

# Гномьи сказки

Серия «Мир нанотехнологий»

*Е.А.Гудилин, Ю.Д.Третьяков*

Факультет Наук о Материалах МГУ им.М.В.Ломоносова

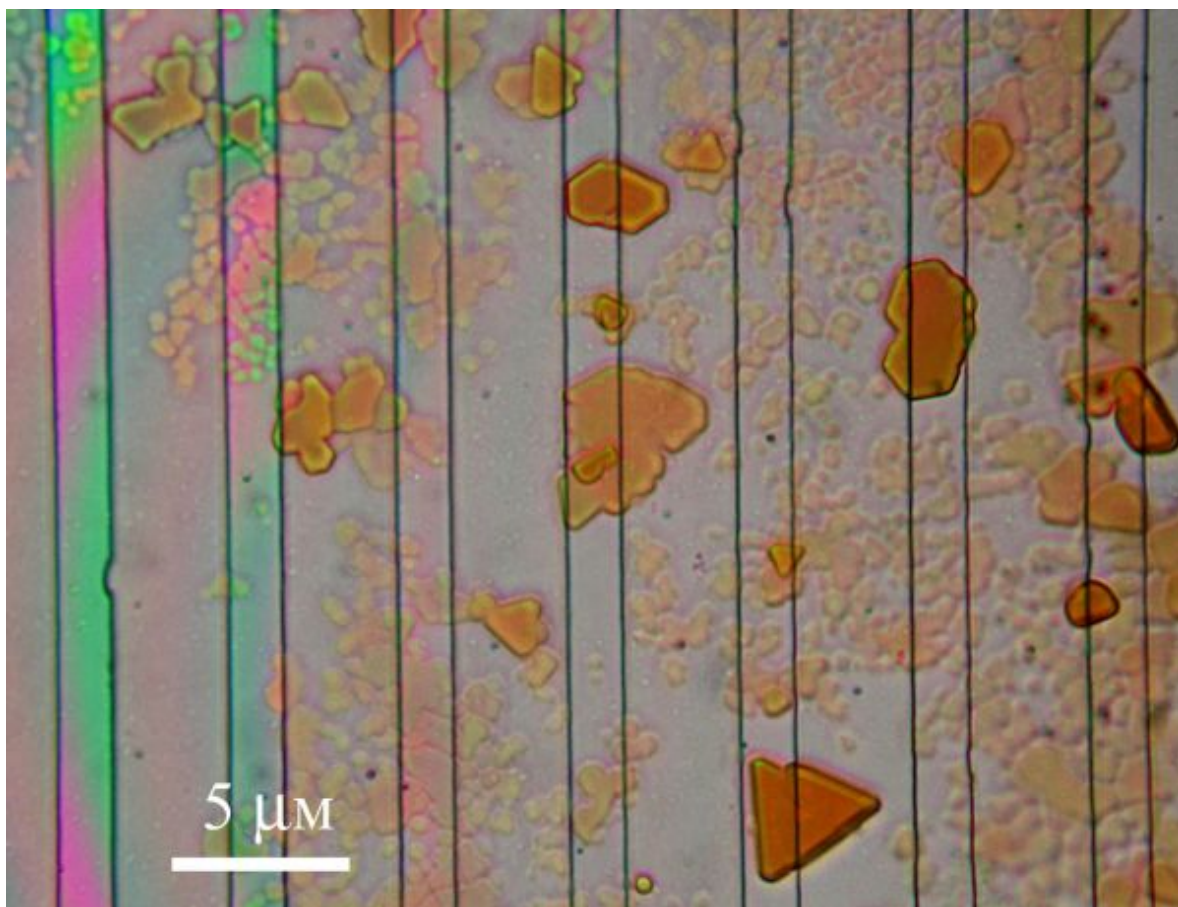
Химический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова

[goodilin@inorg.chem.msu.ru](mailto:goodilin@inorg.chem.msu.ru)

тел. (495) 939 4729, факс (495) 939 0998

В этой небольшой статье рассмотрены хрестоматийные, мифологические, а также реальные факты, которые рассказывают о развитии того, что сейчас называется громким словом «нанотехнологии». И самым реальным фактом остается то, что нанотехнологии – это не сказка, не вымысел средств массовой информации, они действительно существуют и с их помощью можно попытаться почти любую сказку сделать былью. Если только не забывать, что все это суперсовременное междисциплинарное новшество – удачное порождение классических наук с примесью нового исследовательского менталитета под соусом из последних синтетических и аналитических методик в тарелке из прочных знаний подрастающего поколения. Вот такое витаминное и калорийное блюдо!

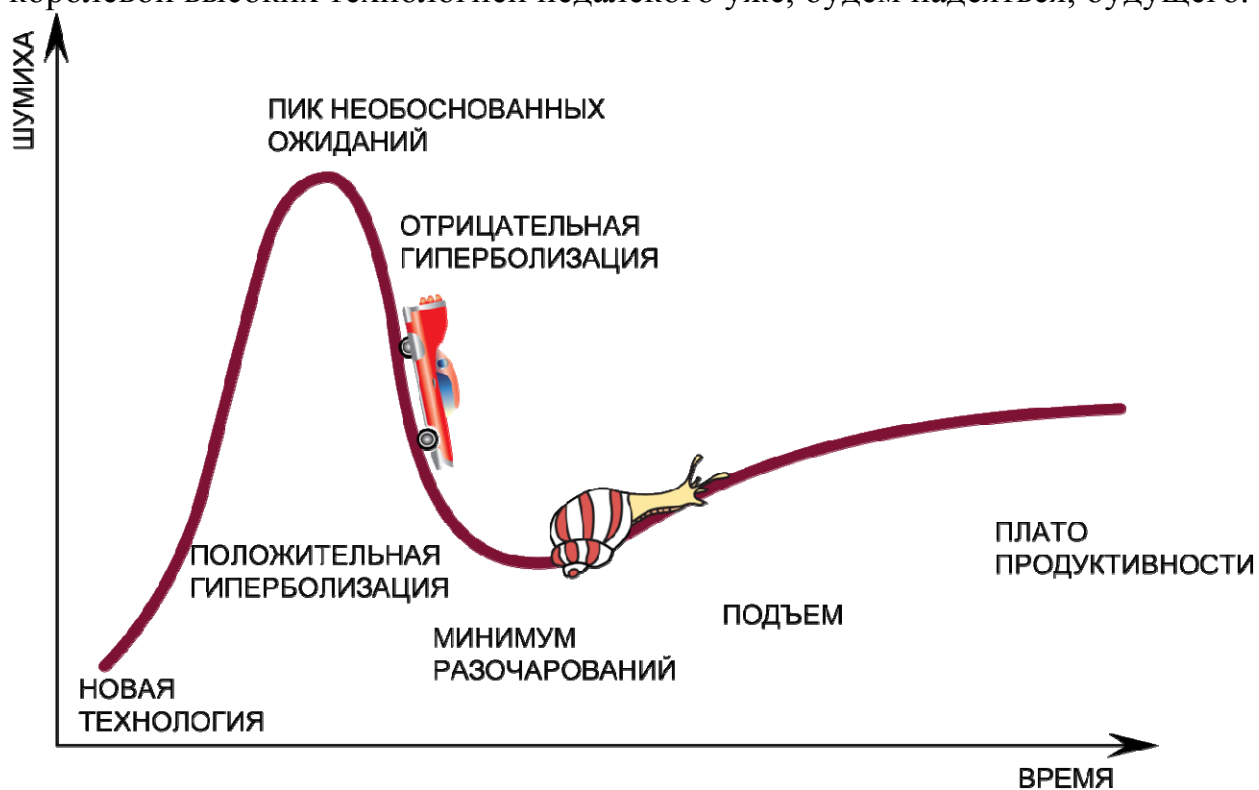
## Часть 1. У истоков нанотехнологий



- Что такое «нано»?
- Краткий курс истории развития нанотехнологий.
- Терминология

## Гоночная машина и улитка

Человеческий гений подпитывается идеями и добытыми титаническим трудом знаниями того, как эти идеи воплощать на практике. Люди гибнут «не за металл», как говорили классики, а по большей части именно «за идею». Ряд идей, например, философский камень, антигравитация, вечная молодость, так и не пришли к нам, в реальность, и остались только в мечтах и сказках. Другие, реальные, идеи стали в конце концов технологиями. Самые передовые технологиями называются сейчас «высокими». Ну, с космическими технологиями все понятно – куда же выше? А вот как быть с нанотехнологиями? Они же работают с мельчайшими, невидимыми невооруженным глазом объектами! Может быть, это «низкие» или «мелкие» технологии? Конечно же нет, сейчас в нанотехнологии вкладывается большой интеллектуальный и материальный потенциал, и это делает их королевой высоких технологий недалекого уже, будем надеяться, будущего.



*Рис.1. Типичный график отношению общества к новым технологиям (адаптировано И.В.Колесник, ФНМ МГУ)*

Почему вообще возник каверзный вопрос, да почти усмешка на устах, о роли нанотехнологий в развитии нашего общества и достижении светлого будущего? А он всегда, такой вопрос, возникает, потому что эволюция отношения общества к любой новой технологии типична (Рис.1). Вначале было слово, слово уважаемых людей, что нанотехнологии нужны и обещают манну небесную, что это – воплощение нашей мечты и путь вырваться вперед. Общественное мнение к таким светлым мыслям всегда восприимчиво, поэтому возник нанотехнологический бум и ажиотаж. А специалисты стояли в сторонке и задумчиво качали головой в приступе

глубокого пессимизма, а другие начали громко говорить, что мы, мол, этим занимаемся уже не один десяток лет (и многие, хотя не все, из них были правы!). В-общем, типичное представление из четырех актов, акт один: шумиха, акт два: неразбериха, акт три: наказание невиновных, акт четыре: награждение непричастных. И могли бы все эти акты реализоваться в случае нанотехнологий, но этого не произошло, поскольку кое – что с ними у нас действительно начинает постепенно получаться. Ажиотаж спадает, и начинается кропотливая и малозаметная, рутинная и систематическая работа специалистов по изучению наносистем, разработке наноматериалов, развитию нанотехнологий. «Пик необоснованных ожиданий» сыграл и положительную, и отрицательную роль. Отрицательную, поскольку наносной интерес общества к нанотехнологиям падает уже заметно, и как раз в тот момент, когда начинают появляться первые (уже российские) результаты. Положительную – потому что он всколыхнул общество и дал многим научным группам шанс начать новые или продолжить старые исследования на совершенно новом уровне. Сколько времени займет вползание по своей природе медленных научных исследований (Рис.1) на «плато продуктивности» и воплощение их в практику? Не один, и не два года. Условно столько, сколько нужно, чтобы только что поступивший в ВУЗ абитуриент стал аспирантом и во время выполнения диссертации придумал совершенно новые идеи и дал стране ту новую высокотехнологическую и фундаментально – глубокую интеллектуальную собственность, в которой мы так сейчас нуждаемся для развития наноиндустрии. Поэтому именно молодое поколение, скорее всего, станет тем основным действующим лицом, которые воплотят в реальность все самые смелые нанотехнологические идеи, а также придумают новые.

Нанотехнологии, скорее всего, будут существовать всегда, как химия твердого тела или ядерная физика, поскольку, как ни назови, эта область изучает особый участок «пятого измерения» (шкалы масштабов), «нанодиапазон», в котором реализуются особые взаимодействия и происходят особые события... каждое из которых можно предсказать уже сейчас на основе фундаментальных знаний классических наук – химии, физики, математики и механики, биологии и др. В этом смысле произошла не нанореволюция, а созревшая годами наноэволюция.

Действительно, само возникновение нанотехнологий глубоко закономерно. Сначала были путешествия, великие географические открытия и новые торговые пути. Человек изучил сполна два измерения нашего пространства - географические широту и долготу. Затем разнообразные капитаны Немо исследовали глубины океана, а Юрий Гагарин вышел за пределы Земли - человек начал покорять Космос. Это, несомненно, дало чрезвычайно многое - и перспективы освоения новых горизонтов, и понимание процессов, происходящих на нашей Земле и вне ее, особенно в области освоения новых источников энергии. Людям покорились третье измерение.



а.



б.

