнологий

В. Шевченко,
В. Шудегов



Из стенограммы Координационного совета по развитию нанотехнологий при Комитете Совета Федерации по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии от 12 декабря 2006 г.

Россия с некоторым опозданием (примерно 5-6 лет) приступила к организации работ в области нанотехнологий.

Это произошло после того, как США первыми декларировали огромное приоритетное значение нанотехнологий для развития страны в XXI веке. После США такое же признание осуществили все промышленно развитые страны мира. Руководство США объявило национальную нанотехнологическую инициативу (НИИ) высшим приоритетом и считает, что это даст возможность существенно развить химические, физические, биологические, технические, медицинские и материаловедческие науки, будет способствовать междисциплинарной кооперации в науке и производстве.

Администрация США верит, что нанотехнологии окажут глубокое воздействие на экономику США и социум страны, также как было с информационными технологиями или молекулярной биологией и генетикой.

Нанотехнологическая инициатива включает в себя фундаментальные исследования, формулировку сверхзадач (Grand Challenges), создание исследовательской и промышленной инфраструктуры, а также рынок труда.

В американской программе впервые сделана попытка определить предмет обсуждения, так как уже было понятно, что термин "нанотехнологии" весьма условен. Необходимо привести это определение полностью.

"Возникновение областей нанонауки и наноинженерии, т.е. возможности работать на молекулярном уровне, атом к атому, для создания больших структур с принципиально новой молекулярной организацией, ведущей к беспрецедентному пониманию и контролю над фундаментальными строительными блоками для всех физических объектов. Наномасштаб – это не только следующий шаг в миниатюризации. По сравнению с физическими свойствами и поведением отдельных молекул или объемных материалов материалы со структурными особенностями в области $\approx 1\div 100$ нанометров показывают важные изменения, которые не могут быть объяснены традиционными моделями и теориями. Развитие этих новых областей, видимо, приведет к изменению по существу всего научно-технического многообразия – вакцин, компьютеров, автомобильных шин и т.д. Всего и не представишь. Но это будет спроектировано и сделано". Это сказано в самом начале документа высшего правительственного уровня и до настоящего времени является самым четким и ясным для научных и инженерных работников и широкой общественности. Понятно, что не Президент США сформулировал это определение – это продукт обсуждения самого широкого круга специалистов, в особенности тех, кто своими научными и инженерными достижениями в предшествующие годы

* Доктрина – система взглядов, руководящий принцип. БЭС, 1997 год, Научное издательство "Большая Российская энциклопедия".

обусловил этот прорыв. Их имена, также как и имена чиновников из правительства США, опубликованы в этой же программе. Сама программа имеет авторов.

В Российской Федерации в 2004 году Федеральное агентство по науке и инновациям выпустило "Концепцию развития в РФ работ в области нанотехнологий до 2010 года". Указано, что эта концепция разработана совместно с РАН, Минпромэнергетики РФ, Минобороны РФ, МИД РФ, ФААЭРД и согласована с МЭРТ РФ и Минфином РФ. Ни одной фамилии авторов не приведено. Дадим определение "нанотехнологии" из этого документа полностью. "Нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм хотя бы в одном измерении и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществить их интеграцию в полноценно функционирующие системы большого масштаба. В более широком смысле этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и исследований таких объектов".

Ранее данное в США определение является более фундаментальным, поэтому очевидна огромная разница в подходах в США и РФ. Изучение особого состояния природы (наномира) подменено в Концепции узким и в отдельных местах неверным и даже терминологически невнятным текстом. Все сводится к способу, методу, приему, к частностям. Вероятно, это определение выработывалось специалистами, большинство из которых в этой области не работало.

Позднее, в декабре 2005 года, Минобрнауки РФ подготовило доклад "О состоянии и перспективах работ в области развития нанотехнологий в РФ", подписанный директором Департамента государственной научно-технической и инновационной политики А.В. Хлуновым. В докладе не содержится определение нанотехнологии (вероятно, данное в Концепции определение считается окончательным). Содержание доклада поражает обилием научно-организационных и важных государственных мер по решению задач нанотехнологий, имеющих самый общий характер. Большинство этих задач перекочевало из других программ с добавлением приставки "нано" к любому смысловому термину. Это указывает на конъюнктурный характер участников доклада и их непрофессионализм.

Позже, в 2006 году, появилась "Программа развития работ в области нанотехнологий и наноматериалов до 2015 года" и "Программа координации работ в области нанотехнологий и наноматериалов в РФ". Эти многостраничные бюрократические программы страдают родовым дефектом – нет определения наносостояния, нет определения сверхзадач, нет конкретных целей, которые должны быть достигнуты, нет

лиц, за это ответственных, т.е. всего того, что было сформулировано и сделано в США пять – шесть лет тому назад.

Все это – следствие узковедомственного, группового подхода, бюрократического и субъективного решения важнейшей научно-технической проблемы.


