

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕРТИЗА. МОНИТОРИНГ. АУДИТ

DOI: 10.36535/0869-1010-2021-05-4

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МОНИТОРИНГЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ОБЗОР

д.ф.-м.н. В.Ф. Крапивин¹, д.ф.-м.н. Ф.А. Мкртчян¹, к.т.н. И.И. Потанов²,
канд. физ.мат. наук Солдатов В.Ю.¹

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино

²Всероссийский институт научной и технической информации РАН
(ipotapov37@mail.ru)

Дается краткий обзор исследований в области нанотехнологий и их применения в различных сферах человеческой деятельности. Рассмотрены имеющиеся достижения по применению нанотехнологий в электронике, медицине, лесном хозяйстве, спектроскопии, энергетике и других областях. Отмечены успехи и недостатки проведенных исследований. Обсуждены перспективы применения нанотехнологий в решении многих антропогенных проблем. Работа выполнена по государственному заданию №0030-2019-0008 «Космос».

Ключевые слова: концепция, спектроскопия, спектр, нанотехнология

NANOTECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING. REVIEW

V.F. Kravivin, F.A. Mkrtychyan, I.I. Potapov, V.Yu. Soldatov

Short review of the investigations in nanotechnologies and their applications in various human activities is given. It is considered existing achievements related with the nanotechnology applications in the electronics, medicine, forestry, spectroscopy, energetic, and other areas. Successes and imperfections of realized studies are marked. Application perspectives of nanotechnologies in the solution of numerous anthropogenic problems are discussed.

Keywords: conception, spectroscopy, spectrum, nanotechnology

ВВЕДЕНИЕ

Нанотехнология представляет собой междисциплинарную область фундаментальной и прикладной науки и техники, базирующаяся на передовых достижениях физики, химии, биологии, материаловедения, микроэлектроники и имеющая дело с теорией и практикой исследования, анализа и син-

теза объектов с характеристическими размерами от 1 нм до 100 нм, а также с методами производства и применения продуктов с заданной атомарной структурой путём контролируемого манипулирования атомами и молекулами [1-51]. При работе с такими малыми размерами проявляются квантовые эффекты и эффекты межмолекулярных взаимодействий. По существу речь идет о новой еще недостаточно исследованной области знания, затрагивающей технологии на молекулярном уровне. В частности, современная электроника, особенно оптоэлектроника и лазерные технологии идут по пути уменьшения размеров устройств, что достичь классическими методами производства становится невозможным. Однако, здесь наряду с технологическим наблюдается экономический барьер, когда незначительное уменьшение размера устройства приводит к резкому возрастанию экономических затрат. Но, тем не менее, нанотехнология является следующим логическим шагом развития электроники и других наукоемких производств.

Впервые термин «нанотехнология» употребил профессор Токийского университета науки Норико Танигути в 1974 году [46]. Он назвал этим термином производство изделий размером несколько нанометров. Свои исследования он начал с механизмов шлифования высокой точности, используя твердые и хрупкие материалы. При этом он выступил пионером применения техники энергии мощного пучка для ультра точной обработки материалов. В 1980-х годах термин «нанотехнология» использовал физик Эрик К. Дрекслер в своих книгах [28,29]. Фундаментальные принципы молекулярного дизайна, белковой инженерии и производительных наносистем он сформулировал в статье [27]. Центральное место в его исследованиях играли математические расчёты, с помощью которых можно было проанализировать работу устройства размерами в несколько нанометров.

На возможность создания материалов с размерами зерен менее 100 нм, которые должны обладать многими интересными и полезными дополнительными свойствами по сравнению с традиционными микроструктурными материалами, указал немецкий ученый Г. Глейтер в 1981 г. [32,33]. Он же и независимо от в России ввели в научную литературу представления о нанокристаллах [1,2]. Позднее Г. Глейтер ввел в научный обиход также термины нанокристаллические материалы, наноструктурные, нанофазные, нанокомпозитные и т. д.

Нанотехнология занимается изучением специфического поведения вещества на субмикронном масштабном уровне, анализом и выявлением основных эффектов в нанобъектах. В Техническом комитете Международной организации по стандартизации (International Organization for Standardization) под нанотехнологиями подразумевается следующее:

- знание и управление процессами, как правило, в масштабе 1 нм, но не исключающее масштаб менее 100 нм, в одном или более измерениях, когда ввод в действие размерного эффекта (явления) приводит к возможности новых применений;
- использование свойств объектов и материалов в нанометровом масштабе, которые отличаются от свойств свободных атомов или молекул, а также от объемных свойств вещества, состоящего из этих атомов или молекул, для создания более совершенных материалов, приборов, систем, реализующих эти свойства.

В 2004 г. «Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий на период до 2010 года» нанотехнологию определяет как совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контро-

лируемым 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 осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

Другими словами с практической точки зрения нанотехнология предполагает производство устройств и их компонентов, необходимых для создания, обработки и манипуляции атомами, молекулами и наночастицами. В этом смысле нанотехнологии качественно отличаются от традиционных дисциплин, поскольку на таких масштабах привычные, макроскопические технологии обращения с материей часто неприменимы, а микроскопические явления, пренебрежительно слабые на привычных масштабах, становятся на много значительнее. Конечно, в этой области больше белых пятен, чем решенных вопросов. Тем не менее, проводимые исследования уже дают практические результаты.

В России федеральным законом №139-ФЗ 19 июля 2007 г. учреждена Государственная корпорация «Российская корпорация нанотехнологий» (РОСНАНО) для «реализации государственной политики в сфере нанотехнологий, развития инновационной инфраструктуры в сфере нанотехнологий, реализации проектов создания перспективных нанотехнологий и наноиндустрии». РОСНАНО – масштабный государственный проект, конечной целью которого является перевод страны на инновационный путь развития и вхождение России в число лидеров мирового рынка нанотехнологий.

СИНТЕЗ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Проблема синтеза информационно-измерительных систем нового поколения, ориентированных на изучение и оценку состояния природно-техногенных структур различного масштаба вплоть до наноструктур, требует решения огромного спектра задач, входящих в компетенцию многих областей знания. Комплексный характер этой проблемы обусловлен совокупностью разнородных и разноплановых теоретических и прикладных исследований, которые ведутся во многих странах по национальным и международным программам. Основная цель всех подобных исследований состоит в попытке ответить на единственный базовый вопрос: какова должна быть структура и режим работы системы наблюдения за элементами изучаемой среды, чтобы обеспечивались надежные оценки ее текущего состояния и прогноз ее развития на ближайшее и перспективное будущее? К сожалению, ответа на этот вопрос пока нет. Развитые в работах [8,19] подходы к решению этой проблемы дают теоретическую основу новой стадии развития науки об информационно-измерительной технике. Одним из препятствий здесь является отсутствие научной базы, которая бы объединяла усилия ученых в направлении развития новых информационных технологий, которые бы давали механизмы оптимизации информационных потоков в системах мониторинга и способствовали бы поиску методов решения указанной задачи. Особенно актуальной данная задача является при создании систем наблюдения и контроля окружающей среды.

Существующие технические средства мониторинга объектов окружающей среды во многих случаях не обеспечивают необходимой точности оценок их состояния, особенно при анализе химических и биологических загрязнений водных сред с учетом их неоднородности в пространстве. В

данной работе предлагается новая технология синтеза систем мониторинга окружающей среды, обобщающая технологию географических информационных систем за счет комплексного использования методов имитационного моделирования, эволюционной технологии синтеза баз знаний, алгоритмов восстановления пространственных образов по отрывочным в пространстве и фрагментарным во времени измерениям, приемов компьютерной картографии и дистанционного зондирования. Эта технология реализует формулу ГИМС=ГИС+модель и использует возможности спектральной эллипсометрии, обеспечивая чувствительность и точность оценки содержания примесей в жидких растворах до наночастиц.

В последнее время интенсивно развивается спектральная поляризационно-оптическая аппаратура для исследований в реальном масштабе времени - многоканальные поляризационные спектрофотометры, спектрополяриметры, спектральные эллисометры и дихрометры, нефелометры, рефрактометры. Использование в современных поляризационно-оптических приборах эффективных модуляторов состояния поляризации и многоканальных анализаторов, развитие методов программирования определяют их высокие технические характеристики. Так, современные спектрофотометры обеспечивают измерение нескольких спектров в секунду с точностью и чувствительностью на уровне 1% и 0.01% соответственно, а измерения спектров вращения плоскости поляризации в реальном масштабе времени на спектрополяриметрах выполняются с высокой точностью. В то же время, коммерческие многоканальные поляризационно-оптические спектральные приборы еще не получили широкого распространения.

Предметом нанотехнологии является конструирование, производство и использование функциональных структур, по крайней мере, с одним характерным размером в диапазоне 1-100 нм. Информационно-измерительная система, обеспечивающая реализацию таких измерений, обладают высокой чувствительностью при контроле физических, химических и биологических свойств, явлений и процессов. Достижение такого уровня чувствительности достигается при использовании спектроэллисометра, разработанного в ИРЭ РАН [40,41], в решении задач генерации наночастиц с заданными размерами [43], для контроля с обратной связью процессов напыления пленочных структур [42], при определении среднего радиуса пор и их распределения по размерам в различных наноструктурах [7], а также во многих других исследованиях [26,43].

Предложенный и развиваемый в ИРЭ РАН [40,41,43] новый метод эллипсометрических измерений – эллипсометрия с дискретной модуляцией состояния поляризации, основан на попеременном облучении изучаемого объекта пучком монохроматического света с двумя состояниями поляризации. Переключатель состояния поляризации обеспечивает точность до 10^{-5} в спектральном диапазоне от 220 до 2200 нм и высокую (до единиц кГц) точность достижимую частоту модуляции пучков излучения. В соосном ахроматическом компенсаторе на основе ромба Френеля из плавленого кварца используется пара плоских параллельных зеркал, установленных под углом 12-15 градусов к падающему на них пучку, при этом повышение ахроматичности компенсатора обеспечивается противоположными знаками изменения фазового сдвига в ромбе и в зеркалах.