**Рис.2.** Гномы и нанотехнологии. (а) аллегорическое изображение, (б) Ректор МГУ академик В.А.Садовничий и декан ФНМ МГУ академик Ю.Д.Третьяков вручают серебряную статуэтку гнома – символа «гномей» нанотехнологической олимпиады МГУ-РОСНАНО «Нанотехнологии – прорыв в Будущее!» - лучшим школьникам – победителям олимпиады 2009 г. (фото с сайта Олимпиады [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru))

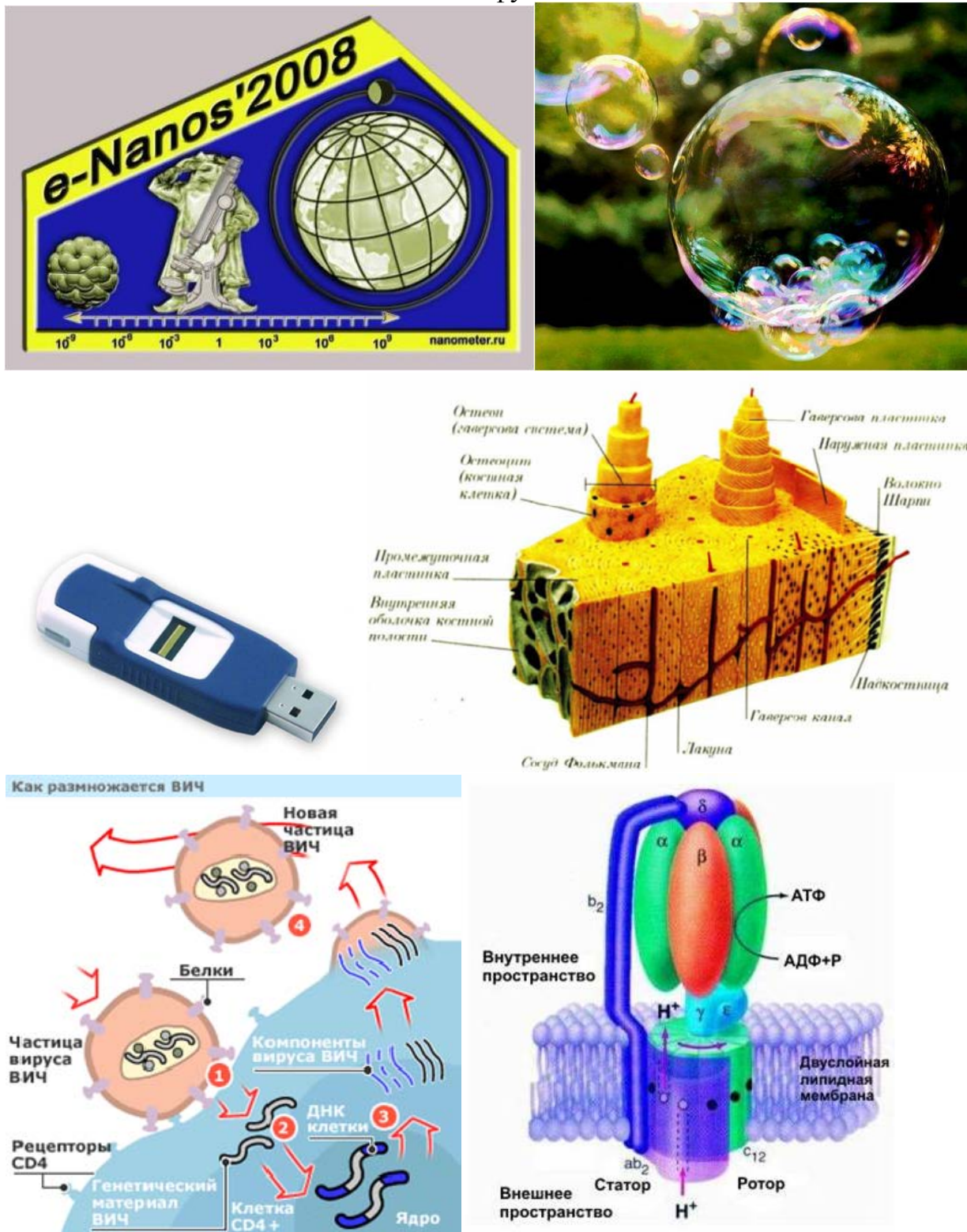
Потом люди задумались о времени и постепенно научились изучать как геологические и космические события, длящиеся миллиарды лет, так и

быстротечные фемтосекундные процессы, значительно более быстрые, чем, скажем, порхание крыльев колибри, выстрел или удар молнии. Это было уже четвертое измерение - время, дающее ключ к пониманию того, как именно все ранее изученные процессы происходят в действительности. На рубеже 20 и 21 веков случилось, наконец, новое чудо - мы вплотную приблизились к покорению пятого измерения - Микромира, что и ознаменовалось, в конце концов, возникновением нанотехнологий. Правда, слова «нанотехнология» и «нанонаука» в нашей речи надо бы, наверное, различать, как это обычно делают зарубежные коллеги. «Нанонаука» - для новых фундаментальных открытий, «нанотехнологии» - способ воплощения идей в практические решения, «наноиндустрия» - коммерциализация нанотехнологий. Три большие шага, и такие разные, к светлому будущему...

Согласно избитой уже истине, приставка «нано» произошла от греческого слова NANNOΣ («гном, карлик»). На рис. 2 показана одна из самых подходящих для этого случая иллюстраций: три гнома открывают своим ключом пещеру с богатствами. Вероятно, в данном случае под богатством стоит понимать интеллектуальную собственность, а под ключом - собственно, нанотехнологии как инструмент созидания материальных объектов (устройств), или же широко распространенный в нанотехнологиях и супрамолекулярной химии «принцип соответствия». Важно, что мудрый, но жадный до богатств гном объединяется с двумя другими хранителями ключа. Вероятно, наличие нескольких гномов отражает междисциплинарность нанотехнологий, а каждый из них вполне может быть символом одной из классических наук - химии, физики, механики (математики, вычислительных методов), биологии и пр. Только все вместе они могут, объединяя свои знания, проникнуть вглубь горы (материи), где в потаенной пещере (на «нанодиапазоне») есть много секретов и вожделенных сокровищ.

Так «нано» - это сколько? Это много или мало? Вот, в качестве ярких примеров, задачки (и ответы) «для самых маленьких» на III Всероссийской Интернет - олимпиаде по нанотехнологиям этого года... Когда - то, говорят, Чингис-хан приказал каждому из своих воинов принести по камню к его шатру. Приказано-сделано. Выросла гора. А что если каждый человек на земном шаре принесет по одной единственной квантовой точке (диаметр 10 нм, плотность материала  $7 \text{ г/см}^3$ ) и положит ее около штаб-квартиры Государственной Корпорации «Роснанотех» в кучу, то какую массу будет иметь эта куча? Оказывается, меньше самой маленькой пылинки - массой всего 20 миллиардных долей грамма. Почему автор эмблемы Интернет - олимпиады по нанотехнологиям (А.Б.Щербаков, Рис.3) расположил гнома между фуллереном и Землей? По очень простой причине - отношение роста гнома (1 метр) к диаметру молекулы фуллерена (примерно 1 нм) примерно равно отношению диаметра планеты Земля к росту гнома - оба соотношения составляют девять порядков величины. Если надуть пузырь со стенкой молекулярной толщины из 1 капли мыльного раствора, то его диаметр составит около 4 м. Уже сейчас, как нетрудно подсчитать, линейный размер

записывающих элементов «флэшки» на 64 Гб должен составлять около 30 нм. Площадь монослоя чешуек гидроксилапатита (фосфата кальция) из нашего скелета составит более десяти футбольных полей!



**Рис.3.** Объекты, позволяющие понять наноми: «эмблема наноолимпиады», мыльный пузырь, устройство флэш-памяти, иерархическое строение кости человеческого скелета, вирусы ВИЧ и использование ими клеток человека для размножения, работа фермента, встроенного в клеточную мембрану.

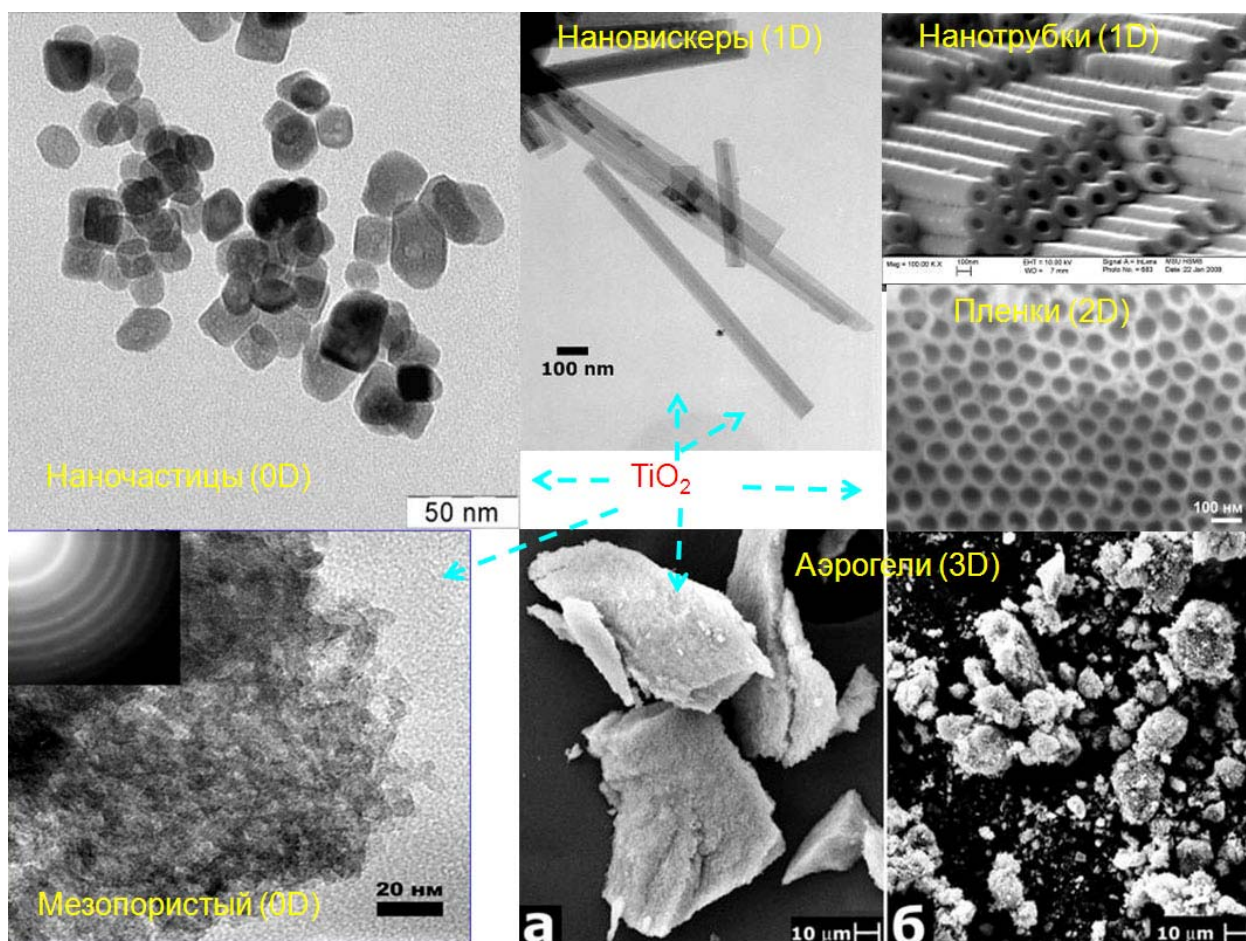
Говорят, для того, чтобы сделать трос для «космического лифта», планируется использовать одностенные углеродные нанотрубки, которые являются легким и чрезвычайно прочным материалом. Представьте, что один наноробот массой 0.01 миллиграмма сшивает две одинаковые одностенные углеродные нанотрубки длиной 1 микрон и диаметром 10 нанометров (каждая) за 1 миллисекунду, после чего у него исчерпывается запас энергии, и он «умирает». Затем два таких же наноробота сваривают куски из двух нанотрубок, сделанных предыдущими нанороботами, пучок таких нанотрубок будет в два раза длиннее и в два раза толще. И т.д. Процесс прекращается, когда гигантский пучок достигает длины одна тысяча километров. Оказывается, что диаметр троса составит при такой длине всего 1 см, это потребует 10 триллионов тонн нанороботов (!) и 40 триллионов лет. После этого тематику про угрожающую всем «серую слизь» из взбесившихся нанороботов можно автоматически закрыть. Правда, остается еще реально существующая «зеленая слизь» (вирусы) и реальные работающие на протяжении всей нашей жизни миллиарды миллиардов молекулярных машин внутри каждого из нас (Рис.3).



*Рис.4. Нанотехнологический менталитет ученых из разных областей знаний*

Малость размеров требует широты подходов (Рис.4). В области нанотехнологий «сплав наук», или междисциплинарность, означает не скольжение по поверхности, а использование систематических и глубоких знаний. И воспитать такого специалиста очень и очень сложно, его уже не назовешь одноклассником и он не будет, по меткому замечанию Козьмы Пруткина

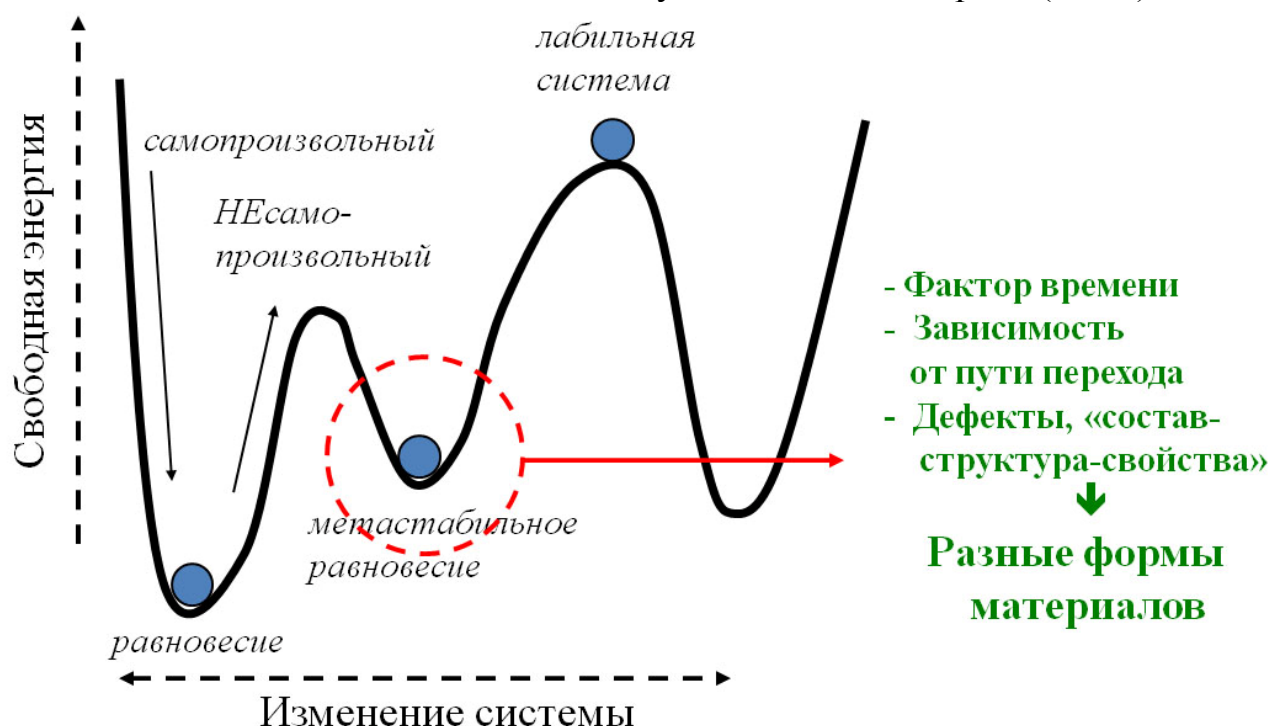
«подобен флюсу». Тем не менее, разница в менталитете исследователей из разных областей все еще остается. Для физика, исследующего в наном мире квантовые эффекты и «эффекты близости», главное – измерить и смоделировать. Для химика, считающего нанохимию новым воплощением химии, важными являются слабые химические взаимодействия на нанодиапазоне и «оборванные связи» на поверхности. Для биолога, который знает, что мы сами состоим из огромного количества наномашин, главное – правильное описание и классификация всего сущего.