Нельзя сказать, что в России нет специалистов в этой области, занятых (неконъюнктурно) в проблеме много лет и имеющих огромный авторитет за рубежом, пытающихся решить многие организационные проблемы. (Большинство из этих специалистов не привлекалось к составлению руководящих документов по нанотехнологии). Так, например, при Комитете Совета Федерации Федерального собрания РФ три года назад создан Координационный совет по развитию нанотехнологий, куда были приглашены все ведущие специалисты страны в этой области. Не все, однако, это приглашение приняли – руководящие работники Минобрнауки РФ и федерального агентства в заседаниях совета не участвовали. Главное, что удалось сделать Координационному совету – это провести широкое обсуждение проблемы нанотехнологий. В мае 2006 года было проведено Всероссийское совещание ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий. Издана "Белая книга в области нанотехнологий", где содержалась концепция развития работ по нанотехнологиям, представленная ведущими учеными страны, в том числе академиками Алферовым Ж.И., Платэ Н.А., Шевченко В.Я., Нефедовым В.И., Кузнецовым Н.Т., Данилевичем Я.Б. и многими другими. В книге содержатся также оригинальные результаты в области нанотехнологий, полученные учеными со всей России. Книга была направлена во все органы исполнительной власти РФ, Правительству РФ и Президенту РФ.

Следующим шагом, на наш взгляд, должна быть попытка сформулировать доктрину РФ в области нанотехнологий, понимая под этим словом систему взглядов и руководящих принципов развития.

Задачи фундаментальных исследований

Существует ли наномир? Это значит, что наноразмерные объекты имеют такие физические свойства и такие особенности строения, которые выделяют их как независимую часть Природы, промежуточную между микро- и макромиром. Эта проблема носит междисциплинарный характер и в одинаковой степени важна для физики, химии и биологии. Более того, строение наночастиц любого происхождения объясняется принципами обобщенной кристаллографии, в основе которой лежат алгебраическая геометрия (неэвклидова) и принцип локально-минимальных многообразий.

Современные экспериментальные методы исследования вещества позволили обнаружить и изучить многообразие структурных типов, реализуемых в наномире. Особый интерес представляют структурно-неоднородные наночастицы с



когерентными границами раздела между структурными фрагментами различной симметрии – кентавры, квазикристаллы, фантазмагорические фуллероиды и т.п. Для этих частиц характерен принцип сплошного заполнения пространства – обычного трехмерного или двухмерного в случае фуллероидов. Структурные состояния не всегда соответствуют незыблемым в макромире законам классической кристаллографии, базирующимся на трансляционной инвариантности. Для их описания требуется привлечение понятий обобщенной симметрии и введение разрывов симметрии между областями локальной симметрии.

Интересно отметить, что для всех названных случаев характерно плотное заполнение пространства стереоэдрами (покрытие поверхности планигонами) нескольких различающихся между собой типов (как минимум, двух). Поверхность фуллероида может быть деформированной и состоять из чередующихся участков положительной и отрицательной кривизны. Положительная и отрицательная локальная кривизна в трехмерном пространстве возникает за счет введения дислокаций, дисклинаций и диспанаций.

Наночастицы демонстрируют самые разнообразные структурные элементы – одномерные, двумерные, трехмерные, фрактальные и всевозможные их комбинации. Что же определяет такое многообразие структур в наномире? Ответ на этот вопрос кроется в квантовом характере наносостояния и особых статистических законах, доминирующих в наномире. Базовыми принципами являются принцип суперпозиции, как атрибут квантового микромира, и декогеренция волновой функции, как атрибут классического макромира.

Самоорганизация наносистем

Наносистемы далеки от равновесия из-за наличия развитой поверхности. Многими исследователями подразумевается, что система должна стремиться к "некоторому минимуму", причем этот "минимум" соответствует пространственной и временной однородности. Считается само собой разумеющимся, что в малых системах ничто не мешает быстрому протеканию процессов гомогенизации. Самим фактом своего существования наночастицы доказывают, что минимум соответствующего термодинамического потенциала не достигается. Стремятся ли малые системы к гомогенизации? В классических нелинейных неравновесных системах взаимодействия на надмолекулярном уровне могут приводить к возникновению пространственных, временных и пространственно-временных диссипативных структур. Важную роль при этом приобретают когерентность и согласованность протекающих процессов и возникающих структур как следствие кооперативного характера взаимодействий.

Случайная самоорганизация некоторой наноструктуры предопределяет дальнейший путь развития системы. В этом смысле наносистемы не подчиняются условиям эргодичес-

кой теоремы. Система в своем развитии может проходить через ряд последовательных бифуркаций. Информационное взаимодействие может кардинально изменить ход эволюции и способствовать самоорганизации системы. После самофиксации структуры в одном из нанофрагментов изменятся переходные вероятности для процессов самоорганизации соседних нанофрагментов. Это означает кооперативный характер явлений и процессов, протекающих в наномире. Мы будем иметь дело не с априорными вероятностями, а с условными вероятностями на каждом этапе разветвленного дерева эволюции, которые по-своему определяют дальнейшее развитие системы.