Применение спектроэллисометра для решения конкретной задачи сводится к предварительной подготовке обучающей выборки спектральных образов в виде эталонной базы в виде векторного пространства

$A_{\mu,I}^i = \{a_1^i, \dots, a_n^i, I, \mu\}$, $\theta_{\mu,I}^i = \{\theta_1^i, \dots, \theta_n^i\}$, где a_j^i - амплитудная характеристика, θ_j^i - фазовая характеристика, I – идентификатор исследуемого объекта, n – число используемых каналов, μ - оценка изучаемого параметра объекта. В общем случае при измерениях определяются два вектора: один Ξ_Δ – интенсивность света на фотодетекторе, другой Ξ_Ψ - тангенс относительного сдвига фаз двух ортогональных поляризованных компонент. В простейшем случае считается, что $\Xi_\Delta = \{a_1^i, \dots, a_n^i\}$, $\Xi_\Psi = \{\theta_1^i, \dots, \theta_n^i\}$.

Основная идея алгоритма идентификации состоит в том, что полученный набор векторов Ξ_Δ и Ξ_Ψ сравнивается с соответствующими векторами базы эталонов и по одному из критериев их близости с применением алгоритма интерполяции находится оценка для параметра μ или набора таких характеристик. При этом в случае, когда оценивается набор характеристик объекта, база эталонов расширяется за счет создания векторных индикаторов самих спектральных образов (табл. 1).

Таблица 1

Пример структуры эталона спектрального образа контролируемого объекта.

Номер эталона в базе данных	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	B
1	A_{11}	A_{21}	A_{31}	A_{41}	A_{51}	A_{61}	A_{71}	A_{81}	A_{91}	B_1
.....										
n	A_{1n}	A_{2n}	A_{3n}	A_{4n}	A_{5n}	A_{6n}	A_{7n}	A_{8n}	A_{9n}	B_n

Обозначения: A_1 – площадь под спектральной кривой; A_2 – максимальное значение спектральной кривой; A_3 – минимальное значение спектральной кривой; A_4 – расстояние в нанометрах между максимальным и минимальным значениями спектральной кривой; A_5 – максимальная производная спектральной кривой; A_6 – максимальная вторая производная спектральной кривой; A_7 – число максимумов на спектральной кривой; A_8 – значение спектральной кривой при $\lambda=400$ нм; A_9 – значение спектральной кривой при $\lambda=800$ нм; B - значение оцениваемой характеристики.

Идентификация полученного спектрального образа испытуемого образца осуществляется путем сопоставления его вектора $\Xi(X_1, \dots, X_n, Y)$ с набором эталонных векторов в базе данных. Идентификация образца осуществляется путем поиска в базе эталонов образов, имеющих минимальное удаление от полученных спектров. Расстояние между векторами рассчитывается по среднему значению:

$$\Delta = \min_n \rho(\Xi - \Xi_n) = \frac{1}{2n} \min_i \left[\sum_{j=1}^n |X_j - A_j^i| + \sqrt{\sum_{j=1}^n (X_j - A_j^i)^2} \right]$$

Применение этой формулы дает большую точность по сравнению с использованием только отклонения по абсолютной разнице компонент векторов или только по среднеквадратическому отклонению.

В настоящее время совместное применение технических средств и software для оперативного мониторинга водной среды развито недостаточ-

но из-за сложности синтеза комплексной системы мониторинга. Особенно сложны задачи сочетания алгоритмического обеспечения с уровнем информационного обеспечения системы мониторинга. Актуальная задача экологического мониторинга требует разработки компактных прецизионных поляризационно-оптических приборов для экспресс анализа жидких сред. При этом эффективность решения многопараметрических задач в большой мере определяют чувствительность и точность приборов, их универсальность, возможность использования широкого спектрального диапазона. Спектральные измерения в водной среде дают информативную базу для применения современных методов и алгоритмов распознавания и идентификации загрязнителей этой среды.

В институте радиотехники и электроники Российской академии наук (ИРЭ РАН) впервые созданы устройства, основанные на принципах многоканальной регистрации спектров ослабленного, отраженного или рассеянного света. Совместное использование оперативных измерений спектрометрии и методов обработки данных впервые реализовано в адаптивном идентификаторе, принципиальная схема которого представлена на рис.1, а различные его модификации указаны на рис. 2 и 3.

Адаптивный идентификатор был испытан в экспедиционных условиях на НИС «Дмитрий Менделеев» в Японском море и Центральных районах Тихого океана, а также при обследовании водных систем Южного Вьетнама и Сибири (о. Байкал, реки Ангара и Енисей) в рамках программ международного сотрудничества с Вьетнамским Научным Центром естественных наук и технологий, а также с Университетами Аляски и Дилларда США. Эти эксперименты показали перспективность применения технологии спектроэллипсомеррии для оперативного контроля сточных вод, водных растворов в медицинской промышленности и изучения экосистем водоемов (пятнистость загрязнений поверхности водоемов, биомасса фитопланктона, мутность водной среды, содержание взвешенных веществ и др.).

Галогенная лампа

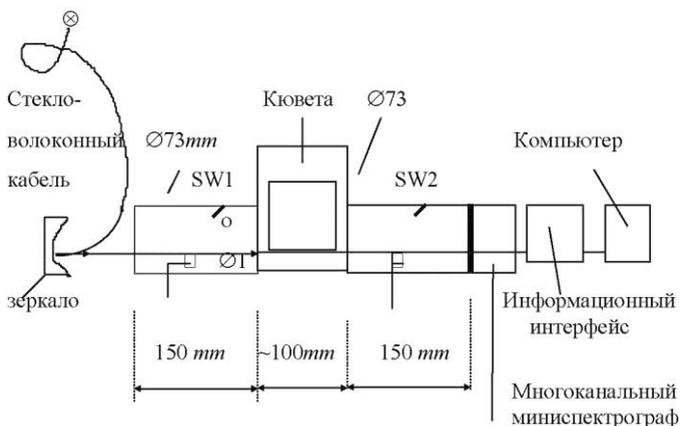


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивного идентификатора. Через SW1 и SW2 обозначены переключатели состояния поляризации [41,42].

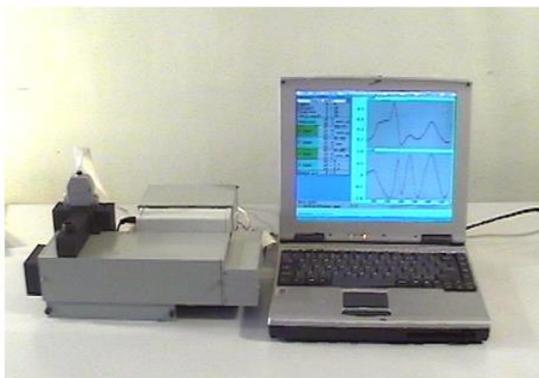


Рис. 2. Спектроэллипсометрическая система для регистрации характеристик водной среды в лабораторных условиях [40,41].

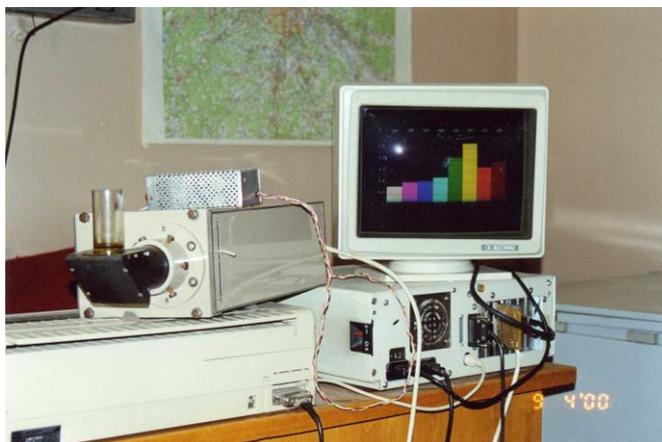


Рис. 3. Адаптивный идентификатор для изучения характеристик водной среды в лабораторных и полевых условиях в реальном масштабе времени [40,41].

Традиционно оптические методы исследования жидкостей являются одними из наиболее информативных. В частности, поляризационно-оптические спектральные измерения позволяют решить широкий круг сложных задач экологического мониторинга водных сред. Задача определения концентрации различных веществ в многокомпонентных растворах по спектрам оптического пропускания и отражения, линейного и циркулярного двулучепреломления и дихроизма и по спектрам нарушенного полного внутреннего отражения успешно решается только с помощью развитого программного обеспечения.

Одним из перспективных направлений анализа растворов является жидкостная хроматография с прецизионными поляризметрическими устройствами. Следует отметить определенные трудности при создании компактных многоканальных поляризационно-оптических приборов. Как правило,

ключевым элементом поляризационно-оптических приборов является модулятор состояния поляризации излучения. Это либо вращающийся поляризационный элемент (поляризатор, анализатор или компенсатор), ограничивающий частоту модуляции и значительно повышающий уровень помех, либо дорогостоящий фотоупругий модулятор, требующий совершенной термостабилизации. Используются в основном ПЗС линейки и матрицы фотодетекторов, имеющие недостаточно высокие фотометрические характеристики: малый динамический диапазон, недостаточная линейность, отсутствие доступа к отдельным пикселям, последовательное считывание фотоприемных элементов, приводящее к неэквивалентности измерительных промежутков на всех фотоприемниках.