**Рис.5.** Морфология различных нанообъектов, имеющих один и тот же химический состав  $\text{TiO}_2$ , но различные области применения – химические источники тока (нановискеры, аэрогели), сорбенты и фотокатализаторы (наночастицы, мезопористые производные, аэрогели) и пр. (фотография – ФНМ МГУ)

Кстати, именно состояние поверхности, которой у ультрадисперсных частиц «очень много» (до половины атомов у сферических наночастиц диаметром 5 нм находятся не в «объеме», а на поверхности, то есть не имеют «насыщенной», нормальной координации!) предопределяет богатейшую морфологию нанообъектов - совокупную характеристику, включающую в себя размер, форму и их пространственную организацию (агрегатную структуру). Морфологическое многообразие является «визитной» карточкой эстетически прекрасного наномира (Рис.5). Морфология наноструктур может существенным образом различаться в зависимости от состава материала, его

кристаллической структуры и способа получения. В рамках одного или нескольких методов синтеза можно получить наночастицы различных форм (сферической, стержневой, трубчатой, игольчатой, кубической, октаэдрической и т.д.) и размеров. Варьирование морфологии является действенным способом контроля функциональных (физических и химических) характеристик наноматериалов, а также влияет на их биосовместимость, поскольку является по сути отражением результата эволюции поверхности в процессе получения материала. Большинство наноматериалов не является термодинамически стабильными, поэтому неравновесная (отличная от формы монокристалла данного вещества) морфология является отражением метастабильности наноматериалов, то есть нахождения системы в локальном минимуме свободной энергии (Рис.6).



**Рис.6.** Иллюстрация принципа минимума свободной энергии (энергии Гиббса системы). Равновесное состояние отвечает «мертвому», неизменному во времени состоянию, в то время как большинство обычных получаемых образцов находятся в локальных минимумах «метастабильных» равновесий, достижение того или иного из которых зависит от предыстории получения образца, в то время как равновесное состояние единственно и не зависит от пути перехода от реагентов к продуктам (предсказывается функцией состояния системы и ее термодинамическими характеристиками).

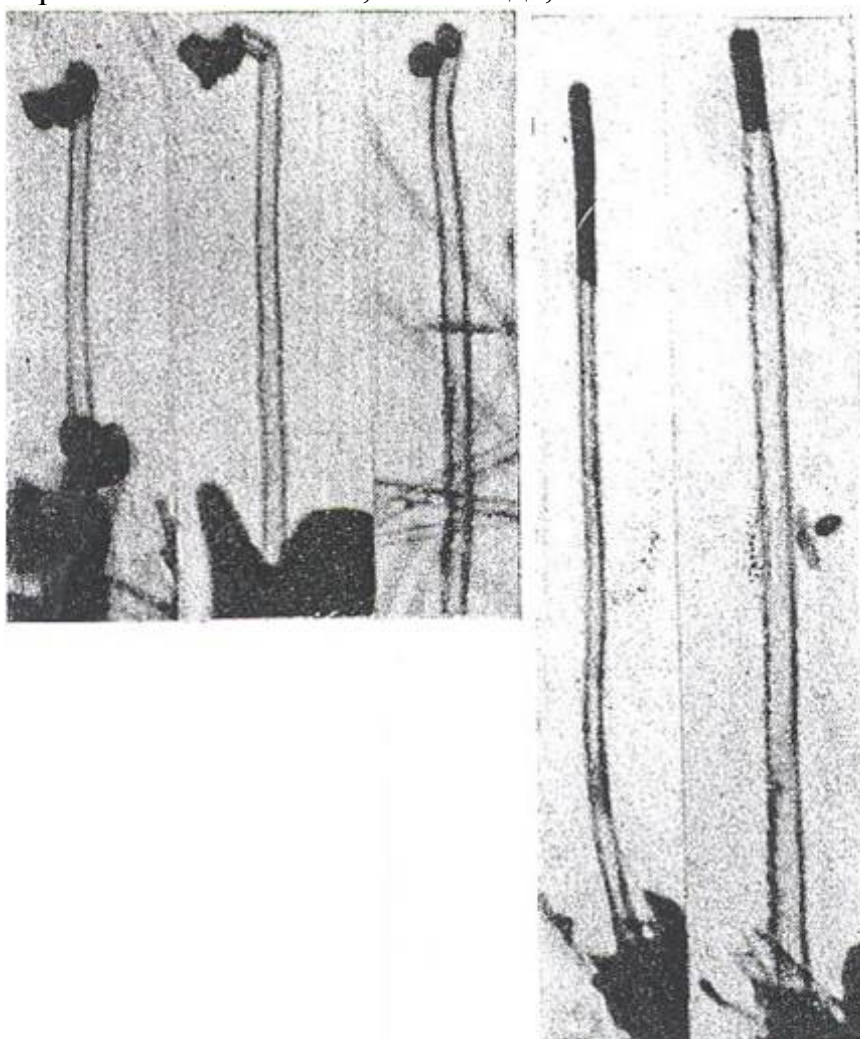
### Двойные стандарты

Однажды, в студеную зимнюю пору, а именно 29 декабря 1959 г. всемирно известный ученый, лауреат Нобелевской премии по физике Ричард Фейнман прочитал в Калифорнийском университете свою знаменитую рождественскую лекцию, из которой большинству известна только крылатая фраза «Там, внизу, много места». С этого короткого слогана последователи отца нанотехнологий начали их рекламу (вспомнив о лекции в нужный момент). Не умаляя несколько огромные заслуги Ричарда Фейнмана как

гениального физика и не менее гениального популяризатора науки, стоит отметить только, что в то время нанотехнологии еще не были даже термином, хотя идеей уже были. Сам термин «нанотехнология» был предложен Норио Танигучи в 1974 г. В 1986 г. вышла книга Э.Дрекслера «Машины созидания: наступление нанотехнологической эпохи», в которой сознание неподготовленного читателя поражали нанороботы, запрограммированные на самовоспроизводство, которые были способны переработать всю доступную им материю и биомассу и стремительно превратить окружающий мир в «серую слизь» (Grey Goo). Примечательно, что в этом урожайном году в лабораториях IBM (Цюрих) открыли высокотемпературную сверхпроводимость (ну, это к слову), а Герд Биннинг и Хайнрих Роер (оттуда же) заслуженно получили Нобелевскую премию за созданный ими в 1981 г. первый туннельный микроскоп. Считается, что будущая благодатная судьба нанотехнологий была предопределена не только этими событиями, а также наблюдением проф. Ииджимы (статья в Nature, 1991 г.) коаксиальных многостенных углеродных нанотрубок, найденных в черном остатке – продукте дугового разряда между графитовыми электродами. Довершило дело, видимо, открытие в саже фуллеренов – удивительных полициклических структур сферической формы, состоящих из атомов углерода, связанных в шести- и пятичленные циклы, фактически новая, молекулярная, модификация углерода. Нобелевская премия по химии за него была дана в 1996 г. замечательным исследователям Ричардом Смолли, Робертом Керлом и Харолдом Крото. И фуллерен, и нанотрубки по сей день остаются интереснейшими материалами, которым прочат блестящие применения во многих областях – от наноэлектроники до медицины.

... Все это - существенно рафинированная краткая каноническая история нанотехнологий, пришедшая к нам с Запада, передающаяся именно в такой догматической версии из уст в уста, в том числе и у нас в стране. Однако стоит заметить, что первоначально возможность существования структуры, состоящей из 60 углеродных атомов ( $C_{60}$ -фуллерена), была обоснована теоретически в СССР (Д.А. Бочвар, Е.Н. Гальперин, 1978 г.). И в принципе, «...в России основы нанотехнологии были заложены задолго до возникновения этого понятия. В 1952 г. сотрудниками нашего института Л.В. Радушкевичем и В.М. Лукьяновичем была опубликована статья «О структуре углерода, образующегося при термическом разложении окиси углерода на железном контакте» (Журнал физической химии. 1952. Т.26, № 1. С. 88-95). В выводах своей работы авторы писали: «При исследовании структуры сажи, полученной из окиси углерода на железных контактах, было обнаружено, что сажа состоит из частиц сложного строения. Большинство частиц имеет вытянутую червеобразную форму с характерными окончаниями, свидетельствующими о направленности роста» (из интервью директора ИФХЭ РАН академика А.Ю.Цивадзе portalу Нанометр, [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)). Таким образом, фуллерены были открыты на кончике пера примерно за 20 лет, а углеродные нанотрубки – символ нанотехнологий – были получены

примерно за 40 лет до своего официального рождения (Рис.7). Этого западная история нанотехнологий, как всегда, «не помнит».



*Рис.7. Фотография углеродных нанотрубок из работы Л.В. Радушкевича и В.М. Лукьяновича (1952! г.)*

Простые рассуждения приводят к извечному вопросу, есть ли пророки в родном Отечестве, в данном случае - в области нанотехнологий. Почему только Фейнман, Дрекслер и другие зарубежные коллеги должны у всех ассоциироваться со становлением нанотехнологий? А были ли они первыми и главными с нашей, выгодной не Западу или Востоку, а нам, исторической точки зрения? Конечно, о работах российских ученых порой мало знают зарубежом, и мы сами обычно в этом виноваты, но разве это отменяет «историческую справедливость», которая, кстати, совсем не спешит восстанавливаться, например, в случае углеродных нанотрубок. Наверное, не так уж и важно, кто начал нанотехнологическую гонку, гораздо важнее, чем она в разных странах закончится. И вот здесь очень важно сказать молодым дарованиям, которые и будут развивать нанотехнологии, что их корни – не только в американских деньгах и пресловутых нанороботах, а и в фундаментальной науке тоже, которая успешно развивалась (и продолжает

развиваться) в их родном государстве. Собственно, не надо ничего выдумывать, просто надо сказать о том, что было (Рис.8).



*Рис.8. ...Лишь некоторые из замечательной плеяды отечественных ученых, ковавшие нанотехнологии тогда, когда они еще так совсем не назывались.*

Можно предлагать много версий того, какие российские школы (или, конечно, шире, школы СССР) внесли наиболее существенный вклад в развитие нанотехнологий в нашей стране. Это зависит не только от точки зрения, но и от научной специализации авторов подобных предположений. Именно поэтому просто приведем несколько очевидных примеров, которые, как мы надеемся, могли бы дать ход процессу «нанотехнологического самосознания». Они касаются трех почти вечных областей, трансформировавшихся в ветви нанотехнологической науки и практики – полимеров, коллоидной химии и ультрадисперсных металлических сплавов.

Академик В.А.Каргин сыграл огромную роль в становлении науки о полимерах как интегрированной области знания. Исследования механических свойств полимеров привели В.А. Каргина к принципиально важным выводам о природе их физических и фазовых состояний. Идея о связи надмолекулярной структуры с физико-механическими свойствами

полимера, высказанная в середине 1950-х годов, в дальнейшем получила многочисленные экспериментальные подтверждения.

Академик П.А.Ребиндер – один из крупнейших физико-химиков. Еще студентом он начал систематическую научную работу в области поверхностных явлений. После VI Съезда физиков в Казани (1928 г.), на котором П.А.Ребиндер впервые сделал доклад об открытом им эффекте адсорбционного понижения прочности, работы ученого приобретают всесоюзную и мировую известность. Научная деятельность П.А.Ребиндера охватывает широкий круг проблем, составляющих содержание современной коллоидной химии как физико-химии дисперсных систем и поверхностных явлений. В своих первых работах (с 1922 г.) П.А.Ребиндер исследовал особенности водных растворов ПАВ. Измерения поверхностного натяжения этих растворов позволили установить аномалии в его зависимости от температуры, выяснить строение и кинетику образования адсорбционных слоев ПАВ. Исследования П.А.Ребиндера в области адсорбции из растворов ПАВ, явлений смачивания и моющего действия, стабилизации дисперсных систем и структурообразования в них, процессов диспергирования твердых тел и управления их прочностью закрепили связь коллоидной химии с молекулярной физикой, физикой твердого тела и механикой материалов. Эти работы открыли новые, весьма эффективные, пути управления механическими свойствами материалов и процессами их обработки.

Основные работы академика Б.В.Дерягина были посвящены исследованию поверхностных явлений. Он развил термодинамику систем с учетом введенного им понятия расклинивающего давления тонких прослоек, что позволило ему создать теорию коагуляции и гетерокоагуляции коллоидных и дисперсных систем. Вместе с Л. Д. Ландау создал в 1928 г. теорию устойчивости лиофобных коллоидов, известную как ДЛФО (теория устойчивости дисперсных систем Дерягина—Ландау—Фервея—Овербека). В процессе исследований он обнаружил особые свойства граничных слоев жидкостей, определяемые их специфической (анизотропной) структурой, развил теории термоосмоса и капиллярного осмоса в жидкостях, термофореза и диффузиофореза аэрозольных частиц.