С точки зрения синергетики возможная эволюция неравновесной системы определяется фазовым портретом в некотором обобщенном координатном пространстве. Развитие системы во времени из произвольного начального состояния характеризуется соответствующей траекторией изображающей точки. На фазовом портрете сложных нелинейных систем помимо предельных точек (являющихся образами стационарных состояний) могут быть предельные циклы и странные аттракторы. В последних двух случаях "вообще не существует термодинамический потенциал, достигающий максимума в стационарном состоянии". Череда последовательных бифуркаций предельных циклов рождает хаос. Из хаоса рождается новая иерархия структур. При этом в классических диссипативных системах могут происходить переходы с нарушением симметрии, обусловленные протеканием автокаталитических химических реакций. Вдали от термодинамического равновесия конкуренция между диффузией, стремящейся поддерживать однородность состава системы, и пространственной локализацией, возникающей благодаря росту локальных концентрационных возмущений в автокаталитических процессах, приводит к неустойчивости однородного состояния системы и переходу ее в устойчивое состояние с пространственно-неоднородным распределением вещества.

Ансамбль наночастиц является сильно неравновесной нелинейной многовариантной системой. Нет оснований утверждать, что в своей эволюции он должен стремиться к гомогенизации, а не к зарождению нового иерархического порядка по принципу самоорганизации. Из этого следует, что структурная неоднородность есть фундаментальное свойство наносостояния. Одновременное возникновение структурной неоднородности в совокупности с когерентностью не случайно. В качестве гипотезы можно обратить внимание на формальные аналогии между наночастицами – кентаврами и диссипативными структурами, однако физические причины, вызывающие структурную неоднородность, иные, и, как следствие, имеет место другой масштаб структурирования. Причиной их возникновения, вероятно, является квантовый характер наномира.

Структурное многообразие наномира

Изолированные нанокластеры, наноструктуры и матричные наносистемы обладают уникальными свойствами как по сравнению с отдельными молекулами, так и по сравнению с массивным твердым телом. Общий подход, применимый для объяснения всего многообразия структур, реализуемых в наномире, на сегодняшний день отсутствует. Многообразие структур следует рассматривать с точки зрения обобщенной симметрии, учитывая метаморфозы структур и эффекты когерентности при агломерации фрагментов в иерархические структуры. Яркий пример метаморфоз являются собой графические работы М.К. Эшера.

Обратим внимание на то, что неорганические наночастицы по своей структуре часто корреспондируют с известными ранее характерными чертами биологических объектов. В диапазоне наноразмеров весьма вероятно конвергенция между живой и неживой природой, т.е. совместимость органических и неорганических веществ, так как для наночастиц снимаются многие запреты и ограничения классической симметрии на совместимость элементов. В неорганическом наномире реализуется пентагональная и икосаэдрическая симметрия, допустимы поворотные и винтовые оси 5-го, 7-го и более высоких порядков, возможна геликоидальная симметрия.

По всей вероятности, реализуются не только все три типа геометрии постоянной кривизны – Евклида, Лобачевского и Римана (здесь уместно вспомнить гипотезу Вернадского), но и определенные конструкции проективной геометрии. Наномир демонстрирует многообразие структур и, как следствие, многообразие форм наночастиц.

Фрагментарность наносистем

В рамках классической кристаллохимии все структурные типы можно разделить на 5 категорий: координационные, островные, цепочечные, слоистые, каркасные. Характерные группы структурных типов определяются в соответствии с основным мотивом структуры. В наноструктурах мотивов может быть несколько. Это справедливо как по отношению к мотивам отдельных соседних фрагментов, так и по отношению к объединяющему мотиву, в соответствии с которым фрагменты образуют структуру следующего уровня иерархии. Анализируя структуру наночастиц (осуществляя целенаправленный синтез структуры гипотетической наносистемы с целью придания ей требуемой функциональности), следует выделить основные структурные фрагменты и на каждом уровне иерархии в пределах каждого фрагмента определить основные структурные мотивы. Фрагменты в наноструктурах могут иметь характерные черты точечных, линейных, поверхностных, объемных, фрактальных объектов.

На аналогичных принципах строится хорошо зарекомендовавшая себя в минералогии концепция фрагментарности. Согласно этой концепции, некоторые кристаллические структуры природных минералов могут рассматриваться в качестве

сложных, построенных из модулей (фрагментов) или структурных блоков, как бы заимствованных из других кристаллов или кристаллических решеток. Если требуется более одного вида блоков для построения трехмерной структуры в целом, то этот случай называется полисоматизмом. Являясь обобщением более частных понятий политипизма, полисоматизма, гибридности, турбостратификации (одномерной разупорядоченности в слоистых структурах), концепция фрагментарности "указывает направление, где минерологи могли бы искать новые минеральные структуры и составы".