Создание адаптивного идентификатора оказалось возможным благодаря развитию нового подхода в области поляризационной оптики. Разработаны эффективная элементная база поляризационной оптики, метод дискретной модуляции состояния поляризации, и на их основе созданы высокоточные поляризационно-оптические приборы различного назначения (рис.2). Применение простых высокоэффективных переключателей поляризации и линеек кремниевых фотодиодов с произвольным доступом к фотодиодам существенно упростило задачу создания компактных недорогих поляризационно-оптических приборов: спектрофотометров, спектрополяриметров, спектроэллипсометров и т.д.

Технология совместного использования спектрометрии и алгоритмов идентификации и распознавания позволило впервые создать типовой цельный комплекс аппаратных, алгоритмических, модульных и программных средств сбора и обработки данных о водной среде с функциями прогноза и принятия решений. Адаптивный идентификатор имеет ряд модификаций, ориентированных на использование в различных условиях. Стационарный вариант охватывает полный комплект технических и алгоритмических средств, обеспечивающих проведение измерений в реальном масштабе времени. Использование этого варианта возможно при наличии сетевого питания 220 в. Полевой переносной вариант адаптивного идентификатора предусматривает два режима использования. При наличии компьютера Note-book в полевых условиях (при отсутствии сетевого питания) весь функциональный спектр адаптивного идентификатора реализуется в режиме реального времени. В противном случае результаты измерений запоминаются в блоке автономной памяти, а затем вводятся в компьютер и обрабатываются.

Алгоритмическое обеспечение адаптивного идентификатора основано на комплексном использовании методов распознавания и классификации дискретных образов, формируемых на базе 512 спектров, регистрируемых за устанавливаемое оператором время. Обычно устанавливается интервал в 1 сек., который обеспечивает получение около 60 отсчетов значений освещенности по каждому из 512 оптических каналов. Полученные спектры являются источниками рядов статистических параметров и различных характеристик, объединяемых в векторные пространства для последующего сопоставления с эталонными образцами, хранящимися в памяти компьютера. Технология этого сопоставления зависит от многообразия методов идентификации.

Адаптивный идентификатор рассчитан на обучение, которое представляет собой процедуру измерения спектральных характеристик и одновременное независимое измерение содержания химических элементов в водной среде. В результате в базе знаний формируется банк эталонов, сопоставление с которыми обеспечивает решение задачи идентификации. В частно-

сти, такое сопоставление может реализовываться в рамках расчета среднего квадратического отклонения измеренного спектрального образа объекта от имеющихся в памяти компьютера эталонов. Программное обеспечение адаптивного идентификатора предусматривает различные алгоритмы решения этой задачи, среди которых имеется и кластерный анализ.

Адаптивный идентификатор может применяться в различных областях, где требуется оценить качество водного раствора или выявить присутствие в водной среде определенного набора химических элементов. Эти задачи адаптивный идентификатор решает в режиме непрерывного наблюдения за водной средой. Установленный для стационарного измерения он позволяет следить за динамикой качества воды в потоке, а при размещении на борту судна - измерять характеристики водного объекта по маршруту следования.

Функциональные возможности адаптивного идентификатора могут расширяться за счет увеличения объема эталонов в базе знаний. Переключение на естественный источник освещения позволяет решать задачи экспертизы земных покровов, обнаружения пленок нефтепродуктов на водной поверхности, определение степени загрязнения атмосферного воздуха и оценки состояния других объектов окружающей среды, спектральные образы которых в видимом диапазоне могут изменяться. Созданная за последнее время технология адаптивной идентификации элементов окружающей среды по данным спектральных измерений в видимом диапазоне позволяет перейти к синтезу экспертной системы для адаптивной идентификации параметров окружающей среды (ЭСАИПО). В структуру системы входят компактный многоканальный спектрополяриметр (КМС), информационный интерфейс с компьютером (ИИК), пакет компьютерных программ (ПКП) и расширяющаяся база данных (РБД). ПКП реализует ряд алгоритмов обработки потоков данных от КМС и обеспечивает сервисные функции визуализации и управления режимом измерений. РБД состоит из наборов эталонов спектральных образов пятен загрязнителей, изображаемых точками в многомерном векторном пространстве признаков, предварительно рассчитанных на основе обучающих выборок.

Принцип функционирования ЭСАИПО основан на фиксации изменений светового потока на выходе КМС и преобразование их в цифровой код. Дальнейшая обработка этих данных по своей эффективности определяется составом ПКП, куда включены различные алгоритмы распознавания двумерных образов. Адаптивность процедуры распознавания определяется уровнем накопления знаний об особенностях флуктуации интенсивности и поляризационных качеств отраженного света от водной поверхности. В состав ПКП входят средства, позволяющие в случае неопределенности ситуации с идентификацией пятна загрязнителя принимать экспертное решение на основе визуального анализа его спектрального образа. Эта процедура реализуется в режиме диалога с ЭСАИПО и если решение принято, то оператор может фиксировать его в базе данных в форме эталона для последующих ситуаций возникновения аналогичных пятен.

После обучения функционирование экспертной системы ограничивается только количеством измерений, фиксируемого оператором исходя из обработанной достижимости статистической достоверности и сохранения режима реального времени. Оператор имеет две возможности регулировать этот режим, устанавливая объем измерений или фиксируя время их накопления. Оператор связывается с различными блоками ЭСАИПО через человеко-машинный интерфейс ИИК, который обеспечивает селективность управления операциями всех блоков.

Таблица 2

Результаты идентификации водных растворов.

Раствор	Вектора-идентификаторы спектрального образа раствора										Погрешность идентификации (%)
	21,6	0,17	0,1	143	0,67	0,12	2	0,16	0,21		
CuSO ₄	43,1	0,89	0,04	201	0,59	0,09	3	0,65	0,01	8	
	4,6	0,14	0,07	89	0,56	0,22	1	0,1	0,06		
	328,1	0,87	0,84	65	0,92	0,15	3	0,84	0,82		
Сахар	76,4	0,09	0,01	234	0,55	0,04	1	0,02	0,03	5	
	89,7	0,13	0,03	187	0,63	0,09	1	0,01	0,01		

Таким образом, применение спектроскопической технологии и разработанных на ее основе систем для контроля водной среды дает возможность быстро, практически в реальном масштабе времени, решать широкий круг задач оперативного мониторинга водных растворов как искусственного, так и природного происхождения. При этом измерительная часть ЭСАИПО может монтироваться стационарно и пользователь будет получать непрерывный поток данных о состоянии водной среды. Это особенно важно при необходимости инспекции особо опасных химических предприятий.

Методические, алгоритмические, конструктивные и технические решения, положенные в основу создания ЭСАИПО были одобрены различными организациями. В 1992 г. Ассоциация авторов научных открытий выдала диплом № 235 "За открытие механизма формирования природных иерархических структур и создание на этой основе методики моделирования природно-антропогенных систем". Адаптивный идентификатор получил в 2001 г. на Первом международном салоне инноваций и инвестиций диплом и золотую медаль. Многоканальный спектроэллипсометр для исследования водных систем на III Выставке-ярмарке "Инновации-2000. Технологии живых систем" был удостоен Диплома "За соответствие критериям безопасности жизнедеятельности человека".

В табл. 2 приведен фрагмент результатов идентификации однокомпонентных растворов.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Нанoeлектроника — область электроники, занимающаяся разработкой физических и технологических основ создания интегральных электронных схем с характерными топологическими размерами элементов менее 100 нм. Фундаментальной задачей нанoeлектроники является создание электронных устройств и проводников молекулярных размеров. Решение этой задачи позволило бы конструировать сверхбыстрые и сверхкомпактные компьютеры, использующие принципиально новые квантовые алгоритмы. Исследования в области нанoeлектроники важны также для разработки новых принципов, а вместе с ними и нового поколения сверхминиатюрных супербыстродействующих систем обработки информации.

Основные задачи нанoeлектроники включают разработку:

- физических основ работы активных приборов с нанометровыми размерами, в первую очередь квантовых;
- физических основ технологических процессов;
- самих приборов и технологий их изготовления;
- интегральных схем с нанометровыми технологическими размерами и изделий электроники на основе нанoeлектронной элементной базы.

В России в 1989 г. в Зеленограде на базе центра Российской микроэлектроники была организована компания NT-MDT (Molecular Devices and Tools for Nanotechnologies) с целью применить накопленный опыт и знания в области нанотехнологии для обеспечения исследователей прибором, способным решать всевозможные задачи, лежащие в области нанометровых размеров. Разработка продуктов основывается на комбинации технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), новейшем программном обеспечении, использовании высококачественных микроэлектронных компонентов и прецизионной механики. Как коммерческое предприятие

компания NT-MDT существует с 1993 г. В настоящее время коллектив NT-MDT производит практически полную линию сканирующих зондовых микроскопов (СЗМов), покрывающих большинство научных и промышленных применений.

Одним из первых в России в ГОУ ВПО «Московский институт электронной техники (технический университет)» в 2005 году был открыт Центр «Нанотехнологии в электронике». Центр тесно взаимодействует с Учебно-научным центром «Зондовая микроскопия и нанотехнология», созданным при участии компании "НТ-МДТ" в 1999 г. на базе лаборатории туннельной микроскопии и нанотехнологии (www.nanotube.ru). Приоритетными научными направлениями исследований Центра являются: зондовая микроскопия, зондовая нанотехнология, поиск новых методов и материалов для создания элементов наноэлектроники. Одними из первых в России был построен сканирующий туннельный микроскоп, предназначенный для проведения технологических экспериментов. В 1989 г. было показано наличие квантования проводимости при комнатной температуре в квазиодномерных вертикальных проводниках. В 1993 году построен туннельный технологический микроскоп ТТМ-2, позволяющий получать атомное разрешение структур. Созданы уникальные элементы наноэлектроники на основе полимерных, металлических и углеродных нанопроводов. В настоящее время Центр активно работает в области исследования свойств углеродных нанотрубок и элементов наноэлектроники на их основе.