Академик И.В.Тананаев - крупнейший ученый нашей страны в области неорганической химии, химии редких и рассеянных элементов, аналитической химии и физико-химического анализа. Одним из важных предложений, высказанных им, является введение понятия о новой «координате» дисперсности, определяющей поведение, а также термодинамические свойства ультрадисперсных систем, что подтверждается многочисленными современными исследованиями. Так, одна из важнейших характеристик наносистем – площадь и состояние их поверхности, без этого часто невозможно адекватно рассматривать их поведение и эволюцию во времени.

Член-корреспондент РАН В.Б.Алесковский стоял у истоков становления химии твердого тела в нашей стране. Основной областью его

научных интересов было изучение природы и химических превращений твердых веществ и разработка технологии создания новых неорганических материалов. Широко известны его работы по созданию (в 60-х годах) по некоторой аналогии с репликацией ДНК процесса химической сборки (ХС) и одновременно метода синтеза твердых соединений воспроизводимого состава методом молекулярного наслаивания. Этот метод получил развитие за рубежом спустя 20 лет и стал известен под названием атомной послойной эпитаксии (ALE). В настоящее время он является одним из основных методов синтеза наноматериалов для микроэлектроники. В.Б.Алесковским разработана концепция химии надмолекулярных соединений (начало 90-х годов), переработанная затем при учете собственных данных и данных супрамолекулярной химии (Ж.-М-Лен, 1989) и приведшая к созданию концепции химии высокоорганизованных веществ (1993).

И.Д.Морохов активно участвовал в Атомном проекте СССР и явился одним из авторов выдающихся научных и инженерных разработок в области ультрадисперсных металлических сплавов. Характерной физико-химической особенностью частиц нанометрового размера (менее 100 нм) является повышение их энергонасыщенности по сравнению с массивными образцами, что обусловлено соизмеримостью поверхностных и объемных характеристик наночастиц, и связано с изменением трансляционной симметрии кристаллической решетки, зонной структуры и других параметров вещества наночастиц. Одновременно наблюдается значительное увеличение реакционной способности таких частиц. В этой связи вопросы сохранения наночастиц как объектов, позволяющих их практическое использование с целью получения материалов с новыми характеристиками и свойствами, приобретают большое значение.

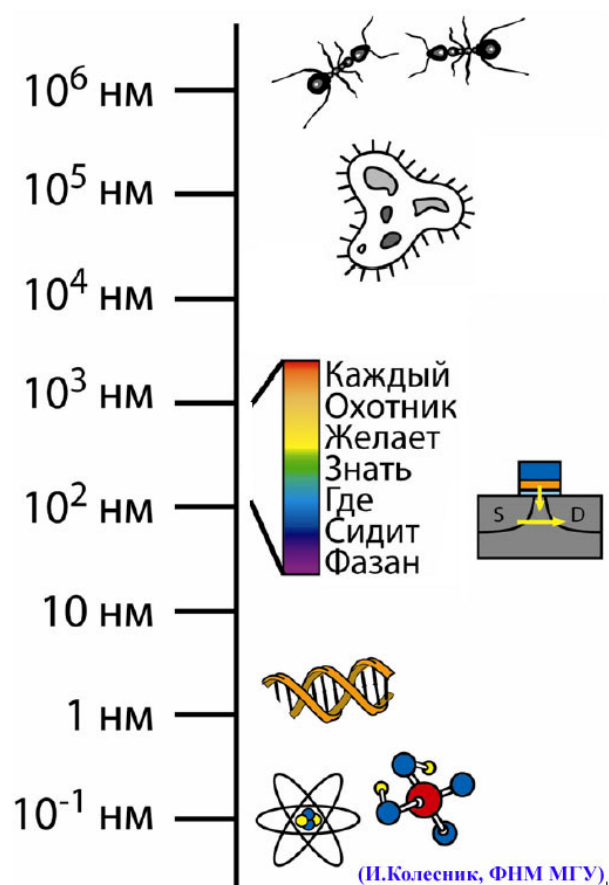
До момента присуждения Ж.И.Алфёрову Нобелевской премии российским ученым принадлежало всего восемь Нобелевских премий (Николай Семёнов – премия по химии за 1956 г.; Илья Франк, Игорь Тамм, Павел Черенков – премия по физике за 1958 г.; Лев Ландау – 1962 г.; Александр Прохоров, Николай Басов – 1964 г.; Петр Капица – 1978 г.). При участии Ж.И.Алфёрова были разработаны первые отечественные транзисторы и силовые германиевые приборы. В те годы была высказана идея использования в полупроводниковой технике гетеропереходов. Создание совершенных структур на их основе могло привести к качественному скачку в физике и технике. В основу технологических исследований им были положены эпитаксиальные методы, позволяющие управлять такими фундаментальными параметрами полупроводника, как ширина запрещенной зоны, величина электронного сродства, эффективная масса носителей тока, показатель преломления и т.д. внутри единого монокристалла. Открытие Ж.И. Алфёровым идеальных гетеропереходов и новых физических явлений – «суперинжекции», электронного и оптического ограничения в гетероструктурах – позволило также кардинально улучшить параметры большинства известных полупроводниковых приборов и создать

принципиально новые, особенно перспективные для применения в оптической и квантовой электронике. С использованием разработанной Ж.И. Алфёровым в 70-х годах технологии высокоэффективных, радиационностойких солнечных элементов на основе AlGaAs/GaAs гетероструктур в России (впервые в мире) было организовано крупномасштабное производство гетероструктурных солнечных элементов для космических батарей. Одна из них, установленная в 1986 году на космической станции «Мир», проработала на орбите весь срок эксплуатации без существенного снижения мощности. В начале 90-х годов одним из основных направлений работ, проводимых под руководством Ж.И. Алфёрова, становится получение и исследование свойств наноструктур пониженной размерности: квантовых проволок и квантовых точек. В 1993...1994 годах впервые в мире реализуются гетеролазеры на основе структур с квантовыми точками – «искусственными атомами». Таким образом, исследования Ж.И. Алфёрова заложили основы принципиально новой электроники на основе гетероструктур с очень широким диапазоном применения, известной сегодня как «зонная инженерия». На рубеже нового тысячелетия академику Ж.И.Алфёрову была присуждена Нобелевская премия.

... и это только несколько примеров. Таких разных. И таких общих в своей фундаментальной значимости и стремлении к постижению тайн материи, в том числе и на нанометровом уровне...

### **Терминология на страже нанозволюции**

Один нанометр - это очень маленькая величина, увидеть невооруженным глазом объекты такого размера невозможно (на самом деле можно, если только они светятся). Для сравнения заметим, что волосы человека растут со скоростью 10 нм в секунду (а мы этого не замечаем!), а толщина одного волоска составляет огромную величину - почти 100 тысяч нанометров или 100 микрон. Наноразмерный масштаб (Рис.9) используют для характеристики самых маленьких объектов, например, атомов и молекул. Размер атома кремния составляет 0.24 нм, а молекулы «фуллерена» C<sub>60</sub> (“футбольного мяча”, состоящего из шестидесяти атомов углерода) – 0.75 нм. К представителям наномира также можно отнести кластеры, способные содержать до нескольких сотен атомов, и различного рода «наноструктуры», размер которых хотя бы в одном из измерений не превышает нескольких десятков нанометров. Нанометры являются привычными единицами для описания длины волн света. Например, видимый свет имеет длины волн в диапазоне от 400 до 700 нм. В нанометрах измеряют также размеры микроорганизмов, клеток и их частей, биомолекул.



**Рис.9.** Пространственная шкала масштабов

Вот лишь некоторые примеры:

- Диаметр спирали ДНК человека – 2 нм;
- Длина одного витка ДНК – 3.4 нм;
- Молекула гемоглобина – 6.4 нм;
- Пиконановирусы – 20 нм;
- Молекула гемоцианина – 50 нм;
- Бактерии *Mycoplasma mycoides* 100-250 нм;
- Мимовирусы – 500 нм
- Эритроциты человека – 8000 нм (уже 8 микрон);

«Нано» - короткий, но очень интересный, отрезок «пятого измерения», его принципиальная важность заключается в том, что на этом кусочке пространственной шкалы реализуются особые химические и физические взаимодействия. В действительности любые объекты и материалы можно и нужно изучать на разных пространственных масштабах, особенности структуры и свойств материалов на которых лишь в неразрывной совокупности определяют его конечные свойства, важные для фундаментальных исследований и, конечно, практики. Кроме макроуровня (объект в целом) и атомарного уровня (определяющие, фундаментальные характеристики вещества), обычно выделяют масштабный уровень "микро" (характерный размер - микроны, то есть тысячные доли миллиметра),

который задает так называемые "структурно-чувствительные" свойства материала, зависящие, например, от размера зерен керамики. Большую роль часто играет и субмикронный масштаб. Что касается "нано", IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry, Международный союз чистой и прикладной химии) установил, что если хотя бы по одному измерению размер объекта меньше 100 нм (0,1 мкм), то мы говорим о наносистеме - это и есть уровень наномасштабов. Логичнее было бы определить, что "настоящее нано" начинается с момента появления наноэффектов - изменений физических свойств веществ, связанных с переходом к этим масштабам. Таким образом, в конечном счете, для создания наноматериалов оказывается важным не только их состав (определяющий основные свойства), размер ("модифицирующий" свойства), но и "размерность" (делающая частицы анизомерными) и упорядочение в системе (усиление, "интеграция" свойств в ансамбле нанообъектов). Это характерно для нанотехнологий - новое качество, как правило, получается только при правильно организованной структуре на более крупных масштабах, чем нано (Рис.10).

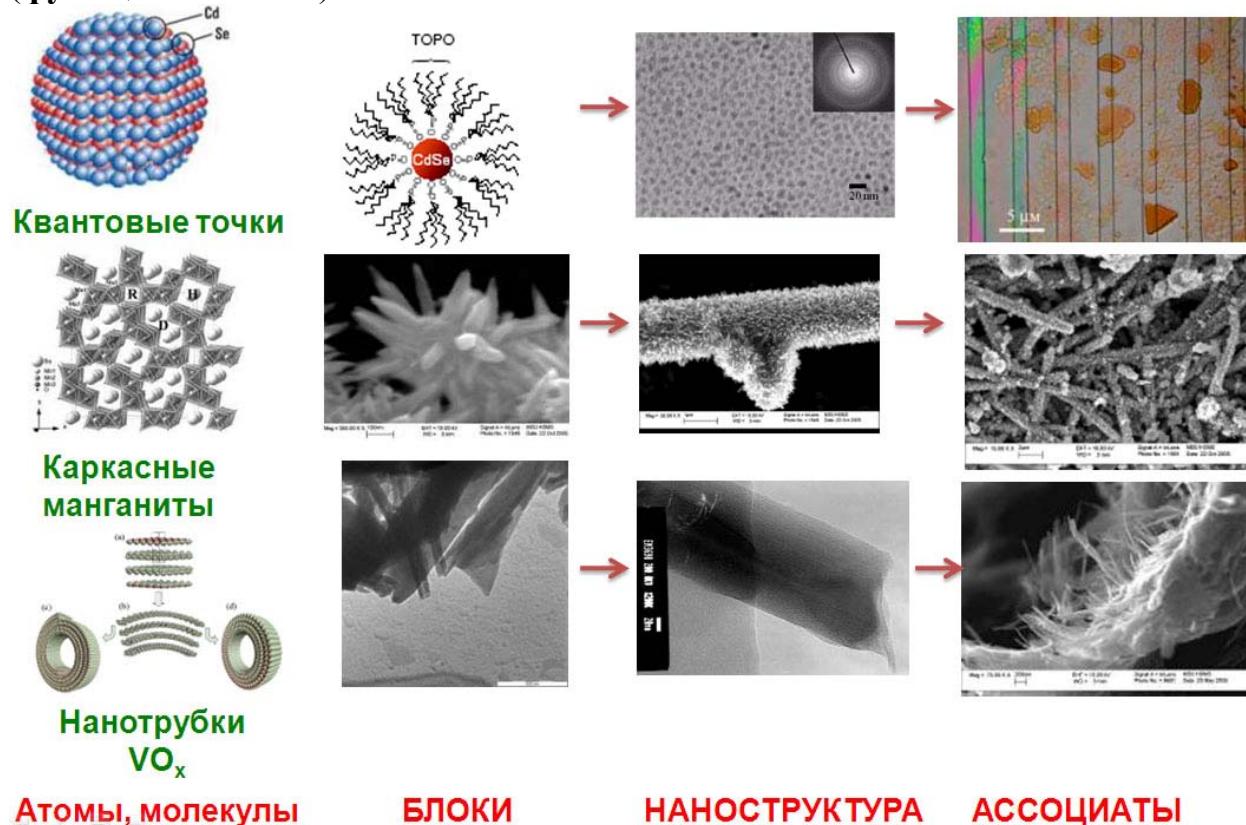


*Рис.10. Факторы, определяющие функциональные свойства наноструктурированных материалов*

Таким образом, «**нанодиапазон**» – участок пространственной шкалы 1 – 100 нм, в котором реализуются основные взаимодействия в **наносистемах** и который ограничивает сверху и снизу геометрические размеры **нанообъектов** по одному или нескольким измерениям. При этом принято

говорить, что вещество находится в «наносостоянии», если проявляются свойства, отличные от химических, физических или биологических свойств макросостояния (объемного состояния) вещества. Объекты, все размеры которых меньше 1 нм, относятся к области деятельности того или иного *классического* раздела химии, физики и пр. Объекты, все размеры которых больше 100 нм, относятся к микро и макрообъектам и рассматриваются, в лучшем случае, как дисперсные системы, не проявляющие особенности наносостояния.