Фрагменты могут быть подвергнуты как однородной, так и неоднородной деформации в поле действия различного рода дефектов (дислокаций, дисклинаций, диспланаций, дилатаций), как если бы они находились в пространстве с искривленной метрикой, и лишь затем объединены в наноструктуру. Известные фрагменты макроскопических структур, оказываясь в новом, необычном для себя окружении, претерпевают трансформации, подобные конформационным изменениям органических молекул и полимеров.

При изучении структурно-неоднородных наночастиц можно обнаружить общие черты с такими явлениями, как послойный и блочный полиморфизм, изоморфизм с заполнением пространства, автоизоморфизм (внутренний твердый раствор), двойникование, полисинтакситическое срастание, эпитаксиальное соответствие, псевдоморфное сопряжение, модуляция подрешеток, сверхструктурное упорядочение (в том числе упорядочение вакансий в дефицитных структурах), образование несоизмерных (мисфит) структур и т.д. Из-за небольшого количества атомов в наночастице нельзя говорить, что атомы в ней образуют ту или иную кристаллическую структуру. Можно только утверждать, что имеются искаженные фрагменты известных структур. Следовательно, можно непосредственно использовать концепцию фрагментарности.

Вообще говоря, если для некоторого вещества в массивном состоянии характерно цепочечное или каркасное строение, то для него следует ожидать многообразия структур при переходе в масштаб наноразмеров. Сетки, образованные координационными полиэдрами, могут легко деформироваться, образуя цилиндрические, конусные и сферические поверхности.

Наглядной иллюстрацией принципа "сшивки" мотивов после деформации являются гравюры М.К. Эшера "Всадники". С точки зрения кристаллографии недеформированный мотив представляет собой регулярное разбиение плоской поверхности на планионы, т.е. фундаментальные области самого общего типа, содержащие все неэквивалентные точки и заполняющие при трансляции все пространство без промежутков. После сворачивания регулярной (трансляционно-инвариантной) плоской поверхности в цилиндрическую (или в лист Мебиуса) орнамент может замыкаться без нарушения мотива. С точки зрения современной геометрии принцип "склейки"

подразумевает построение соответствующего расслоенного пространства со склейкой по диффеоморфизму границ.

В наном мире встречаются фрактальные структуры. К ним относятся фрактальные кластеры, высокодисперсные дендритные частицы (дендромеры), рыхлые частицы, получающиеся при агрегации коллоидов или гелеобразовании, сферилитные частицы и т.п. Предфракталами являются мартенситные структуры и дисперсно заполненные композиты. Дробная метрическая размерность таких объектов не только характеризует их геометрический образ, но и отражает процессы их образования и эволюции, а также определяет динамические свойства. Фрактальная природа объекта может быть выявлена с помощью дифракционных методов.

В структурах трехмерных фрагментов всегда достаточно четко проявляется тенденция к минимальным объемам. Это лучше всего достигается той или иной разновидностью регулярной плотной упаковки. Когда кристаллы или квазикристаллы имеют весьма малые размеры, то могут возникнуть различные варианты псевдоплотной упаковки. Таким образом, часто появляется икосаэдрическая форма упаковки с пентагональной симметрией. Возможны также аморфные структуры, близкие к псевдоплотной упаковке. При уменьшении размеров частицы вещества аморфная структура может стать более выгодной по сравнению с кристаллической. Причиной многообразия структурных вариантов является противоречие между локальной симметрией и предпочтительным ближним порядком, с одной стороны, и трансляционной симметрией макроскопического кристалла, накладывающей жесткие ограничения на поворотные элементы, с другой.

Кластеры неорганических веществ могут быть стабилизированы и иммобилизованы в полимерной матрице и в полостях каркасных структур (цеолитов). При этом кластеры могут иметь в своей основе структуры как характерные, так и нехарактерные для массивного состояния. Часть атомов кластера может образовывать с атомами матрицы прочные химические связи. Если кластеры удерживаются внутри полостей слабыми силами нековалентной природы, то они обладают высокой подвижностью внутри матрицы.

Если атомы внутри фрагмента располагаются в соответствии с кристаллографической группой симметрии, то они представляют собой простые формы или их комбинацию. Число граней на простых формах определяется в соответствии с кристаллографическим рядом чисел. Можно привести множество примеров, когда наночастицы обладают более или менее правильной огранкой. Например, наночастицы золота, иммобилизованные в стеклянной матрице, характеризуются кубооктаэдрической морфологией. Иммобилизация наночастиц (квантовых точек) позволит получить материал с требуемыми оптическими свойствами благодаря использованию эффектов размерного квантования. Как это не парадоксально, опалесцирующие красные и рубиново-красные стекла

Древнего Египта, древнего Рима (кубок Ликурга) и витражей средневековья (мастера Клауса Кункеля) следует считать исторически первыми наноматериалами.