Все более востребованным становится создание элементной базы наноэлектроники и запоминающих устройств с терабитным объемом памяти путем формирования нанометровых объектов с помощью зонда сканирующего туннельного микроскопа или кантилевера атомно-силового микроскопа [15].

В Московском государственном институте электронной техники, начиная с 1985 г., получено ряд уникальных результатов, в том числе впервые наблюдалось квантование проводимости квазиодномерных микропроводников при комнатных температурах. Развернуты работы по созданию элементной базы наноэлектроники на основе зондовых методов.

Одно из перспективных направлений применения зондовых нанотехнологий это создание элементной базы углеродной электроники. Углеродные резисторы термостойки и радиационностойки. Методы планарных микроэлектронных технологий совместно с зондовыми нанотехнологиями позволяют создавать интегральные схемы, состоящие полностью из углеродных элементов.

О направлениях развития и состоянии наноэлектроники в России достаточно полно рассказано в лекции академика Г.Я. Красникова "Основные тенденции и перспективы развития микро- и наноэлектроники", прочитанной 26 июня 2008 г. на пленарной сессии Санкт-Петербургского научного форума "Наука и общество. Нанотехнологии: исследования и образование" — III Петербургская встреча лауреатов Нобелевской премии.

Среди зарубежных исследований в области применения нанотехнологий в электронике особое внимание уделяется разработкам новых принципов магнитной памяти. В связи с этим появился термин «наномagnetизм». За последние десятилетия плотность элементов в системах магнитной памяти увеличивалась гораздо более быстрыми темпами, чем в полупроводниковых устройствах. Увеличение плотности записи информации за это время сделало гигантский скачок вперед за счет новых магнитных материалов. Стоит отметить, что полученные величины существенно превосходят соответ-

ствующие плотности записи, достигаемые при использовании широко известных полупроводниковых материалов.

Сейчас уже ясно, что нет принципиальных запретов на создание "одноатомной магнитной памяти", в которой носителями информации являются магнитные моменты (спины) отдельных атомов. Поэтому огромное значение придется разработать методов определения магнитных характеристик вещества с атомным разрешением. В работе [35] специалисты из ИВМ использовали для этой цели сканирующий туннельный микроскоп (СТМ). Они измерили спектры электронных возбуждений отдельных атомов Fe и Mn, адсорбированных на поверхности нитрида меди, и, проанализировав зависимость этих спектров от величины и направления внешнего магнитного поля, нашли величины эффективных атомных магнитных моментов и энергий магнитной анизотропии E_A (количественная интерпретация данных СТМ потребовала детальных численных расчетов распределения электронной плотности на поверхности). Для атома Fe величина E_A составила 1.55 мэВ вдоль оси легкого намагничивания и 0.31 мэВ в перпендикулярной этой оси плоскости. В другой работе [37] сотрудники Гамбургского университета (Германия) использовали спин-поляризованный СТМ для регистрации процессов поворота ("переключения") магнитных моментов наночастиц, состоящих из ~ 100 атомов Fe, и показали, что время жизни различных состояний (отличающихся направлением магнитного момента) можно регулировать путем инъекции электрического тока $I \sim 1$ нА (опять же спин-поляризованного). Так, увеличение I приводит к уменьшению времени жизни из-за локального джоулева нагрева на ~ 1 К (эксперимент проводили при $T \sim 50$ К). Этот эффект можно использовать для записи информации в магнитную память (<http://issp.ras.ru>).

При разработке магнитных устройств записи решающими стали два фактора – *магнитный момент и магнитная анизотропия* (www.nanometer.ru). Под магнитным моментом понимается сумма всех магнитных моментов системы; магнитная энергия анизотропии – это выигрыш в энергии за счет ориентации спинов в определенном направлении. Для малых структур область, в которой спины строго ориентированы в одном и том же направлении, может характеризоваться макроскопическим суммарным спином, или «макроспином». Если энергия анизотропии достаточно велика, то за счет устойчивости направления "макроспина" можно добиться долговременной памяти. С другой стороны, если энергия анизотропии недостаточно велика по сравнению с тепловой энергией, то направление макроскопического спина может меняться спонтанным образом.

Среди уже достигнутых успехов в области наноэлектроники можно указать ряд разработок:

- В 1993 году японскими учеными было разработано новое семейство цифровых переключающих приборов на атомных и молекулярных шнурах. Базовая ячейка состоит из атомного шнура, переключающего атома и переключающего электрода. Общий размер такой структуры атомного реле составляет менее 10 нм, а рабочие частоты оцениваются величинами порядка 10¹² Гц.

- В 2005 г. в национальном научном институте материалов (National Institute for Materials Science, NIMS, Япония) сделано механическое реле с наноразмерами, которое заменяет в электронных устройствах полупроводниковые переключаатели.

- Американские учёные создали гибкий конденсатор на основе одностенных углеродных нанотрубок, который практически не изменяет своих характеристик при деформации [51].

- Исследователи из Rice University (США) предложили прототип устройства для хранения информации на основе диэлектрических наностержней, покрытых тонкими графеновыми слоями, а также новых массивов памяти на основе графита [45].

- Ученые из Калифорнийского технологического института (California Institute of Technology, США) и национального института нанотехнологий Канады (National Institute for Nanotechnology) разработали методику измерения массы нейтральных молекул, основанную на использовании нанорезонаторов и создали наноэлектромеханический масс-спектрометр [43].

- Ученым из Кембриджа [50] удалось скомбинировать в одной структуре жидкие кристаллы и вертикально расположенные углеродные нанотрубки таким образом, чтобы получилось трехмерное жидкокристаллическое устройство с перестраиваемой конфигурацией. Это инженерное решение открывает совершенно новые возможности для контроля свойств молекул в жидких кристаллах, позволяющего перемещать их в различных направлениях, и таким образом – создавать сложные компоненты оптических систем, такие как элементарные линзы в многопучковых системах.

В последнее время идеи и методы наноэлектроники начали интенсивно проникать в биологические науки, в результате чего начало зарождаться новое научное направление, получившее название нанобиоэлектроника (www.rob.biz/?p=4). Нанобиоэлектроника интегрирует достижения наноэлектроники и молекулярной биологии. В основе нанобиоэлектроники лежит использование процессов переноса заряда в биомакромолекулах и созданных на их основе молекулярных структурах нанометрового размера. Объединение наноэлектронных устройств со сложными биологическими структурами, такими как клетка, перебрасывает мостик между нанобиоэлектроникой и биотехнологией. Объединение биоматериалов с металлическими или полупроводниковыми частицами, фуллеренами или углеродными нанотрубками порождает новый класс материалов для создания уникальных электронных или оптических систем. Основные направления нанобиоэлектроники включают создание на основе таких гибридных систем биосенсоров, сложных наноэлектронных схем на основе ДНК, конструирование нанобиотранзисторов, диодов, наномоторов, нанотранспортеров и т.д.

Гигантская активность в этой области связана с попытками использования для наноэлектроники фуллеренов и нанотрубок. Несмотря на уникальные свойства углеродных нанотрубок, их применение в нанотехнологических целях существенно осложнено проблемами управляемого манипулирования ими, использованием в конкретной технологической цепочке, дороговизной и широким разбросом индивидуальных свойств (от диэлектриков до полупроводников и проводников).

Альтернативным кандидатом для использования в качестве молекулярных нанопроволок является молекула ДНК. Как оказалось, помимо важнейшей роли хранилища генетической информации живого организма, молекулы ДНК могут осуществлять транспорт электронов вдоль полимерной цепи и могут проявлять хорошие проводящие свойства.

Как известно, основной целью молекулярной наноэлектроники является создание молекулярного компьютера с очень высокой плотностью размещения устройств - порядка триллиона на квадратный сантиметр. Размеще-

ние с такой огромной плотностью требует сверхмалого рассеяния мощности на каждом работающем устройстве. Предполагается, что лишь сверхпроводящие устройства могут удовлетворить этим требованиям. Для конструирования молекулярных электронных устройств необходимо научиться «управлять» молекулами, позиционировать их в заданном месте подложки с необходимой ориентацией.

Целью ближайших исследований является разработка наноструктур для исследования проводимости ДНК, разработка методов модификации поверхности нанoeлектронов для успешной иммобилизации молекул ДНК, исследование свойств и структуры ДНК при адсорбции на такие поверхности. Для решения этой задачи необходимо синтезировать ДНК-подобные линейные молекулы, обладающие повышенной механической стойкостью и сопротивляемостью к стрессу, возникающему при нанесении молекул из водного раствора на твердую подложку

НАНОТЕХНОЛОГИИ В МЕДИЦИНЕ

Особый интерес вызывают работы по применению нанотехнологий в медицине, где для достижения определенного результата необходимо изменить структуру клетки на молекулярном уровне, т.е. осуществлять "молекулярную хирургию" [39]. Такую операцию могут выполнять нано-роботы (наноботы). Ожидается, что уже в начале 21-го века будут созданы молекулярные роботы-врачи, которые могут "жить" внутри человеческого организма, устраняя все возникающие повреждения, или предотвращая возникновение таковых. Манипулируя отдельными атомами и молекулами, программируемые наноботы смогут осуществлять ремонт клеток.

Для достижения этих целей необходимо решить три основных вопроса:

- 1) Разработать и создать молекулярных роботов, которые смогут ремонтировать молекулы.
- 2) Разработать и создать наноконьютеры, которые будут управлять наномашинками.
- 3) Создать полное описание всех молекул в теле человека, иначе говоря, создать карту человеческого организма на атомном уровне.