«**Нанотехнологии**» – совокупность химических, физических или искусственных биологических процессов, позволяющих контролируемо оперировать с нанообъектами, формирующими те или иные материалы, устройства или технические системы. Особенностью нанотехнологий является широкое использование процессов самоорганизации, самосборки и темплатного синтеза, которые могут в сложно организованной системе привести к формированию необходимых упорядоченных структур (**наноструктур**), проявляющих требуемые практически важные (**функциональные**) свойства.



**Рис.11.** Иерархия структурных уровней материалов (фотографии – ФНМ МГУ)

**Нanomатериалы (НМ)** – продукты нанотехнологий, материалы, практически-важные (функциональные) свойства которых определяются химическим составом, структурой, размером, размерностью и упорядочением составляющих их фрагментов, размер которых принадлежит нанодиапазону. Получение наноматериалов с уникальными свойствами, как

правило, основано на формировании тех или иных структур, причем часто - иерархических, полезные функции которых определяются не только наноуровнем, но также и другими уровнями структуры (Рис.11).

Существование наноматериалов закономерно и не подрывает никаких известных нам основ мироздания, просто пришло их время. Возникновение нанотехнологий "просто" означает качественный скачок в философии получения практически важных веществ - создание невидимых простым глазом сложных устройств и систем, размеры которых находятся в диапазоне размеров надмолекулярных образований. "Обычная" химия работает с молекулами и атомами, в этом уже давно нет ничего необычного. "Обычная" промышленность работает с тоннами и кубометрами, к этому тоже все привыкли. Наноматериалы - продукт нанотехнологий - это нечто особое, что гораздо сложнее атомов и молекул, но как продукт высоких технологий не требует обычно многотоннажного производства, поскольку даже один грамм такого "хайтековского" вещества способен решить множество проблем. Это - пример современной "гомеопатии", которая поставлена на вполне научную основу и глубоко продумана.

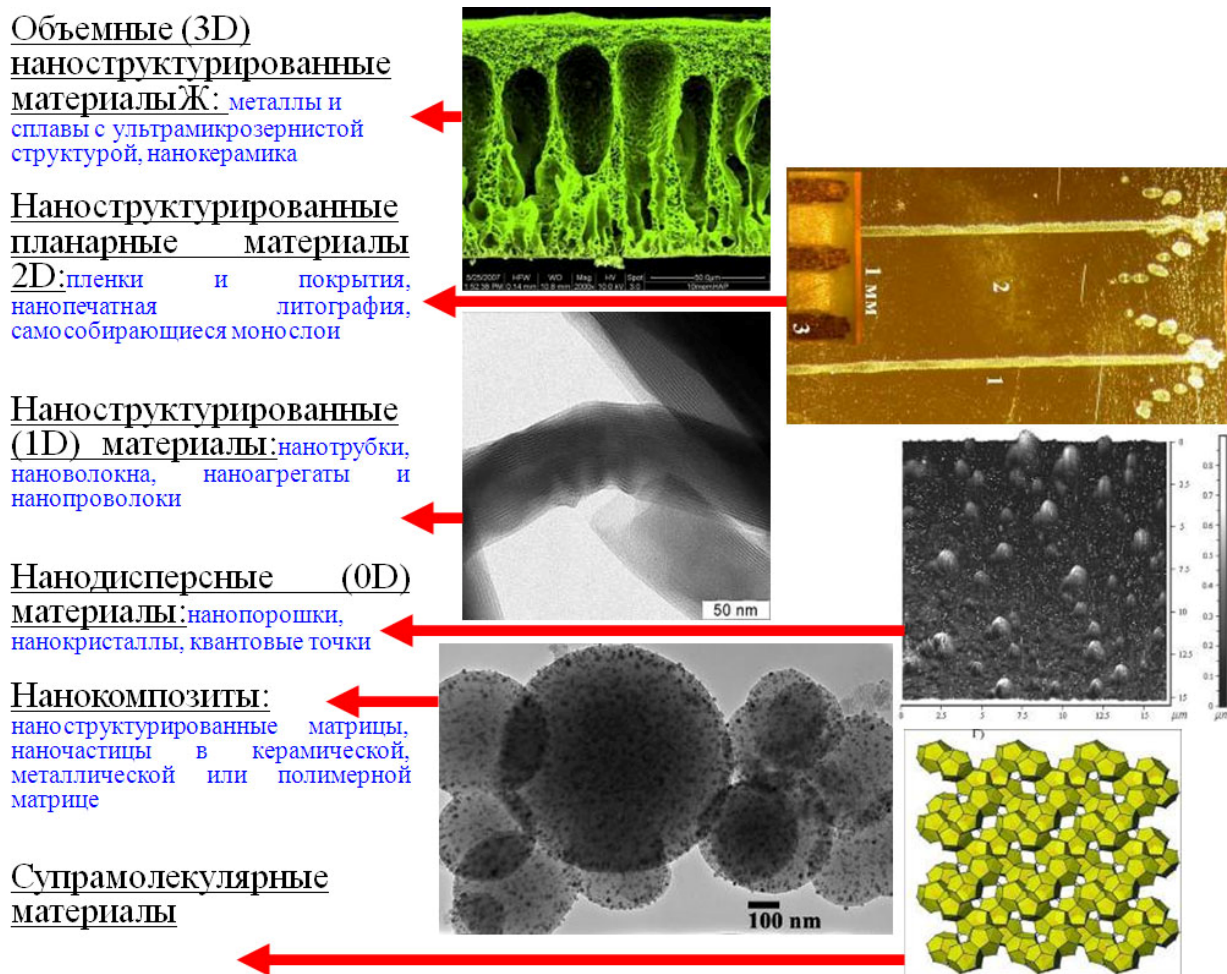
Наноматериалы - не один "универсальный" материал, это обширный класс множества различных материалов, объединяющий их различные семейства с практически интересными свойствами. Заблуждением является и то, что наноматериалы - это просто очень мелкие, "нано"частицы. На самом деле, многие наноматериалы являются не отдельными частицами, они могут представлять собой сложные микрообъекты, которые наноструктурированы на поверхности или в объеме. Такие наноструктуры можно рассматривать в качестве особого состояния вещества, так как свойства материалов, образованных с участием структурных элементов с наноразмерами, не идентичны свойствам объемного вещества. Существует несколько групп наноматериалов (Рис.12):

- Объемные (3D) наноструктурированные материалы, формируемые в результате термических, механических воздействий (металлы и сплавы с ультрамикрозернистой структурой, спинодальный распад в стеклообразных материалах или твердых растворах) или спекания предварительно компактируемых массивов наночастиц (нанокерамика).
- Наноструктурированные планарные материалы 2D, включая тонкие и толстые пленки и покрытия, продукты нанопечатной литографии и самособирающиеся монослои.
- Наноструктурированные (1D) — материалы, в том числе нанотрубки, нановолокна, наноагрегаты и нанопроволоки, формируемые из пересыщенных пара, раствора или в результате электрохимических процессов.
- Нанодисперсные (0D) материалы (нанопорошки, нанокристаллы, квантовые точки), получаемые в результате механического измельчения объемных объектов, путем кристаллизации пересыщенных систем (из пара, жидких фаз — водных и неводных растворов или расплавов), а также

нанокластеры, создаваемые самосборкой или стабилизируемые благодаря разнообразным темплатам.

- Наноккомпозиты, состоящие из мезопористой матрицы с 1D - каналами или 2D - слоями, заполненными нанофазой, или нановискеров, нанотрубок и наночастиц в полимерной, металлической или керамической матрице.

- Супрамолекулярные материалы, формируемые из более простых молекул с целью создания молекулярных устройств или машин, имитирующих биологические процессы в живых организмах.



*Рис.12. Примеры различных классов наноматериалов (фотография – ФНМ МГУ)*

Наноматериалы характеризуются несколькими основными чертами, делающих их вне конкуренции по сравнению с другими веществами, находящими практическое использование в деятельности человека.

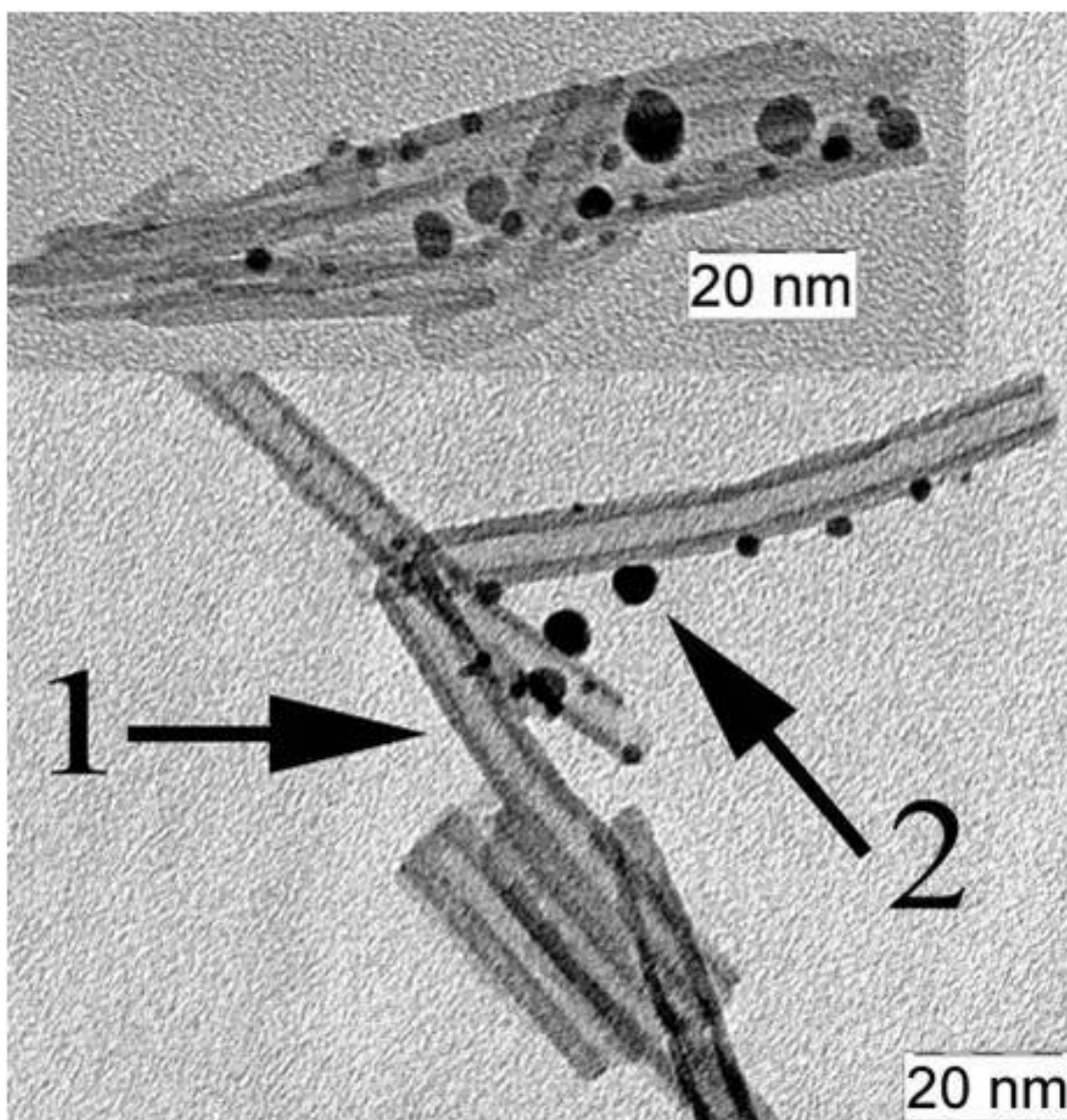
Во - первых, все наноматериалы действительно состоят из очень мелких частиц. Это первый плюс - суперминиатюризация, приводящая к тому, что на единице площади можно разместить больше функциональных наноустройств, что жизненно важно, скажем, для наноэлектроники или для достижения суперплотной магнитной записи информации до 10 Терабит на 1 квадратный сантиметр. Кроме того, ничтожный размер делает для

наноустройств доступным почти любые закоулки человеческого тела или части макромашин, в которые не проникнет ничто другое.

Во-вторых, наноматериалы обладают большой площадью поверхности, ускоряющей взаимодействие между ними и средой, в которую они помещены. Например, каталитически активные материалы позволяют в десятки тысячи и даже миллионы раз ускорить химические или биохимические реакции. Интересное применение - разложение воды для водородной энергетики на водород и кислород в присутствии наночастиц диоксида титана, который всем нам известен, как компонент титановых белил. Наночастицы позволяют отсеять бактерии или эффективно поглотить примеси или токсины. Наночастицы также могут "таскать" за собой необходимые лекарства или ферменты, программируемо доставляя их к заранее выбранной цели, например, раковой опухоли, а также при гипертермии (дозированном перегреве опухоли вплоть до гибели раковых клеток среди окружающих их нормальных тканей).

В - третьих, наноматериалы уникальны тем, что такое вещество находится в особом, "наноразмерном", состоянии. Изменения основных характеристик обусловлены не только малостью размеров, но и проявлением квантовомеханических эффектов при доминирующей роли поверхностей раздела. Эти эффекты наступают при таком критическом размере, который соизмерим с так называемым корреляционным радиусом того или иного физического явления (например, с длиной свободного пробега электронов, фононов, длиной когерентности в сверхпроводнике, размерами магнитного домена или зародыша твердой фазы и др.). Характерной особенностью наночастиц является также отсутствие точечных дефектов. Это делает, в частности, полупроводниковые наночастицы ("квантовые точки") идеальными элементами совершенных энергосберегающих лазерных и светоизлучающих элементов. А индивидуальные углеродные нанотрубки обладают прочностью, в десятки раз превышающей прочность лучшей стали, при этом они во много раз выигрывают у стали и по своей удельной массе. Все эти признаки вполне объясняют тот факт, что даже грамм наноматериала может быть более эффективен, чем тонна обычного вещества, и что их производство - вопрос не количества, не тонн или километров, а качества человеческой мысли, "ноу-хау" (от англ. know how - "знаю как", ср. с Рис.2).