В связи с открывающимися перспективами создания новых функциональных мезопористых сетчатых материалов (молекулярных сит) обратим внимание на полые наночастицы. Примером таких частиц являются аллофаны – недавно открытый новый структурный тип алюмосиликатов, неорганические суперфуллерены и кеплераты на основе оксомолибдатных комплексов. Для них характерно формирование полых наносфер из соответствующих координационных многогранников. Внутри полости могут быть введены один или несколько чужеродных атомов с образованием эндоэдральных комплексов. Примером подобных комплексов являются эндоэдральные фуллерены. Мицеллы и везикулы, образующиеся в растворах поверхностно-активных веществ, могут рассматриваться как нанореакторы. Проведение химических реакций в полостях нанореакторов позволяет получать гигантские кластеры, инкапсулированные в оболочку поверхностно-активных веществ, металлические наночастицы в мицеллах амфифильных блок-сополимеров и т.п. Особый интерес представляют результаты исследований, свидетельствующих о возможностях искажения формы пор в каркасных материалах и изменения в порядке чередования. Это позволяет рассматривать пустоты в структурах цеолитов как типовые фрагменты, формально пользуясь общим принципом фрагментарности.

Нерегулярные разбиения пространства

Регулярные разбиения пространства обладают трансляционной симметрией и соответствуют идеальной кристаллической решетке. Мысленное разделение наноструктуры на фрагменты и структурный анализ отдельных фрагментов соответствует нерегулярным разбиениям. Обратим особое внимание на потенциальную возможность фрактальных разбиений.

Определяя тип кристалла, Е. Федоров всегда пользовался понятием параллелоэдра, которое лишь до известной степени аналогично понятию решетки. Если начать мысленно раздувать узлы решетки, то, все время увеличиваясь в объеме, они в какой-то момент столкнутся. Между ними появится плоская грань, грани же в дальнейшем пересекутся в вершинах. В результате вместо безразмерного узла решетки получим многогранник, тесно прилегающий к аналогичным соседям – это и будет параллелоэдр. Параллелоэдры Е. Федорова – это выпуклые многогранники, целиком заполняющие пространство в параллельном положении.

Нерегулярным разбиениям соответствует заполнение пространства правильными или полуправильными архимедовыми телами одного типа или в комбинациях, но без принятого Е. Федоровым ограничения по ориентации. В разбиениях Андреини (без ограничения по ориентации), так же как и в разбиениях Федорова, не встречаются правильные или полуправильные многогранники с осями симметрии 5-го порядка.

Невозможно заполнить пространство правильными додекаэдрами или икосаэдрами или полуправильными (архимедовыми) телами, полученными из них (или комбинациями этих полиэдров). Однако существует бесконечное число способов заполнения пространства совокупностью менее правильных полиэдров одного или нескольких сортов.

Многообразие структурных мотивов наномира не может служить препятствием для проявления свойств симметрии (обобщенной симметрии). Мы полагаем, что описание структурной неоднородности наночастиц сводится к задаче заполнения пространства различными правильными (платоновыми), полуправильными (архимедовыми) телами и другими выпуклыми или невыпуклыми многогранниками, определяемыми конструкциями обобщенной кристаллографии, а также объектами фрактальной природы без ограничений на их число, форму и взаимную ориентацию. Следует также учитывать возможное отличие геометрии нанопространства от евклидовой.

Речь идет о наночастицах, строение которых принципиально не сводится к малым и искаженным фрагментам идеальных кристаллов, а также к случаям двойникования или полисинтаксии отдельных кристаллитов. Сталкиваясь с непривычными для классической кристаллохимии типами упорядочения, многие авторы выражают свое удивление перед ними такими словами как "магические", "беспрецедентные", "уникальные", "загадочные", "экзотические", "фантазмагорические" и т.п. Перечислим некоторые из фактов, ждущих своего объяснения: экзотические плотные упаковки в малых кластерах из коллоидных микросфер, новые семейства магических кластеров и плотноупакованные кластеры с беспрецедентной оболочечной геометрией, магические спирали, экзотические некристаллические спиральные структуры и загадочные нанонити, фантазмагорические фуллероиды и фуллереноиды, луковичные структуры, онионы, наночастицы в форме колес, упаковки неизометрических субъединиц в иерархические структуры. Обратим особое внимание на открытые нами структурно-неоднородные наночастицы с когерентными границами раздела и особыми, характерными только для наносостояния, типами упорядочения – кентавры. Границы раздела между различными (кристаллическими и некристаллическими) структурными фрагментами в таких частицах не обязательно являются плоскими, а ориентационные соотношения не выражаются рациональными отношениями индексов Миллера.