В связи с этим в своей книге Балабанов, рассматривая применение нанотехнологий в медицине, отмечает не только сложность стоящих здесь чисто научных задач, но и наличие различного рода фальсификаций, так как контроль процесса на молекулярном уровне требует применения наноустройств. Более того, нано-лекарства могут быть вредны. Так ученый из Швеции Карлссон [36] пишет: «Ежегодно 5300 шведов преждевременно умирают от вдыхания микроскопических частиц угля, асфальта, железа и др. материалов, которые загрязняют городской воздух. Эти частицы являются результатом неполного сгорания, трения о дорожное покрытие и т.п., и их количество можно было бы сократить, если бы были предприняты необходимые мероприятия. Но проблема состоит в том, что неизвестно какие источники частиц представляют наибольшую опасность для здоровья людей». По мнению Карлссон особенно вредны частицы, находящиеся в воздухе метро. Они разрушительно действуют на ДНК человека. В частности, воздух в метро содержит частицы железа, которые образуются вследствие трения колес о рельсы. Наибольший вред человеческому организму они наносят при попадании в легкие, когда свободные радикалы образуются в клетках организма. Свободные радикалы – это быстро движущиеся молекулы, которые как раз и наносят наибольший вред человеческой ДНК.

В нанотехнологиях есть особая отрасль, которая базируется на использовании биологических наномолекул — бионанотехнология. Одно из ее направлений — создание различных молекулярных устройств. Среди них, например, биосенсоры для выявления каких-либо веществ, присутствующих в окружающей среде или организме человека, устройства для детектирования определенных нуклеотидных последовательностей с целью обнаружения мутаций. Академик Власов в своем выступлении на научной сессии Президиума СО РАН 22 декабря 2006 г. сказал: «Данное направление развивается быстрыми темпами и уже очень много дало медицинской диагностике — в медицине на сегодняшний день широко применяется иммуноферментный, иммунофлуоресцентный анализ, амплификация нуклеиновых кислот с помощью полимеразной цепной реакции. Вся медицинская диагностика, которая задействует современную технику, основана на использовании комплексов молекул: одна большая молекула узнает другую большую молекулу, и после этого включается сигнал (обычно это световая индикация на определенной длине волны). В данной области происходит постоянное совершенствование техники и усложнение наноконструкций.

Второе направление бионанотехнологии — огромная пограничная область — существует благодаря «содружеству» с физической нанотехнологией и физическими методами исследования. Один из примеров — использование квантовых капель или точек. Это очень сильно светящаяся структура небольших размеров из неорганических материалов. Их, например, «запускают» в организм для определенных целей или используют в диагностических системах. Квантовые капли удобны тем, что флуоресцируют и хорошо заметны, а, кроме того, они стабильны (в отличие от органических молекул). Надо сказать, что физики тоже давно работают в наномире на уровне атомов и молекул, правда, с неживым материалом, который имеет более «фиксированные» свойства. Что касается наших биологических молекул, они открывают ряд новых возможностей для конструирования, поскольку являются чрезвычайно разнообразными и обладают собственными интересными признаками, которых нет у неорганических материалов» (www.sibai.ru/content/view/full/609/727).

Согласно основным принципам, принятым на рабочем совещании ЕТР (European Technology Platform) Nanomedicine в 2008 г. стратегической целью Европейского Экономического Сообщества в области наномедицины является достижение прорыва в здравоохранении с помощью развития и внедрения нанотехнологий. Наномедицина рассматривается как потенциал для диагностики и лечения многих серьезных заболеваний. При этом выделены три приоритетных направления исследований:

- Развитие нанотехнологий для медицинской диагностики, включая получение изображений.
- Производство, доставка и реализация лекарственных препаратов.
- Восстанавливающая медицина

Такое же пристальное внимание развитию наномедицины уделяется в США. Например, при национальном институте здоровья США создано восемь исследовательских центров. Всего в США при различных университетах насчитывается более 50 исследовательских центров и лабораторий, нацеленных на разработку нанотехнологий для медицины. В этих центрах нанотехнологическая медицина рассматривается как наука и технология диагностики, обработки и превентивного диагноза болезней и травматических повреждений, а также снижения боли, сохранения и улучшения здоровья

людей, используя при этом средства и знания о человеческом организме на молекулярном уровне и применяя инженерные средства нано-масштаба.

Как отмечает Fretas [30], применение нанотехнологий в медицине в отличие от других применений, имеет этические аспекты. Действительно, наномедицина может открыть не только невиданные возможности лечения болезней, потенциально изменив всю медицинскую науку, но и открыть пути продления жизни, а также полностью изменить представление о живом, не говоря о био-роботах и искусственных мутантов. По-видимому, процесс проникновения идей нанотехнологии в медицину будет бурно развиваться и расширяться. Ведь только первый прозрачный намек на возможность зарождения нанотехнологии был сделан в 1929 г. Bernal [24]: «Открытия 20-го столетия, в частности микромеханизмов квантовой теории, которая затрагивает природу самого вещества, являются более фундаментальными и со временем приведут к более широкому и важному результату. Первым шагом будет развитие новых материалов и новых процессов, в которых физика, химия и механика будут неразрывно объединены. Скоро должен быть достигнут уровень, когда материалы могут быть произведены не только с помощью данных нам приемов природы их камней, металлов, древесины и стекла, но и с помощью модификаций на молекулярном уровне. Уже мы знаем, что все разнообразие атомов; мы начинаем понимать силы, которые связывают их вместе; скоро мы будем делать это для реализации наших собственных целей. Результат – не так очень отдаленный – вероятно будет завершение эпохи металлов и всего, что с ними связано – рудники, мартиновские печи и механизмы массивной конструкции».

Безусловно, медицина, несмотря на её особый статус, не может быть исключением в смысле научного прогресса. Нанотехнологии являются одним из перспективных направлений этого прогресса. И уже спустя менее столетия наблюдается воплощение многих пророчеств ученых 19-го столетия. При этом многие достижения науки, и медицины в частности, не интерпретированы как внедрение нанотехнологий. Например, уже многие годы в НПО «Полус-ИРЭ» ведутся работы по применению волоконных лазеров в хирургии и биомедицине (www.ntoire.polus.ru). Медицинские эффекты достигаются за счет воздействия оптического излучения на биологические ткани [9,10,18].

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Одной из проблем человечества в ближайшее время является рост потребления энергии. Нанотехнологии предлагают растущему энергопотреблению ряд решений по повышению эффективности использования энергии, разработке новых источников и преобразования энергии. Основываются нанотехнологии на материалах с совершенно новыми свойствами и подразумевают манипуляции на молекулярном уровне, то есть на расстояниях в миллионные доли миллиметра. Однако потенциал нанотехнологий заключается не только в миниатюризации каких-либо вещей. Работая в столь микроскопических масштабах, ученые получают возможность менять свойства материалов. В результате они получают необычные оптические, электрические и другие свойства из-за того, что с их помощью атомы располагаются строго определенным образом. А это, в свою очередь, можно использовать для самых разных целей, в том числе и в энергетике.

Применение нанотехнологий в энергетике в первую очередь связано с ядерной энергетикой. Традиционная ядерная энергетика использует энер-

нию распада ядер радиоактивных элементов для нагрева приемника тепла, который, в свою очередь, нагревает воду. Вода преобразуется в пар с высоким давлением и температурой, пар вращает турбину, которая в свою очередь передает вращение генератору. Данный способ преобразования ядерной энергии в электрическую энергию далеко не совершенен. Связано это с тем, что, во-первых, на каждом этапе происходят естественные потери энергии, во-вторых, вся технологическая цепочка занимает много места, требует габаритного и дорогого оборудования. Естественным стремлением ученых было уменьшить число ступеней преобразования одного вида энергии в другой прежде, чем будет выработана электроэнергия.

Разработки ядерных батарей начались с первых космических полетов. В США и Советском Союзе велись разработки ядерных батарей для космических аппаратов. В этих устройствах применялись термоэлектрические материалы, с помощью которых тепло ядерной реакции напрямую преобразовывалось в электроэнергию. Такие установки были очень компактными, так как в них отсутствовали парогенераторы, турбины, генераторы. Но эффективность подобных устройств была крайне низка. Тем не менее, ученые в США считают, что исследуемый ими способ прямой конвертации радиации в электроэнергию с помощью термоэлектрических наноматериалов открывает новую эру в космических полетах на сверхдальние расстояния и найдет свое применение при создании земных транспортных средств. Журнал *New Scientist* (27 марта 2008 г.) сообщает, что в лаборатории Университета штата Алабама разработан термоэлектрический материал, значительно повышающий эффективность всей технологии. Новый материал представляет собой множество слоев углеродных нанотрубок наполненных золотом и окруженных гидридом лития. Радиоактивное излучение воздействует на электроны в атомах золота и заставляет их покидать свои орбиты. Электроны проходят через нанотрубки и попадают в гидрид лития, затем они движутся к электроду, создается электрический ток.

Тесты показали, что разработанный материал способен вырабатывать в 20 раз большую электрическую мощность по сравнению с образцами известными ранее. По словам одного из изобретателей, нанотрубки позволили существенно повысить удельную электрическую мощность термоэлектрика. Нанотрубки могут быть ориентированы таким образом, чтобы наиболее эффективно использовать энергию радиационного излучения. Термоэлектрики могут стать компактными и очень удобными источниками энергии, как для космических аппаратов, так и для земных автомобилей. Но это, как признают ученые, лишь далекая перспектива.