Исследовательские работы последних 10-15 лет открыли важную роль нанотехнологий в различных областях науки и техники (информационных технологиях, медицине, физике, химии, материаловедении, биологии, экологии и т.д.). Разработка новых методов получения наноматериалов является современным приоритетным направлением развития химии, физики и даже биологии. Актуальность исследований в этой области связана, прежде всего, с тем, что формирование нанообъектов происходит, как правило, в рамках специфических закономерностей, не исследовавшихся ранее в классических разделах химической науки.



**Рис.13.** Наноккомпозит «нанотрубки – диоксида титана – наночастицы платины», проявляющий высокую каталитическую активность в дожиге токсичного монооксида углерода уже при комнатной температуре (фотография – ФНМ МГУ).

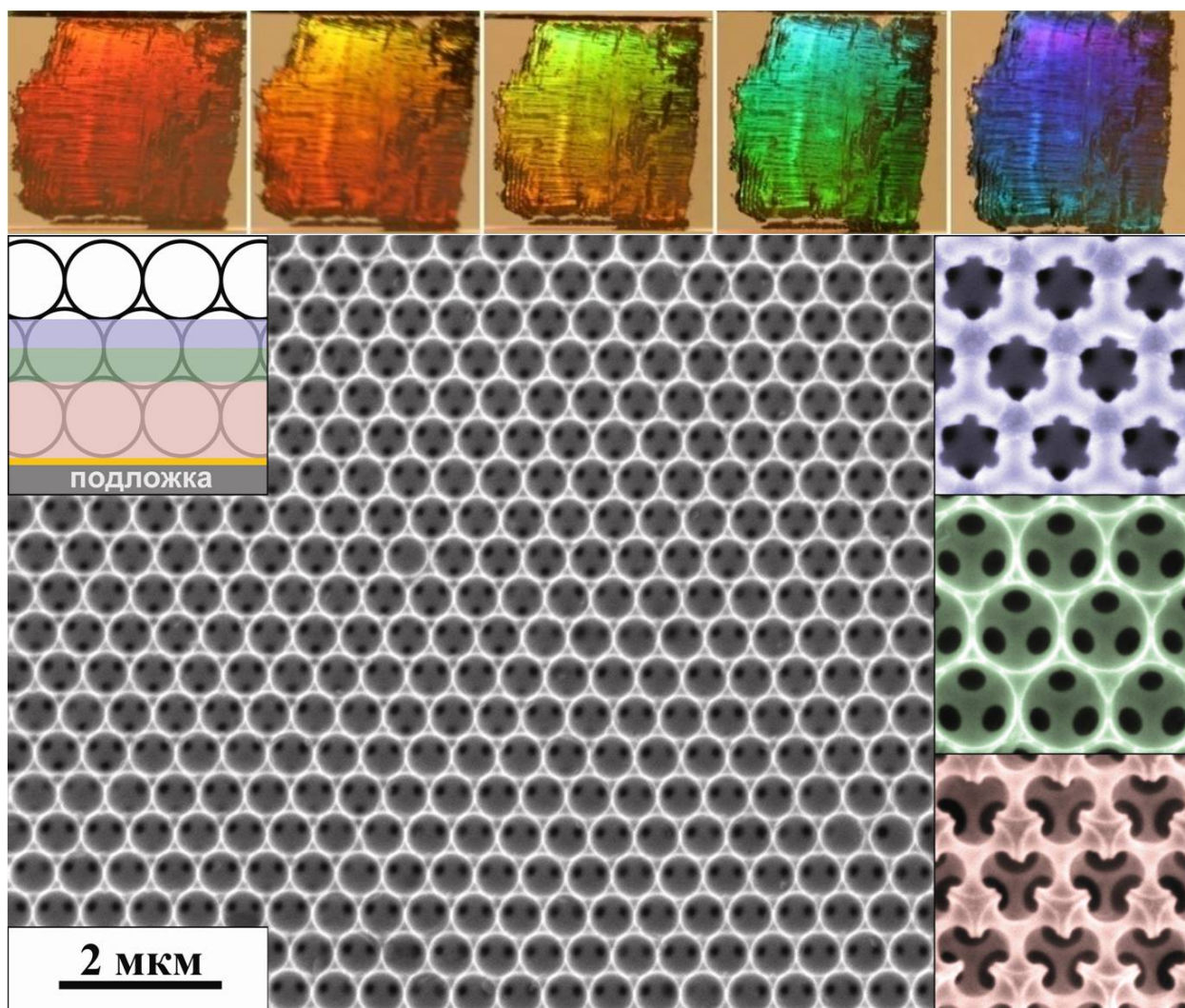
Один из типичных примеров необычных материалов – неуглеродные нанотрубки. Те, кто хоть иногда интересуется новостями науки, не могли пропустить громкие сообщения о синтезе и свойствах «углеродных нанотрубок». Значительно меньше известно о нанотрубках других неорганических соединений (Рис.13). А ведь они не менее интересны и перспективны! Одно только многообразие соединений, на основе которых образуются нанотрубки, заслуживает восхищения. Первые неуглеродные нанотрубки ( $\text{MoS}_2$  и  $\text{WS}_2$ ) были синтезированы в 1992 г. израильским ученым Р.Тенне. При химическом способе синтеза образование нанотрубок происходит в результате взаимодействия исходных веществ в водных или водно-органических средах, в твердой или газовой фазе, в результате термолитиза солей. «Темплатные методы» формирования нанотрубок заключаются в осаждении наночастиц на поверхности твердых веществ,

задающих определенную форму и размер нанопродукта, при этом роль темплата могут играть молекулы органических веществ. Например, модель образования нанотрубок  $\text{TiO}_2$  можно представить схемой  $3\text{D} \rightarrow 2\text{D} \rightarrow 1\text{D}$ . Трехмерный (3D) кристалл диоксида титана, реагируя с раствором щелочи  $\text{NaOH}$ , образует ламинарную двумерную (2D) структуру, которая изгибается, чтобы соединить ненасыщенные связи краевых атомов. При дальнейшем закручивании получается структура, представляющая собой либо нанотубулен (свиток), напоминающий рулон обоев, либо нанотрубку, образованную вставленными друг в друга концентрическими цилиндрами. Подобным же образом (при участии поверхностно-активных веществ-темплатов) происходит формирование нанотрубок других оксидных соединений, например оксида ванадия  $\text{V}_2\text{O}_5$ , проявляющих необычные каталитические, сенсорные, электрохимические свойства.

Естественным способом получения наноматериалов могут являться самосборка и самоорганизация. И в том, и в другом случае управляемый процесс формирования упорядоченных структур может быть реализован, например, за счет использования специально введенных темплатов – «шаблонов», способствующих формированию необходимых взаимодействий (из множества возможных) между элементами системы (не путать с нанороботами – ассемблерами!). Собирать наноматериалы поатомно никто никогда не будет. Это очень накладно, достаточно вспомнить пример с двумя фантастическими символами нанотехнологий – космическим лифтом и нанороботами, приводившийся выше.

Самосборка – процесс образования упорядоченной надмолекулярной структуры или среды, в котором в практически неизменном виде принимают участие только компоненты (элементы) исходной структуры, аддитивно составляющие или «собирающие», как части целого, результирующую сложную структуру. Возникновение упорядочения при самосборке контролируется, главным образом, конкуренцией различных сил взаимодействия, часто молекулярной природы, наподобие гидрофильных – гидрофобных взаимодействий, Ван-дер-Ваальсовых или дипольных взаимодействий.

Самоорганизация может быть использована как механизм создания сложных «шаблонов», процессов и структур на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, что наблюдался в исходной системе, за счет многочисленных и многовариантных взаимодействий компонент на низких уровнях, на которых существуют свои, локальные, законы взаимодействия, отличные от коллективных законов поведения самой упорядочивающейся системы. Для процессов самоорганизации характерны различные по масштабу энергий взаимодействия, а также существование ограничений степеней свободы системы на нескольких различных уровнях ее организации.



**Рис.14.** Основной элемент фотоники – фотонные кристаллы. На фотографии представлен послойный рост инвертированного фотонного кристалла при контролируемом электрохимическом осаждении металлов при использовании в качестве темплата фотоннокристаллической пленки, полученной на проводящей подложке самосборкой монодисперсных полистирольных микросфер с помощью движения мениска (фотография – Н.А.Саполетова, К.Напольский, ФНМ МГУ)

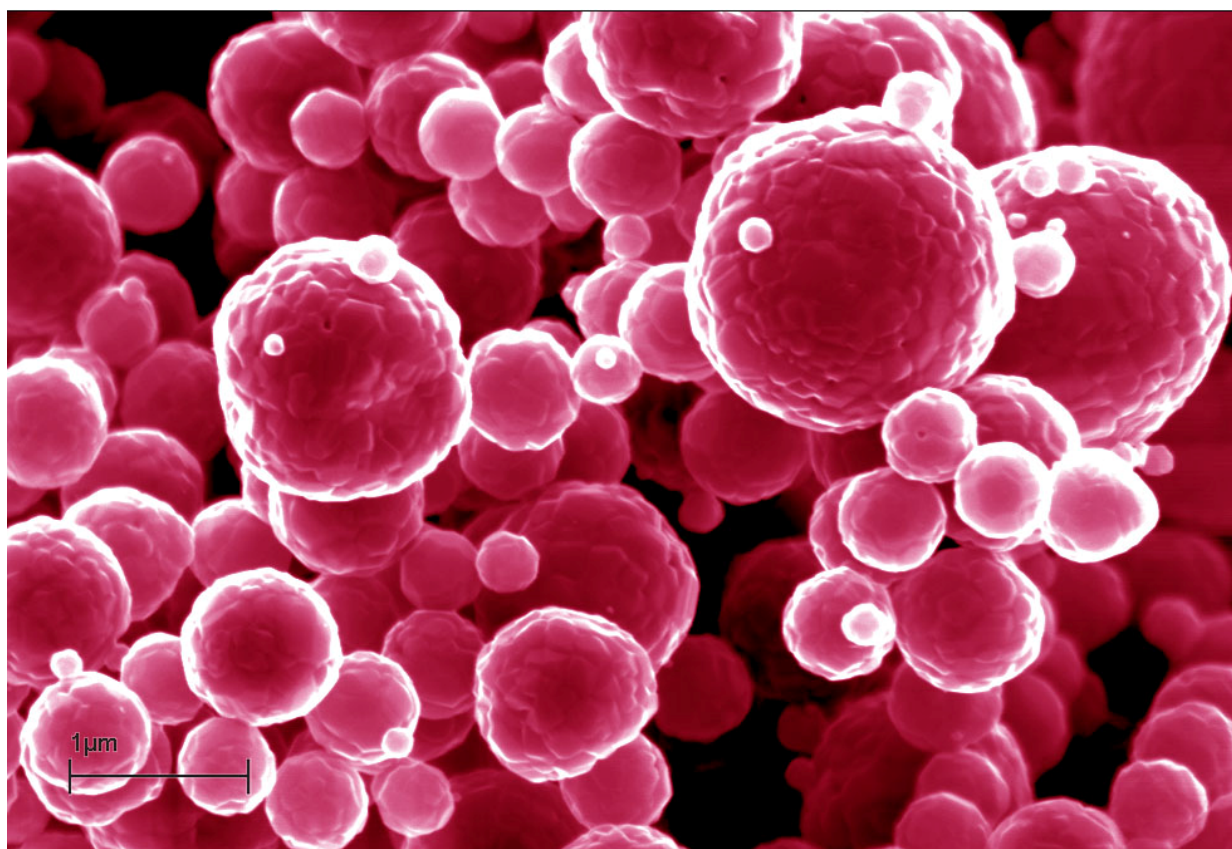
Например, рост совершенных монокристаллов и образование коллоидных (фотонных) кристаллов (Рис.14) следует считать процессами самосборки, поскольку такие системы стремятся и фактически достигают равновесного, неизменного и воспроизводимого состояния, которое достаточно легко можно предсказать на основе аддитивности взаимодействия отдельных составляющих частей исходной системы – атомов (молекул, ионов) или, скажем, коллоидных микросфер. С другой стороны, возникновение ячеистой структуры граней кристалла или формирование дендритов при неравновесной кристаллизации гомогенного расплава, образование сложных структур в жидких кристаллах под действием электрического поля, сложная доменная структура ферромагнетиков и сегнетоэлектриков, формирование периодических полос скольжения металлов и тяжей в полимерах при механической деформации – все эти

явления приводят к возникновению в неравновесных условиях неравновесных же микроструктур, не вполне точно пространственно воспроизводимых от эксперимента к эксперименту и значительно более сложных морфологически, чем те, которые можно было бы ожидать при простом взаимодействии компонент. В этом случае можно говорить о самоорганизации. Явления образования упорядоченных структур и самоорганизации происходят обычно как отклик сложной системы на сильное внешнее воздействие. В противном случае упорядочения может не возникнуть, поскольку чудес не бывает (кстати, это одна из самых коротких формулировок 2 закона термодинамики) и фундаментальные законы термодинамики приведут к тому, что беспорядок (в изолированной системе) будет только увеличиваться.