Структурная кристаллография, приступая к исследованиям новых малых нанообъектов как в биологическом, так и в неорганическом и органическом мирах при использовании принципов геометрического дизайна должна базироваться на более общих конструкциях алгебраической геометрии, чем традиционно используемые дискретные группы движений пространства E^3 . Структурные реализации таких конструкций определяют строение наночастиц в рамках локального подхода, включающего в себя парадигму "строительных блоков",

описание с использованием неевклидовой геометрии (приближение искривленного пространства) и локально-минимальных многообразий, а также возможность когерентного соединения частиц, характеризующихся различными (несовместимыми в кристаллах) элементами симметрии.

Сказанное выше означает структурную общность нанообъектов окружающего нас мира – неорганического, органического и биологического. Изучение этой общности и взаимной конвергенции нанообъектов и есть, на наш взгляд, главная задача науки о наномире.

При формулировке фундаментальной части доктрины использовались идеи и концепции, которые предложили И. Кеплер, (1611 г.), Д. Гильберт (1900 г.), А. Маккей (1962 г.), С. Андерсон (1966 г.), Б. Фуллер (1975 г.), О. Клейн (1927 г.), Е. Вигнер (1964 г.), Б. Мандельброт (1977 г.), И. Пригожин (1980 г.), Дж. Бернал (1968 г.), Л. Бендерский (1989 г.), Г. Глейтер (2001 г.), А. Мюллер (2001 г.), В. Шевченко (2000 г.), Н. Платэ (2002 г.), Ю. Третьяков (2003 г.), А. Бучаченко (2003 г.), Н. Бульенков (2005 г.) и другие.

Предлагаемая доктрина направлена также на определение основных приоритетов развития индустрии наноматериалов и нанокompозитов в России и на социально-экономические последствия внедрения индустрии наноматериалов в повседневную жизнь общества.

В наиболее индустриально развитых странах работы в области наноматериалов и нанотехнологий ведутся широким фронтом при активной поддержке государства. В Национальной инициативе (НИИ) США в области нанотехнологий рассматриваются стратегические интересы страны с целью лидерства в этой области на мировом рынке. Главная цель Национальной наноинициативы США – доминирование в области передовых технологий и рынка в течение продолжительного времени. Разработки в сфере нанотехнологии привели к значительному увеличению количества научных публикаций, патентов, организации новых рабочих мест, становлению новых видов бизнеса. НИИ стала моделью подобных программ для всего мира. В седьмой рамочной программе ЕС основная идея развития работ в области наноиндустрии – обеспечение качества жизни во всех аспектах. Национальные программы некоторых стран, ведущих самостоятельные работы, например, Великобритании, направлены как на решение общих вопросов, так и на конкретные направления мирового рынка.

Как следует из материалов Всероссийского опроса ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий (Белая книга "Исследования в области наночастиц, наноструктур и нанокompозитов в Российской Федерации", Москва, 2006 г.), научный уровень отечественных разработок в сфере нанотехнологий вполне соответствует мировому, а порой и превосходит его. Россия располагает колоссальным кадровым потенциалом для развития нанотехнологий. Однако этот потенциал ни в коей мере не востребован государством,

не ориентирован на решение практических задач. Россия до настоящего времени не имеет программы развития нанотехнологий федерального масштаба. Исследования в этом направлении проводятся в рамках академических институтов, частично вузов, входят отдельными разделами в отраслевые программы, но, как правило, редко завершаются практическим внедрением результатов.

Растворение проблематики нанотехнологий в отдельных разделах федеральных и отраслевых программ не позволяет даже оценить, сколько средств выделяется государством на их развитие. По существующим оптимистическим оценкам – это несколько десятков миллионов долларов США. Отсутствие

Федеральной программы, четкой целевой установки на промышленное внедрение разработок, неготовность отраслей к восприятию достижений нанотехнологий, убогость финансирования – все это является следствием ограниченности государственной политики на этом стратегически важном направлении.

Считаем целесообразным в качестве примера перспективных разработок и областей инноваций привести среднесрочные программы США, Великобритании и Европейского союза, которые вместе с российской Белой книгой определяют основные направления работ.

ПРОГРАММЫ

перспективных разработок в области инноваций

в Великобритании, Евросоюзе и США

на среднесрочную перспективу (до 2012 года)

США

Материалы и промышленное производство

- разработка наноструктурированных металлов, керамик и полимеров строго определенных форм без механической обработки,
- улучшение печати вследствие применения наночастиц, обеспечивающих наилучшие свойства как красителей, так и пигментов,
- карбиды с вязкими и гальваническими покрытиями и покрытия для режущих инструментов, электронные, химические и структурные приложения,
- новые стандарты измерения в наномасштабе,
- наноконструирование микросхем с высоким уровнем интегральности и функциональности.