Некоторые успехи применения нанотехнологий в энергетике достигнуты за счет повышения эффективности солнечных батарей. Американская компания *Nanosolar*, созданная в 2002 г., уже построила в Калифорнии, Сан Хосе и Германии фабрики по производству на основе тонкопленочной технологии солнечных батарей нового типа, обеспечивающих получение электроэнергии, стоимость которой снижается в 10 раз. Нанометодика в технологии производства солнечных элементов сводится к применению пленок медь–индий–диселенид галлия (так называемые CIGS-пленки). Этот полупроводник характеризуется на 20% большим фотоэлектрическим эффектом, чем современные солнечные элементы на кремнии. Тонкая пленка CIGS (copper-indium-gallium-selenide) толщиной всего 1 микронметр производит столько же электричества, сколько 200–300-микронный полупроводниковый кремниевый элемент. Одно из преимуществ новой технологии производства пленок – «самосборка» жидкости, состоящей из наночастиц,

которые покрывают поверхность SIGS. Благодаря этому солнечные элементы могут быть нанесены на гибкую основу. А это практически невозможно при использовании кремниевых элементов.

Уже сейчас можно указать на некоторые результаты использования нанотехнологий в энергетике:

- С помощью нанотехнологий американская фирма Engelhard создала своего рода молекулярные «ворота», через которые проникают молекулы двуокиси углерода, а более крупные молекулы (метановые) остаются в веществе. Практическое применение это находит при фильтрации двуокиси углерода из природного газа и при создании автомобильных катализаторов.

- Hydrocarbon Technologies (НТТ), дочерняя фирма известной американской компании Headwaters, разработала методику обработки угля, тяжелой нефти, битумов, природного газа, биомассы и отходов с помощью нанотехнологий на молекулярном уровне таким образом, чтобы создавать из них экологически чистое жидкое топливо.

- Нанометод NxCatTM, созданный на фирме Nanokinetix, позволяет наполнителям автомобильных катализаторов улавливать летучие органические остатки выхлопных газов.

- На фирме Headwaters NanoKinetix на основе нанотехнологий развит процесс производства жидко-кристаллических и плазменных дисплеев. При этом используется радикально новый тип светоизлучающих диодов, создаваемых на основе сверхтонкого покрытия высоко проводящих металлических материалов, таких как медь, палладий или платина.

- Японская компания Nichia на основе нанотехнологий производит световые диоды, которые во много раз эффективнее обычных лампочек, что открывает широкие возможности для экономии электроэнергии в глобальном масштабе.

- Кировоградский завод твердых сплавов (Свердловская область) в 2009 г. освоил производство сверхтвердых сплавов с использованием нанопорошков.

- Углеродная пленка толщиной в один атом создана совместными усилиями ученых из британского Университета Манчестера и немецкого Института Макса Планка. Толщина полученной мембраны такова, что требуется уложить ее в 200 тысяч слоев, чтобы достичь толщины человеческого волоса. По своей химической природе материал является графеном — формой кристаллической организации атомов углерода, при которой они объединены в подобную сотам двумерную решетку.

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Стратегическая значимость лесных ресурсов и их нематериальная ценность неуклонно растут. Поэтому лесной сектор стал объектом многочисленных исследований разного уровня и направленности [20]. В соответствии с лесной технологической платформой (Forest Technology Platform – FTP), принятой в 2004 г. европейскими конфедерациями деревообрабатывающих отраслей, лесовладельцев и производителей бумаги, одним из направлений совершенствования лесной промышленности является внедрение нанотехнологий. В лесной промышленности за счет внедрения новых добавок и химикатов, произведенных с помощью нанотехнологий, может быть достигнуто значительное улучшение качества бумаги, а ввод в технологический процесс наносенсоров позволит повысить управляемость технологического процесса.

25 октября 2009 г. в Санкт-Петербурге состоялся третий российско-финляндский лесной саммит - совещание по вопросам, связанным с развитием лесного сектора, с участием глав правительств России и Финляндии и других высокопоставленных чиновников обеих стран. Как сообщает Лесной форум Гринпис России, по итогам саммита был составлен итоговый меморандум. Стороны договорились о развитии торгово-экономического и научно-технического сотрудничества в лесном секторе на взаимовыгодных условиях, включая создание и выпуск новых видов продукции переработки древесины, в том числе с использованием био- и нанотехнологий.

Обнадеживающий смысл упомянутой декларации, к сожалению, не позволяет его подтвердить реальными делами. По этому поводу Ярошенко пишет: «В результате проведенных в 2007-2008 г.г. реформ, основанных на новом лесном законодательстве Российской Федерации, некоторых других ошибочных решений, а также совпавших с ними негативных процессов в мировой экономике, лесной сектор нашей страны оказался на грани глубокого кризиса. Предотвратить этот кризис уже невозможно - он начался, и развивается весьма стремительно. Однако можно и нужно принять меры к тому, чтобы он оказался как можно менее продолжительным, нанес как можно меньший ущерб лесу и зависящим от него людям, и чтобы как можно быстрее восстановилось движение российского лесного сектора в направлении большей экологической, социальной и экономической устойчивости» И далее «Первоочередной мерой, направленной на исправление ситуации в лесном секторе России, должно стать признание ошибок, допущенных при разработке нового лесного законодательства, критического уровня истощенности лесных ресурсов, и катастрофического, требующего немедленных действий со стороны государства, социально-экономического положения лесных деревень и поселков. Без признания допущенных ошибок и реальных проблем надеяться на какое-либо исправление ситуации не приходится».

Несколько другое положение с внедрением нанотехнологий в лесное хозяйство и промышленность имеет место в зарубежных странах. Здесь одним из направлений развития лесной промышленности является производство биотоплива из древесины на основе нанотехнологий [48,49]. Например, при Wake Forest University (США, Северная Каролина) создан специализированный центр «Нанотехнология и молекулярные материалы», который проводит исследования по развитию и применению нанотехнологий в лесной индустрии. Этот центр в первую очередь развивает новые материалы и методы их синтеза, обращая особое внимание на:

- электро-вытягивание оптических волокон;
- полимерные нанонаполнители и нанопроводники;
- углеродные нанотрубки и их легированные варианты;
- металлические наночастицы; и
- нанопроводники на основе GaN (Galium Nitride), PbS (Lead Sulfide) and PbSe (Lead Selenide).

Ведущая профессиональная ассоциация TAPPI (Technology of Alabama for Pulp and Paper Industry), образованная в 1915 г. в США, ежегодно проводит международные конференции на тему «Нанотехнологии для лесной промышленности». Например, в 2009 г. такая конференция состоялась 23-26 июня в Канаде [44].

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОХРАНЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Одним из направлений развития и применения нанотехнологий является защита систем окружающей среды от антропогенных воздействий. В этом плане нанотехника применяется при очистке воды (наноупленки) и воздуха (нанопильеры), в катализаторах, очистке наночастицами от нефтяных загрязнений, обнаружении ядовитых веществ наносенсорами и т.д. Нанотехнология, предлагающая новые решения в области энергетики, способствует, например, снижению негативных последствий от нефтяных загрязнений.

Одной из проблем загрязнения окружающей среды является использование упаковочных материалов, которые не разлагаются при их попадании в окружающую среду. Биотехнологии помогают найти пути решения этой проблемы. В частности уже имеются определенные достижения:

- В институте машиностроения Университета Висконсин-Мэдисон разработали биопластмассы из возобновляемых природных ресурсов (кукуруза и соевые бобы). Эти материалы по окончании срока службы при соответствующих условиях распадаются на углекислый газ, воду и другие биоматериалы. Для улучшения прочности и термостойкости в состав биополимеров добавляются наноглина, углеродные нанотрубки и природные волокна.

- В Rensselaer политехническом институте США разработаны наноклей, состоящий из наноразмерных самособирающихся слоев полимерных цепей, концы которых модифицированы такими элементами, как сера, кремний или кислород. Он способен выдержать намного более высокие температуры (до 700 °С), чем ранее применявшиеся полимерные адгезивы. Суперклей может использоваться в электронике для крепления микросхем, а также для создания жаропрочных красок и покрытий.

Открытие buckminsterfullerene (C_{60}) и углеродных нанотрубок было инициировано исследованиями углеродных наночастиц (CNP – carbon nanoparticles), а также ожидаемыми возможностями их использования [38]. Уникальные свойства материала были использованы для эффективного сохранения и накопления энергии, что открыло перспективу снижения опасности воздействия на климат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отмеченные здесь особенности применения нанотехнологий в различных областях науки, техники и хозяйственной деятельности не охватывают всего многообразия проблем и идей, которые широко обсуждаются в научной литературе. Ясно, что развитие методов оперирования с объектами наноразмеров открывает возможности в создании материалов и устройств с принципиально новыми характеристиками и обеспечивает снижение энергозатрат, что позволяет надеяться на преодоление антропогенного воздействия на климат. Безусловно, что вмешательство в наноструктуры может приводить к непредсказуемым отрицательным последствиям, особенно в медицине и биологии. Поэтому развитие нанотехнологий должно сопровождаться исследованиями вопросов безопасности последствий изменения наноструктур. При этом необходимо рассматривать не только чисто научные, но и социальные вопросы. Особенно, когда решается проблема синтеза нанороботов.

Современные достижения в области нанотехнологий во многом обязаны изобретению в 1981 г. сканирующего туннелирующего микроскопа, кото-

рый позволила увидеть отдельные атомы. Заглядывая в будущее, можно ожидать в ближайшее время новых прорывов в области технологий хранения информации, создании охладительных установок на основе термоэлектронного эффекта и других сферах человеческой деятельности. Ожидается, что в ближайшее время могут быть созданы устройства, состоящие из одной молекулы. Многие исследователи ведут работы в области самовоспроизводимых механизмов на базе человеческой молекулы ДНК.

Определенную озабоченность вызывает проблема применения нанотехнологий в медицине. Ведь создание наноустройств в медицине может привести к открытию возможностей чтения нейрокодов человеческого мозга с непредсказуемыми социальными последствиями. Другими словами, начавшееся вступление в эпоху молекулярного производства создает много разных рисков, адаптация к которым и их преодоление требуют новых решений на глобальном планетарном уровне.