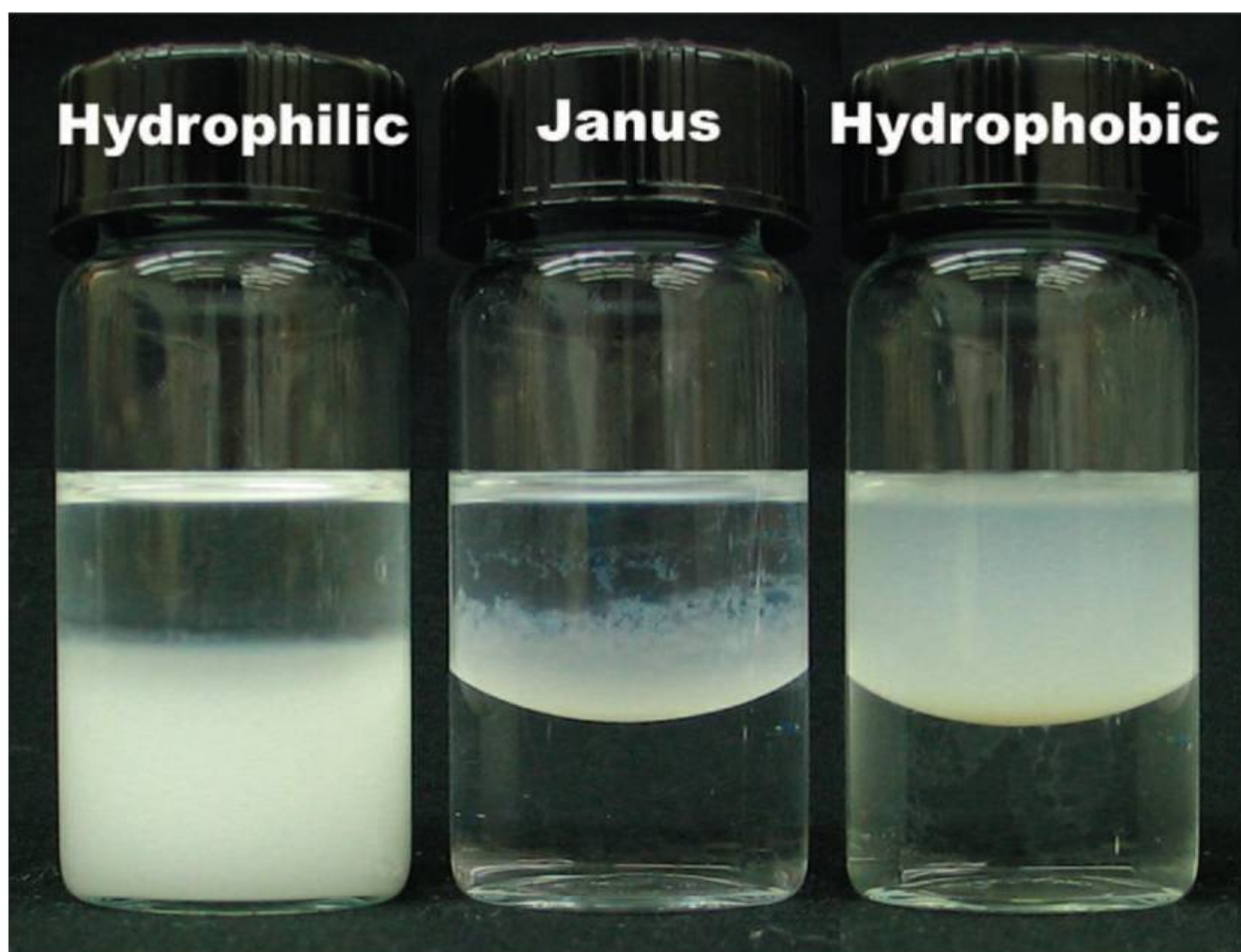
**Рис.15.** Лампа и новогодняя елочка с разноцветными гирляндами, использующими люминесценцию монодисперсных квантовых точек (Р.Б.Васильев, ФНМ МГУ)

Многие из вас, наверное, помнят игру в бильярд и укладку шаров в «пирамиду» – в замкнутом объеме шары сами складываются в равносторонний треугольник, причем одним способом. Если же их «насыпать» в большой ящик и немного потрясти, то они самопроизвольно образуют практически идеально упорядоченную структуру. В некоторых случаях атомы одного сорта также можно рассматривать в виде однородных по размеру шаров, которые аналогичным образом упорядочиваются в ограниченном объеме. В химии и кристаллографии даже существует термин «плотнейшая шаровая упаковка». Подобно атомарным ансамблям и макросферам сферические наночастицы способны спонтанно собираться в упорядоченные агрегаты (сверхрешетки). Основными причинами такого «слипания» наночастиц являются различные слабые силы, которые, в целом, стремятся уменьшить общую площадь поверхности наночастиц и, следовательно, их поверхностную энергию. Впервые упорядоченные массивы наночастиц золота диаметром  $\sim 4$  нм в оболочке алкилтиолов были получены в 1995 г. медленным упариванием растворителя, а двумя месяцами позже удалось «уложить» монодисперсные пятинанометровые частицы селенида кадмия. Чем однороднее были исходные наночастицы, тем «правильнее» становилась их упаковка в массиве.



**Рис.16.** «Наномалина» - полые микросферы литиевой феррошпинели состава  $\text{LiFe}_5\text{O}_8$ , состоящие из наночастиц, полученные методом пиролиза аэрозолей из растворов нитратов при температуре  $850^\circ\text{C}$  (гетерогенная система капель жидкости в паровой фазе – ультразвуковой «туман»)

На сегодняшний день синтезированы дву- и трехмерные организованные массивы самых разных нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, FePt, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, CoO, CdS, CdSe, CdTe, PbSe, сплавов Fe-Pt, Au-Ag, наноструктур “ядро в оболочке” CdS/CdSe, CdSe/CdTe (Рис.15), Pt/Fe, Pd/Ni, и т.д., стабилизированных поверхностно-активными веществами. Однородные по размеру наночастицы (Рис.15) можно “собрать” в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные “нитки”, двумерные плотно упакованные слои, трехмерные массивы или “малые” кластеры. Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы поверхностно-активного вещества и даже от дисперсионной среды. В настоящее время известны, конечно, и примеры того, как с помощью различных методов самосборки удавалось получать полезные упорядоченные структуры из микрочастиц. Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поле, капиллярные силы, игра на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы.

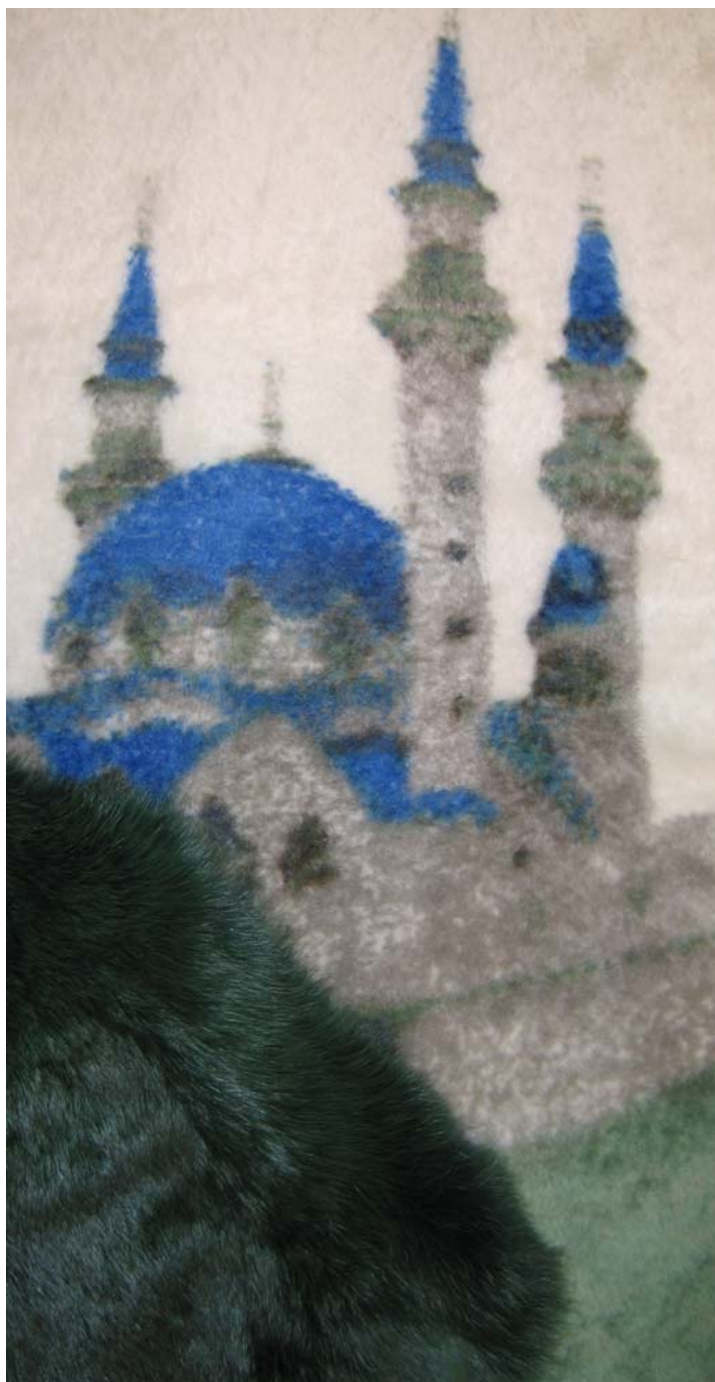


**Рис.17.** Амфифильные «частицы - янусы», полученные методом микроэмульсий, концентрируются на границе раздела вода – гептан (в центре, фото из журнала *Adv. Mater.*)

Отдельные наночастицы и наноструктурированные материалы получают за счет давно разработанных физических методов осаждения пленок и гетероструктур в глубоком вакууме, химического осаждения из паровой фазы, при использовании литографии (рентгеновской, «мягкой», микроконтактной печати, dip-реп-литографии, литографии с использованием фокусированных ионных пучков и др.), химических методов гомогенизации (криохимическая сушка, гидротермальная обработка, золь – гель метод, пиролиз аэрозолей), синтеза в микро- и нанореакторах (микроэмульсиях, межслоевом пространстве глин, слоистых двойных гидроксидов, мезопористых системах), за счет использования биологических систем и биомиметических подходов.

И один в поле воин, если это уникальный класс материалов, который представляет собой наночастицы с ярко выраженным пространственным градиентом функциональных свойств (электрических, магнитных, оптических, поверхностных)... "в рамках" самой частицы. Такие частицы (фактически нанокомпозиты) называют «двуликими» частицами или частицами – януса (Janus particles) в честь древнего бога Януса, у которого было два лица. Бифункциональные композитные наночастицы, названные именем Януса, характеризуются не только наличием анизотропии физических и / или физико-химических свойств, но и возможностью их самосборки в достаточно сложные иерархические структуры непосредственно в растворе и на гетерофазных границах раздела. Для частиц-янусов существует возможность дальнейшей химической модификации их отдельных частей, что резко расширяет область их практического использования, в том числе, в биологии и медицине – для доставки лекарств, медицинской визуализации пораженных органов, фотодинамической и магнитотермической терапии онкологических заболеваний и пр.

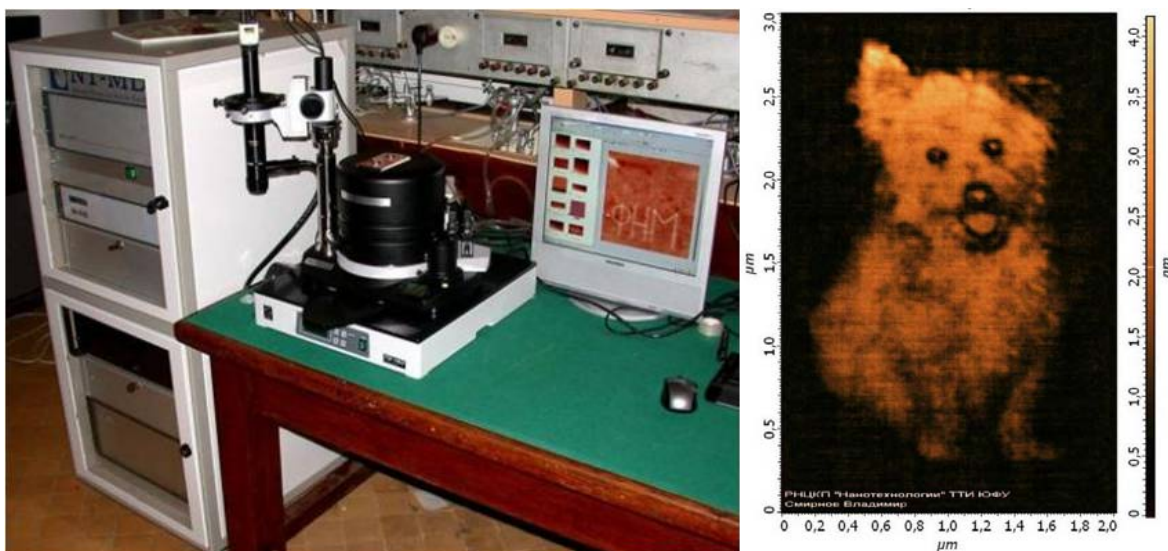
## Часть 2. Молодой мир нанотехнологий



- Вижу – значит, существует
- Практические нанотехнологии
- Образование и нанотехнологии