Наноэлектроника и компьютерная технология

- наноструктурированные микропроцессоры, что продолжает тенденцию к понижению энергозатрат и стоимости в пересчете на вход и улучшает эффективность компьютеров в миллионы раз,
- коммуникационное оборудование с более высокой передающей частотой и более полной утилизацией оптического спектра для обеспечения, по крайней мере, десятикратного увеличения полосы пропускания с последующим использованием в бизнесе, образовании, индустрии развлечений и обороне,
- легкие запоминающие устройства с емкостями порядка мультитерабитных, в тысячи раз лучше современных,
- интегральные наносенсорные устройства минимального размера, веса, энергопотребления, способные собирать, обрабатывать и передавать огромное количество данных.

Медицина и здоровье

- быстрое, более эффективное проектирование генома, что вызовет революцию в диагностике и терапии, эффективное и менее дорогое здравоохранение при использовании дистанционных и вживляемых устройств,
- новые составы и маршруты доставки лекарств, что значительно расширит их терапевтический потенциал, программируя доставку новых типов лекарств к ранее недостижимым участкам организма,
- повышение надежности стойких к отторжению искусственных тканей и органов,
- создание устройств для улучшения зрения и слуха,
- сенсорные системы, обнаруживающие возникновение заболевания в организме, что в конечном итоге, сместит акценты здравоохранения от лечения к раннему обнаружению и профилактике.

Аэрокосмонавтика и исследование космического пространства

- маломощные, радиационно защищенные, высокопроизводительные компьютеры,
- наноборудование для микроспутников,

- авиационная электроника, появившаяся благодаря наноструктурированным сенсорам и наноэлектронике,
- теплозащитные и износостойкие наноструктурные покрытия.

Окружающая среда и энергетика

- открытие упорядоченных мезопористых материалов MCM41, вырабатываемых нефтяной промышленностью, с размерами пор в интервале 10-100 нм, широко используемых для удаления ультратонких загрязнений,
- развитие упрочненных полимерных наноматериалов, которые могут заместить металлические компоненты в автомобильной промышленности, широкое использование таких нанокмполитов может привести к уменьшению потребления бензина на 1,5 млрд. литров за срок всего годового выпуска автомобилей и уменьшить соответствующее выделение углекислого газа более чем на 5 млрд. кг ежегодно,
- замена сажи в шинах наночастицами неорганических глины и полимеров является новой технологией, что приводит к производству экологически чистых, износостойких шин.

Биотехнология и сельское хозяйство

- сконструированные на молекулярном уровне биоразрушаемые химикаты для питания растений и защиты от насекомых, улучшение генофонда животных и растений, снабжение генами и лекарствами животных и растений,
- технология "поток через конденсатор" создана для опреснения морской воды с 10-кратной экономией энергии, этот процесс реализуется при изготовлении электродов с сильно развитой поверхностью, электроды токопроводящие за счет ориентированных углеродных нанотрубок,
- наиболее перспективным считается создание основанных на наномассах тестовых технологий для тестирования ДНК, такие технологии позволят растениеводам узнать, какие гены активизируются в растениях при засолении или засухе, применение нанотехнологий в сельском хозяйстве только начинает становиться существенным.

Государственная безопасность

- более изощренные системы виртуальной реальности, основанные на наноструктурной электронике, обеспечивающие более доступные и эффективные тренировки,
- возрастающее использование улучшенной автоматики и робототехники для компенсации сокращения личного состава армии, уменьшения риска в войсках и улучшения эксплуатационных качеств транспорта. Так, например, несколько тысяч фунтов может быть сброшено с беспилотного бомбардировщика, при этом полетная дальность и маневренность бомбардировщика могут быть значительно увеличены без необходимости учитывать ограничения пилота на ускорение, в результате повышается эффективность боевых действий,

- достижение более высоких эксплуатационных качеств (меньший вес, более высокая прочность), требуемых для оружейных платформ, с одновременным уменьшением аварийности и снижением стоимости обслуживания,
- крайне необходимые улучшения в химических, биологических, радиационных датчиках и в уходе за ранеными,
- конструктивное улучшение систем, используемых для управления и контроля за нераспространением ядерного оружия,
- комбинированные нано- и микромеханические приборы контроля систем ядерной защиты,
- более легкое и безопасное оборудование для транспортных систем, измерение, контроль и нейтрализация загрязнителей,
- развитие судебных исследований, высококачественные печать и гравировка защищенных от подделки документов и валюты.

ЕВРОПЕЙСКИЙ СОЮЗ

Информационные обмены

- системы хранения и передачи больших объемов информации,
- электронная (гибкая) бумага и газета.

Охрана здоровья

- самоочищающиеся покрытия,
- теплозащитные покрытия,
- новые лекарственные препараты,
- материалы для новой техники,
- антивандальные материалы.

Транспорт, наука о материалах, безопасность жизни нанотехнологии (фундаментальные аспекты)

- понимание взаимосвязи структуры и свойств,
- теория и моделирование структур,
- перспективные методы диагностики и анализа,
- контролируемый синтез и производство.