Литература

1. *Альмов М.И.* Механические свойства нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2004. – 32 с.
2. *Альмов М.И., Зеленский В.А.* Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. – М.: МИФИ, 2005. – 52 с.
3. *Андриевский Р. А.* Наноматериалы: концепция и современные проблемы. // Российский химический журнал.- 2002, т. XLVI, №5.- С. 50-56.
4. *Балабанов В.* Нанотехнологии: Наука будущего. –М.: Изд-во: Эксмо, 2009. - 247 с.
5. *Балоян Б.М., Колмаков А.Г., Альмов М.И, Кротов А.М.* Наноматериалы: классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. – М.: АгроПрессДизайн, 2007.-102 с.
6. *Борисенко В. Е.* Нанoeлектроника - основа информационных систем XXI века. – Минск: Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 1997 (www.pereplet.ru).
7. *Борисенко В.Е., Воробьева А.П., Уткина Е.А.* Нанoeлектроника. – М.: Изд-во Бинном. Лаборатория знаний. Серия: Нанотехнология, 2009. – 223 с.
8. *Бурков В.Д., Крапивин В.Ф., Потапов П.П.* Экономичность адаптивно-эволюционного синтеза информационно-измерительных систем. // Экономика природопользования. - 2007, №5. - С. 42-48.
9. *Гращенко Т.П., Богомильский М.Р., Минаев В.П.* Лечение ЛОР-заболеваний с использованием лазерных скальпелей. - Тверь: ООО «Губернская медицина», 2001. – 52 с.
10. *Гельфонд М.А., Иванов А.А., Проценко Н.Е., Соколов Г.Н.* Применение полупроводникового лазера в дерматологии и косметологии. - СПб.: Изд-во СПбГМУ, 2001. - 48 с.
11. *Горшков К.В. Симунин М.М.* Установка для получения углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола. // В сб. А.А. Горбачевич (ред.) Нанотехнологии в электронике. – М.: МИЭТ, 2007. – С. 93-98.
12. *Карabasов Ю.С.* Новые материалы. – М.: МИСИС, 2002. – 736 с.
13. *Комаров И.А., Шлегель П.В. Симунин М.М.* Методики производства углеродных нанотрубок каталитическим пиролизом этанола.// В сб. А.А. Горбачевич (ред.) Нанотехнологии в электронике. – М.: МИЭТ, 2007. – С. 88-92.

14. Мальцев В.А., Нерушев О.А., Новопашин С.А., Сахаров С.З., Смовж Д.В. Синтез металлических наночастиц на углеродной матрице. // Российские нанотехнологии. -2007, №2.- с. 85-89
15. Неволин В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике. Изд. 2-е. – М.: Техносфера, 2006. –159с.
16. Нерушев О.А., Новопашин С.А., Смовж Д.В. Синтез углеродных нановолокон на аустенитной стали. // Российские нанотехнологии.- 2008, №3.- С. 88-93.
17. Новопашин С.А. Углеродные нанотехнологии в энергетике: три возможных пути применения // 2009 (portal.ru/science/index.php?task=view&id=187)
18. Овчинников Ю.М., Лопатин А.С., Гамов В.П. Болезни носа, глотки, гортани и уха. – М.: Изд-во: МИА, 2008. – 320 с.
19. Савиных В.П., Крапивин В.Ф., Потанов П.П. Информационные технологии в системах экологического мониторинга. – М.: Геозедкартиздат, 2007. - 388 с.
20. Страхов В.В. Форсайт в лесном секторе стран Европейского Союза. // Форсайт. -2008, № 3. - С. 10-15.
21. Ярошенко А.Ю. Лесное хозяйство и управление лесами в России: современное состояние и перспективы развития. (www.forestforum.ru).
22. Baklanov M. R. and Mogilnikov K. P. Non-destructive characterisation of porous low-k dielectric films. // *Microelectronic Engineering.* -, 2002, Vol. 64, No. 1. - P. 335-349.
23. Berger S., Porat R., and Rosen R. Nanocrystalline materials: A study of WC-based hard metals.// *Progress in Materials Science.* -1997, Vol. 42, No. 1-4. – P. 311-320.
24. Bernal J.D. The World, the Flesh, and the Devil: An Enquiry into the Future of the Three Enemies of the Rational Soul. - Indiana University Press, Bloomington, 1969. – 81 pp. (<http://www.hia.com/pcr/bernal.html>).
25. Birringer R., Gleiter H., Klein H.-P., and Marquard P. // *Phys. Lett. B*, 1984, v. 102, p. 365–369
26. Chun Ye. Photopolarimetric measurement of single, intact pulp fibers by Mueller matrix imaging polarimetry. // *Applied Optics.* - 1999, Vol. 38, No. 10.- P. 1975-1985.
27. Drexler K.E. Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* - 1981, Vol. 78, No. 9. P. 5275-5278.
28. Drexler K.E. Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. - Anchor Books, Peterborough UK, 1987. - 320 pp.
29. Drexler K.E. Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation.-John Wiley and Sons, 1992. - 576 pp.
30. Freitas R.A. Nanomedicine. Volume I: Basic Capabilities. - Landes Bioscience, Georgetown, TX, 1999.- 509 pp. (www.nanomedicine.com/NMI.htm).
31. Giovanni B. Spectroscopic ellipsometry: a tool for the real time monitoring at the nanoscale of surface processing. (<http://www.nanotec.it/metrologia/Giovanni Bruno.PDF>).
32. Gleiter H. Nanostructured materials: basic concepts and microstructure.// *Acta Materialia.* -2000, Vol.48. - P.1-29.
33. Gleiter H. Deformation of Polycrystals. In: N. Hansen, T. Leffers, and H. Lithold (eds) *Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science.* - Roskilde, RISO Nat. Lab., 1981. - P. 15–21.

34. Hasegawa K.T., Nakayama T., and Aono M. Quantized conductance atomic switch // Nature. – 2005, Vol. 433. – P. 47-50.
35. Hirjibehdin C.F., Chiung-Yuan Lin, Alexander F. O., Ternes M., Lutze C.P., Jones B.A., and Heinrich A.J. Large Magnetic Anisotropy of a Single Atomic Spin Embedded in a Surface Molecular Network. // Science. – 2007, Vol. 317, No. 5842. – P. 1199-1203.
36. Karlsson H. Underground air might cause DNA damage. // Science Daily. - Dec. 15 2006. (www.sciencedaily.com).
37. Krause, S. Berbil-Bautista L., Herzog G., Bode M., and Wiesendanger R. Current-Induced Magnetization Switching with a Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscope. // Science. – 2007, Vol. 317. no. 5844. - P. 1537 – 1540.
38. Kushnir D. and Sandén B.A. Energy requirements of carbon nanoparticle production. // Journal of Industrial Ecology. – 2008, Vol. 12, No. 3. P. 360-375.
39. Merle R.C. Nanotechnology and Medicine dvances in Anti-Aging Medicine. - Liebert Press, 1996 Vol. I. – P. 277-286.
40. Mkrtchyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I., and Klimov V.V. Spectroellipsometric technology for ecological monitoring of the aquatic environment. // Proceedings of the First Mediterranean Photonics Conference, 25-28 June 2008, Ischia, Napoli, Italy, pp. 333-335.
41. Mkrtchyan F. A., Krapivin V. F., Kovalev V.I., Klimov V.V., Rukovichnik A. I., and Golovachev S.P. An adaptive spectroellipsometric technology for the ecological monitoring of the aquatic environment. Proceeding of 25-th ACRS, Chiang-Mai, Thailand, 2004, pp. 13-15.
42. Naik A. K., Hanay M. S., Hiebert W. K., Feng X. L. and Roukes M. L. Towards single-molecule nanomechanical mass spectrometry. // Nature Nanotechnology.- 2009, No. 4.- P. 445 – 450.
43. Perov P.I., Kovalev V.I., Rukovichnikov A.I., Rossukanov N.M., and Johnson W.H. Hydrogen-sensitive palladium film study with precise and fast ellipsometers. // Int. J. Electronics. - 1994, Vol. 76, No. 5. - P. 797-803.
44. Proceedings of the International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry. 23-26 June, 2009, Edmonton, Alberta, Canada. Tappi J., 10 pp. (www.tappi.org).
45. Sinitskii A. and Tour J.M. Lithographic Graphitic Memories. // ACSNano. - 2009, Vol. 3, No. 9. P. 2760–2766.
46. Taniguchi N. On the Basic Concept of 'Nano-Technology. // Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering. - 1974.- P. 398-343.
47. Weis R., Suk-Ho Hong, Ransch J., and Winter J. Rayleigh-Mie scattering ellipsometry as an in situ diagnostic for the production of “smart nanoparticles”. // Phys. Stat. Sol.- 2008, Vol. 205, No. 4. - P. 802-805.
48. Wegner T. and Jones P. Nanotechnology for forest products. Part 1. // Solutions for People, Processes and Paper. -2005, No. 7. - P. 44-46.
49. Wegner T. and Jones P. Nanotechnology for forest products. Part 2. // Solutions for People, Processes and Paper. – 2005, No. 8 – P. 43-45.
50. Wilkinson T. The future is 3-D liquid crystals // http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2009/3D_liquid_cristals/
51. Yu C., Masarapu C., Rong J., Wei B, and Jiang H. Stretchable supercapacitors based on buckled single-walled carbon-nanotube macrofilms. // Advanced Materials. - 2009, No.8. – P. 4793-4797.

Bibliography

1. *Alymov M.I.* Mechanical properties of the nanocrystal materials.- MIFI, Moscow- 2004. 32 pp.
2. *Alymov M.I. and Zelinskyy V.A.* Methods for the receiving of the volumetric nanocrystal materials and their physic-mechanical properties. - MIFI, Moscow. – 2005. – 52 pp.
3. *Andrienskyy R.A.* Nanomaterials: conception and present problems// Russian Chemical Journal. – 2002, Vol. XLVI, No. 5. – P. 50-56. №5.- C. 50-56.
4. *Balabanov V.* Nanotechnologies: Future science. – Eksmo Publ., Moscow. – 2009. 247 pp.
5. *Baloyan B.M., Kolmakov A.G., Alymov M.I., and Krotov A.M.* Nanomaterials: classification, features, application and technologies for the production. – AgroPressDizain, Moscow, 2007. – 102 pp.
6. *Borisenko V.E.* Nanoelectronics – base for information systems of 21st Century. – State University for Informatics and Radioelectronics of Belarus, Minsk. – 1997.- (www.pereplet.ru).
7. *Borisenko V.E., Vorobieva A.I., and Utkina E.A.* Nanoelectronics. – Binom Press, Laboratory of Knowledges. Series: Nanotechnology. Moscow. – 2009. – 223 pp.
8. *Burkov V.D., Krapivin V.F., and Potapov I.I.* Efficiency of adaptive-evolution synthesis of information-measuring systems // Nature Management Economics. -2007, No.5.- P. 42-48.
9. *Garaschenko T.I., Bogomilskyy M.R., and Minaev V.P.* Therapy of LOR-diseases by means of the laser scalpels. – Gubernskaya Medicina Ltd., Tver. – 2001. – 52 pp.
10. *Gelfond M.L., Ivanov A.A., Protsenko N.E., and Sokolov G.N.* Application of semiconductor laser to dermatology and cosmetology. SpbGMU, St.-Petersburg. – 2001. – 48 pp.
11. *Gorshkov K.V. and Simunin M.M.* System for the carbon nanotubes processing from gas phase ethanol. // In A.A. Gorbatshevich (ed.) Nanotechnologies in the electronics. – MIET, Moscow. -2007. P. 93-98.
12. *Karabasov Yu.S.* New materials. -MISIS, Moscow. – 2002. – 736 pp.
13. *Komarov I.A., Shlegel I.V., and Simunin M.M.* Methodics for the production of carbon nanotubes with the catalytic pyrolysis of ethanol. // In A.A. Gorbatshevich (ed.) Nanotechnologies in the electronics. – MIET, Moscow. -2007. P. 88-92.
14. *Maltsev V.A., Nerushev O.A., Novopashin S.A., Sachapov S.Z., and Smovzh D.V.* Synthesis of metallic nanoparticles on the carbon matrix. // Russian Nanotechnologies. -2007, No. 2. – P. 85-89.
15. *Nevolin V.K.* Sonde-type nanotechnologies in the electronics. 2nd Edition. – Technosphere, Moscow. – 2006. – 159 pp.
16. *Nerushev O.A., Novopashin S.A., and Smovzh D.V.* Synthesis of carbon nanofibre on austenitic steel.// Russian Nanotechnologies. – 2008, No. 3.- P. 88-93.
17. *Novopashin S.A.* Carbonic nanotechnologies in the energetic: three possible ways of application // 2009 (popnanj.ru/science/index.php?task=view&id=187)
18. *Ovchinnikov Yu.M., Lopatin A.S., and Gamov V.P.* Diseases of nose, throat and ear. – MIA Press, Moscow. – 2008. – 320 pp.
19. *Savinikh V.P., Krapivin V.F., and Potapov I.I.* Information technologies in the ecological monitoring systems. – Geodezkartizdat, Moscow.- 2007. – 388 pp.
20. *Strachov V.V.* Forsait in the forest sector of EU countries // Forsait. – 2008, No. 3. – P. 10-15.

21. *Yarosbenko A.Yu.* Forestry and forest control in Russia: present state and development perspectives (www.forestforum.ru).
22. *Baklanov M. R. and Mogilnikov K. P.* Non-destructive characterisation of porous low-k dielectric films. // *Microelectronic Engineering.* -, 2002, Vol. 64, No. 1. - P. 335-349.
23. *Berger S., Porat R., and Rosen R.* Nanocrystalline materials: A study of WC-based hard metals. // *Progress in Materials Science.* -1997, Vol. 42, No. 1-4. - P. 311'-320.
24. *Bernal J.D.* The World, the Flesh, and the Devil: An Enquiry into the Future of the Three Enemies of the Rational Soul. - Indiana University Press, Bloomington, 1969. - 81 pp. (<http://www.hia.com/pcr/bernal.html>).
25. *Birringer R., Gleiter H., Klein H.-P., and Marquard P.* // *Phys. Lett. B*, 1984, v. 102, p. 365-369
26. *Chun Ye.* Photopolarimetric measurement of single, intact pulp fibers by Mueller matrix imaging polarimetry.//*Applied Optics.* - 1999, Vol. 38, No. 10.- P. 1975-1985.
27. *Drexler K.E.* Molecular engineering: An approach to the development of general capabilities for molecular manipulation. // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America.* - 1981, Vol. 78, No. 9. P. 5275-5278.
28. *Drexler K.E.* Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology. - Anchor Books, Peterborough UK, 1987. - 320 pp.
29. *Drexler K.E.* Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation.-John Wiley and Sons, 1992. - 576 pp.
30. *Freitas R.A.* Nanomedicine. Volume I: Basic Capabilities. - Landes Bioscience, Georgetown, TX, 1999.- 509 pp. (www.nanomedicine.com/NMI.htm).
31. *Giovanni B.* Spectroscopic ellipsometry: a tool for the real time monitoring at the nanoscale of surface processing. (<http://www.nanotec.it/metrologia/Giovanni Bruno.PDF>).
32. *Gleiter H.* Nanostructured materials: basic concepts and microstructure. // *Acta Materialia.* -2000, Vol.48. - P.1-29.
33. *Gleiter H.* Deformation of Polycrystals. In: N. Hansen, T. Leffers, and H. Lithold (eds) Proc. of 2nd RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science. - Roskilde, RISO Nat. Lab., 1981. - P. 15-21.
34. *Hasegawa K.T., Nakayama T., and Aono M.* Quantized conductance atomic switch //*Nature.* - 2005, Vol. 433. -P. 47-50.
35. *Hirjibehedin C.F., Chiung-Yuan Lin, Alexander F. O., Ternes M., Lutze C.P., Jones B.A., and Heinrich A.J.* Large Magnetic Anisotropy of a Single Atomic Spin Embedded in a Surface Molecular Network. // *Science.* - 2007, Vol. 317, No. 5842. - P. 1199-1203.
36. *Karlsson H.* Underground air might cause DNA damage. // *Science Daily.* - Dec. 15 2006. (www.sciencedaily.com).
37. *Krause, S. Berbil-Bautista L., Herzog G., Bode M., and Wiesendanger R.* Current-Induced Magnetization Switching with a Spin-Polarized Scanning Tunneling Microscope. // *Science.* - 2007, Vol. 317. no. 5844. - P. 1537 - 1540.
38. *Kushnir D. and Sandén B.A.* Energy requirements of carbon nanoparticle production. // *Journal of Industrial Ecology.* - 2008, Vol. 12, No. 3. P. 360-375.
39. *Merle R.C.* Nanotechnology and Medicine dvances in Anti-Aging Medicine. - Liebert Press, 1996 Vol. I. - P. 277-286.
40. *Mertchyan F.A., Krapivin V.F., Kovalev V.I., and Klimov V.V.* Spectroellipsometric technology for ecological monitoring of the aquatic environment. //

Proceedings of the First Mediterranean Photonics Conference, 25-28 June 2008, Ischia, Napoli, Italy, pp. 333-335.

41. *Mkertchyan F. A., Krapivin V. F., Kovalev V.I., Klimov V.V., Rukovichnik A. I., and Golovachev S.P.* An adaptive spectroellipsometric technology for the ecological monitoring of the aquatic environment. Proceeding of 25-th ACRS, Chiang-Mai, Thailand, 2004, pp. 13-15.

42. *Naik A. K., Hanay M. S., Hiebert W. K., Feng X. L. and Roukes M. L.* Towards single-molecule nanomechanical mass spectrometry. //Nature Nanotechnology.- 2009, No. 4.- P. 445 – 450.

43. *Perov P.I., Kovalev V.I., Rukovichnikov A.I., Rossukanov N.M., and Johnson W.H.* Hydrogen-sensitive palladium film study with precise and fast ellipsometers. // Int. J. Electronics. - 1994, Vol. 76, No. 5. - P. 797-803.

44. Proceedings of the International Conference on Nanotechnology for the Forest Products Industry. 23-26 June, 2009, Edmonton, Alberta, Canada. Tappi J., 10 pp. (www.tappi.org).

45. *Sinitskii A. and Tour J.M.* Lithographic Graphitic Memories. //ACSNano. - 2009, Vol. 3, No. 9. P. 2760–2766.

46. *Taniguchi N.* On the Basic Concept of 'Nano-Technology.// Proc. Int. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering. - 1974.- P. 398-343.

47. *Weis R., Suk-Ho Hong, Ransch J., and Winter J.* Rayleigh-Mie scattering ellipsometry as an in situ diagnostic for the production of “smart nanoparticles”. // Phys. Stat. Sol.- 2008, Vol. 205, No. 4. - P. 802-805.

48. *Wegner T. and Jones P.* Nanotechnology for forest products. Part 1. // Solutions for People, Processes and Paper. -2005, No. 7. - P. 44-46.

49. *Wegner T. and Jones P.* Nanotechnology for forest products. Part 2. // Solutions for People, Processes and Paper. – 2005, No. 8 – P. 43-45.

50. *Wilkinson T.* The future is 3-D liquid crystals // http://www.eng.cam.ac.uk/news/stories/2009/3D_liquid_crystals/

51. *Yu C., Masarapu C., Rong J., Wei B, and Jiang H.* Stretchable supercapacitors based on buckled single-walled carbon-nanotube macrofilms. // Advanced Materials. - 2009, No.8. – P. 4793-4797.