Энергетика

- материалы для водородной энергетики и топливных элементов.

Охрана окружающей среды

- нанопористые (керамические и полимерные) материалы.

Питание, сельское хозяйство и биотехнологии

- разработка новых химических технологий и реакций,
- промышленная биотехнология.

ВЕЛИКОБРИТАНИЯ

Социально-экономические проблемы Нанотехнологии и смарт материалы

- пьезоэлектрики,
- материалы, обладающие электострикцией и магнитострикцией,
- сплавы с эффектом памяти формы,
- смарт гели.

Нанотехнологии для новой технологии окружающей среды

- снижение вредных выбросов в окружающую атмосферу,
- улучшение состояния окружающей среды и мониторинг,
- фильтрация и очистка воды,
- конверсия энергии и ее хранение,
- альтернативные источники энергии,
- токсикология.

Применяемые материалы – катализаторы, нанопористые мембраны, сенсоры для контроля и анализа, материалы биозащиты, материалы для фотокаталитической дезинфекция воды, топливные элементы, солнечные батареи.

Нанотехнологии для смарт и чувствительных тканей

- углеродные нанотрубки для тканей, применяющихся в электронике,
- полимеры с эффектом памяти формы для "интеллектуальных" тканей,
- нановолокна для космических, автомобильных, биомедицинских устройств, для текстиля, керамики, полимеров и улучшенных композитов,
- биоактивные материалы для заживления ран.

Нанотехнологии для защиты дома и собственной безопасности

- не пригорающие пленки,
- покрытия для гигиенических поверхностей,
- наночастицы для антибактериального применения,
- наноэмульсии и герметизация,
- биофункциональные наногибриды для контролируемого выпуска витаминов.

Нанотехнологии для продуктов и напитков

- наночастицы для контролируемой экстракции и выпуска,
- наночастицы для продуктов,
- патогенные возбудители в продуктах и напитках,
- воздухопроницаемые пленки для упаковки продуктов,
- углеродные нанотрубки для новых типов упаковок с улучшенными функциональными свойствами,
- нанодиспергированные силикаты в упаковке для продуктов.

Нанотехнологии следующего поколения потребителей

- материалы для защиты дома, включающие антисептические и противогрибковые поверхности,
- моющие средства,
- самоочищающиеся средства,
- антибактериальные и ароматические средства,
- средства по уходу за ребенком,
- средства для личной гигиены.

Нанотехнологии для автомобильной промышленности и транспорта

- технологии, направленные на замещение хрома,
- прочные и легкие компоненты,
- стойкие к истиранию покрытия,
- нанокompозиты,
- нанокатализаторы для снижения нежелательных выбросов из двигателей внутреннего сгорания,
- катализаторы для топливных ячеек,
- новые охлаждающие жидкости и феррожидкости,
- хранение водорода для топливных ячеек,
- фильтры для контроля состояния воздуха,
- электрохромные стекла,
- краски.

Нанотехнологии тканей для одежды и технического использования

- ароматические ткани,
- фотокаталитические тканевые покрытия,
- смарт-текстиль,
- полимеры с эффектом памяти формы для "интеллектуальных" тканей,
- углеродные нанотрубки для тканей, применяющихся в электронике,
- магнитные нановолокна для защиты от подделок одежды,
- биоактивные покрытия для заживления ран.

Нанотехнологии для антибактериальных и самоочищающихся покрытий

- предотвращение образования биопленок в медицинской аппаратуре,
- антибактериальные поверхности для использования продуктов и напитков,
- антибактериальная герметизация,
- фотокаталитические покрытия для уничтожения бактерий,
- гидрофильные и супергидрофобные покрытия.

Нанотехнологии для упаковки и безопасности продуктов

- магнитные нанокompозитные материалы для сенсоров,
- полимерные нанокompозиты для улучшенных барьерных свойств,
- волоконные покрытия с полимерными нанокompозитами.

Нанотехнологии для нефтяной и энергетической промышленности

- наножидкости для улучшения передачи тепла,
- контроль за потерями (энергии),
- селективная адсорбция газа/конверсия/разделение,
- нанореакторные клетки для исключительных реакций,
- селективное разделение с использованием управляемых мембран.

Нанотехнологии для композитов, поверхностных покрытий и сенсоров

- контейнеры из нанокompозитов для долговременного хранения химических веществ,
- самозаживающие нанокompозиты,
- материалы, стойкие к усталости,
- смарт поверхности/покрытия,
- химически/электрически настроенные композиты, содержащие углеродные нанотрубки, как эффективные материалы для самоочистки и молекулярные сенсоры,
- износостойкие и коррозионно-стойкие покрытия,
- биосенсоры,
- композиты на основе углеродных нанотрубок и волокон,
- сенсорные сетки с нанотрубками.