## Нанотехнологии на марше

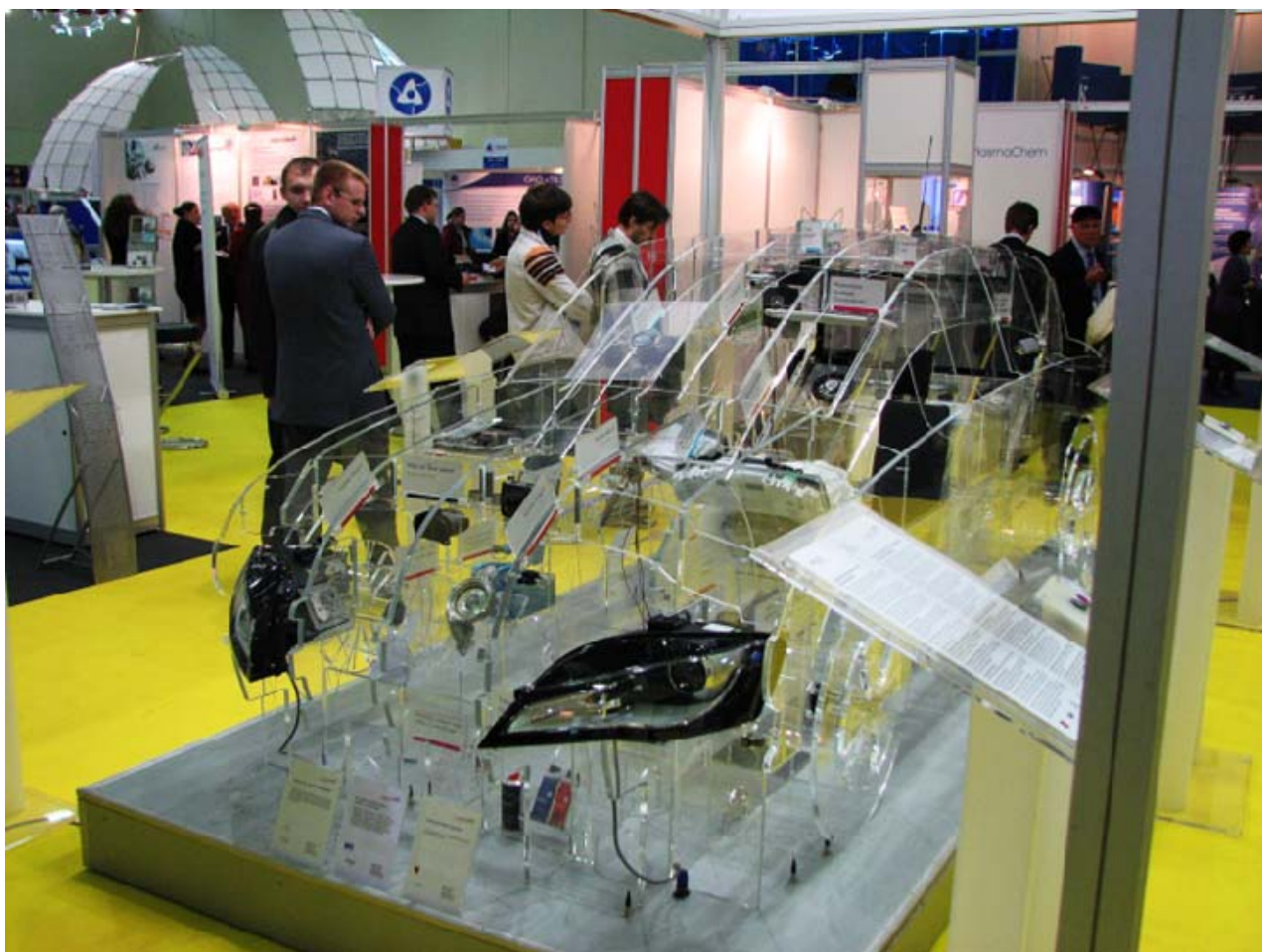
Будет ли прок от нанотехнологий? Основными причинами нанобума являлись появление принципиально новых методов диагностики наноразмерных объектов (современная электронная микроскопия, туннельная и атомно-силовая микроскопии), осознание того, что наноматериалы обладают специфическими магнитными, электрическими, оптическими и др. свойствами, связанными с проявлением квантовых эффектов, путь к миниатюризации технических устройств и огромной экономии ресурсов. Приведенные примеры показывают, что нанотехнологии – чрезвычайно сложная, профессиональная, междисциплинарная область, объединяющая на равных усилия дипломированных химиков, физиков, материаловедов, математиков, медиков, специалистов в области вычислительных методов и др. Лишь междисциплинарные коллективы способны обеспечить нанотехнологический «прорыв». В этой области удивительным образом переплетены как глубоко фундаментальные научные основы, так и революционные аспекты практического использования человеческих знаний. Нанотехнологии, являясь междисциплинарной и «прибороемкой» областью исследований, в отличие от обычных технологий принципиально отличаются повышенной "наукоемкостью" и затратностью, необходимостью высокоинтеллектуальной и экспертной деятельности, и поэтому в них резко снижена вероятность обычного пути решения проблем методом "проб и ошибок", который традиционно используется во многих прикладных разработках. Поэтому путь от лаборатории к nanoиндустрии, несомненно, является более сложным, чем при выходе на промышленное производство «обычных» продуктов.



**Рис.18.** Сканирующий зондовый микроскоп отечественного производства (слева, ФНМ МГУ) и продукт его использования – нанолитографическая картинка песика Кеши (ЮФУ, фото с сайта [www.nanometer.ru/](http://www.nanometer.ru/))

"Гагариным" микрокосмоса был изобретатель первой увеличительной линзы - Левенгук. В настоящий момент даже самые дорогие оптические

микроскопы, увы, для визуализации нанообъектов принципиально неприемлемы в силу своего малого разрешения, поскольку увеличение должно составлять не тысячу крат (для оптических микроскопов), а сотни тысяч и миллионы раз. Так, типичные нанообъекты в сотни и тысячи раз меньше бактерий, которые наблюдал Левенгук. Поэтому сейчас бороздить просторы микромира могут лишь те, кто обладает дорогим оборудованием - наисовременнейшими электронными и атомно-силовыми микроскопами (Рис.18), которые, в отличие от оптических микроскопов, стоят сотни тысяч и даже миллионы долларов. И даже этого мало - этим оборудованием нужно уметь профессионально пользоваться.



*Рис.19. «Стеклянный автомобиль» от немецких нанотехнологов.*

Наши западные коллеги гораздо спокойнее относятся к внедрению нанотехнологий в повседневную жизнь, если можно назвать продуктами высоких технологий то, что уже готово к такому внедрению. Так, на выставке в рамках Второго Международного форума РОСНАНО по нанотехнологиям были представлены многочисленные продукты бытового назначения – косметика, краски, крема, аэрозоли. В качестве учебно – образовательного экспоната был показан «стеклянный автомобиль», в котором были насквозь видны узлы и устройства, полученные с применением продуктов нанотехнологий (Рис.19).



*Рис.20. Алюминиевые болты компании Байер. Прочные, как сталь.*

Конечно, самыми востребованными продуктами нанотехнологий считаются в настоящий момент конструкционные материалы с необычными механическими свойствами. Именно они позволят, как считается, сделать истребитель пятого поколения (Всероссийский Институт Авиационных Материалов, Москва) и новые поколения современных подводных ракетноносцев (ФГУП «Прометей», Санкт - Петербург). Немцы делают из них автомобили. Так, фирма Байер, всемирно известная производством аспирина (хотя производят они очень много чего) на одной из выставок предложила делать гвозди и шестеренки важных узлов автомобиля ... из алюминия. Ну кто в здравом уме решится делать из мягкого и пластичного алюминия шестерни для нагруженных узлов автомобилей? Bayer! Их невзрачные металлические гайки, пруты, стержни, передаточные шестерни для автомобилей на самом деле являются настоящим продуктом высоких технологий. Потому что их алюминий с добавлением 5% углеродных нанотрубок, полученный методами порошковой металлургии, не только столь же легкий, как, естественно, сам алюминий, но и прочен, как сталь! Именно поэтому таким материалам можно заменять не только сталь, но и даже титан, который был (правда, пока все еще остается) королем конструкционных материалов.

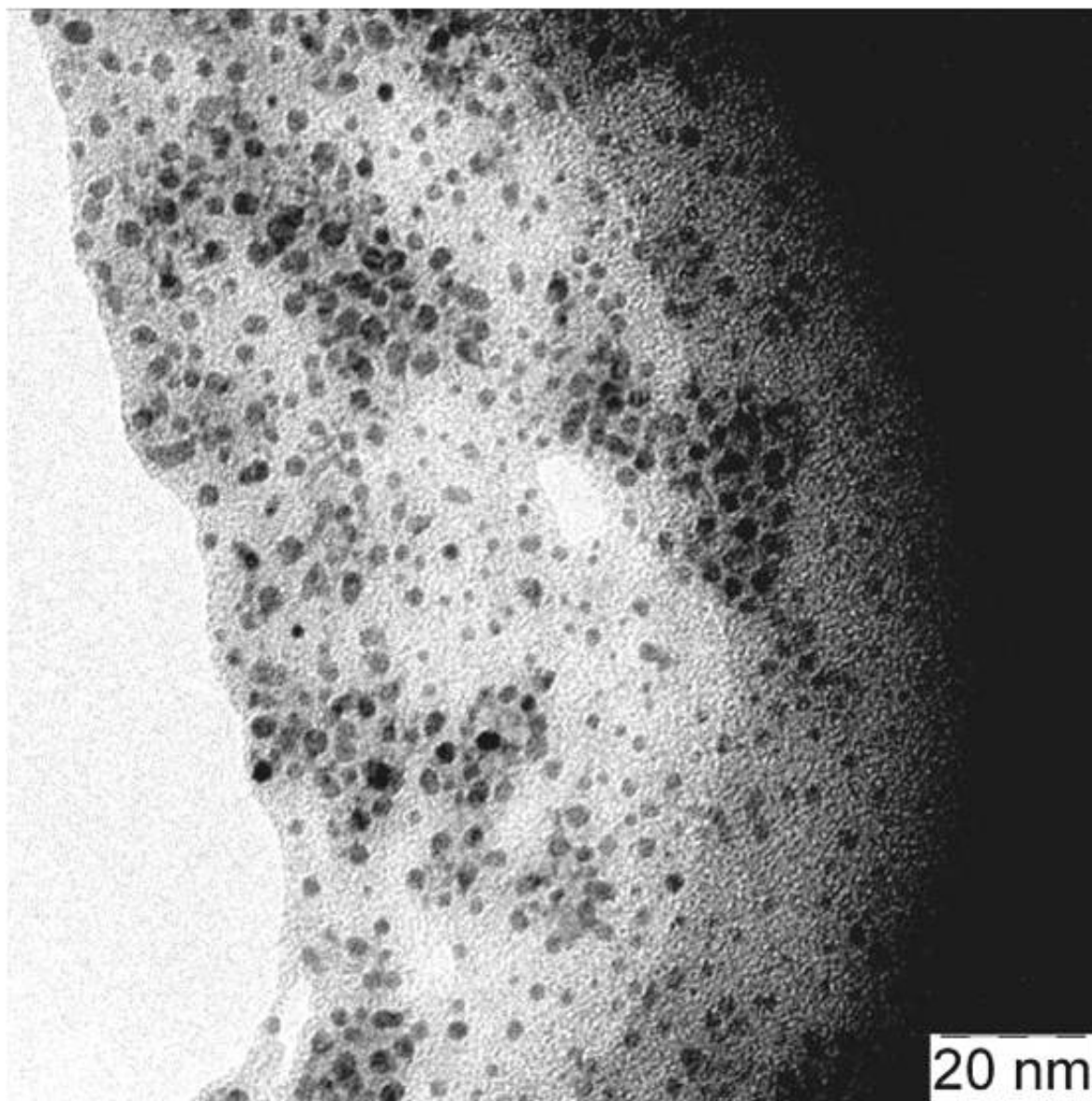
Очевидно, что кроме свободы перемещения, обеспечиваемой различными транспортными средствами, люди всегда заботятся о пище, крове, здоровье и общении (человек – социальное существо). Наверное, о применении нанотехнологий в сельском хозяйстве и в строительстве говорить трудно, потому что это две важнейшие области, где слово «нано», к сожалению, сейчас часто используется без всякой логической связи с нанотехнологиями. Однако в области медицины, электроники, информационных технологий, сенсорики, фотоники, спинтроники, новых химических источников тока использование наноматериалов может стать незаменимым.



*Рис. 21. Искусственная кость из чешуек гидроксилапатита. (сканирующая электронная микроскопия, фото с сайта [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru), Е.Ковалева, А.Г.Вересов, В.И.Путляев, химический факультет, ФНМ МГУ)*

Помните пример с наночешуйками гидроксилапатита, составляющими основу нашего скелета? Обычные химические методы получения труднорастворимых осадков, к коим относится и ГАП, проводимые в контролируемых условиях, могут дать продукт, имитирующий природные «чешуйки». Интересно, что столь важные нанокристаллы могут быть синтезированы даже в рамках обычного школьного кружка, если знать «знать как» («ноу хау»). Затем его нужно превратить в биокерамику путем спекания (термообработки), чтобы использовать в качестве имплантантов – заменителей костной ткани – в человеческом организме. И опять – таки, макроскопически это должен быть не монолитный «кирпич», а пористая масса сложной формы, через которую в человеческом теле могли бы прорасти кровеносные сосуды, а путешествующие по порам «костетворные»

клетки (остеобласты и др.) смогли бы постепенно переработать кость, заменив искусственное на естественное (Рис.21).



**Рис. 22.** Магнитные наночастицы оксида железа, модифицированные гуминовыми кислотами (просвечивающая электронная микроскопия, фото с сайта [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru), проф. И.В.Перминова, Т.Сорькина, А.Е.Чеканова, химический факультет, ФНМ МГУ)

“Тысячелетия тому назад открытие того, что огонь может превратить бесформенную глину в керамическую утварь, привело к возникновению земледельческой цивилизации и радикально улучшило качество и продолжительность жизни. Другая революция произошла уже в наши дни в области использования керамики в медицинских целях. Это инновационное применение специально спроектированных ... материалов для замены и лечения больных или поврежденных частей тела”, - отметил один из известных ученых, занимающийся этой проблемой, профессор Л. Хенч.

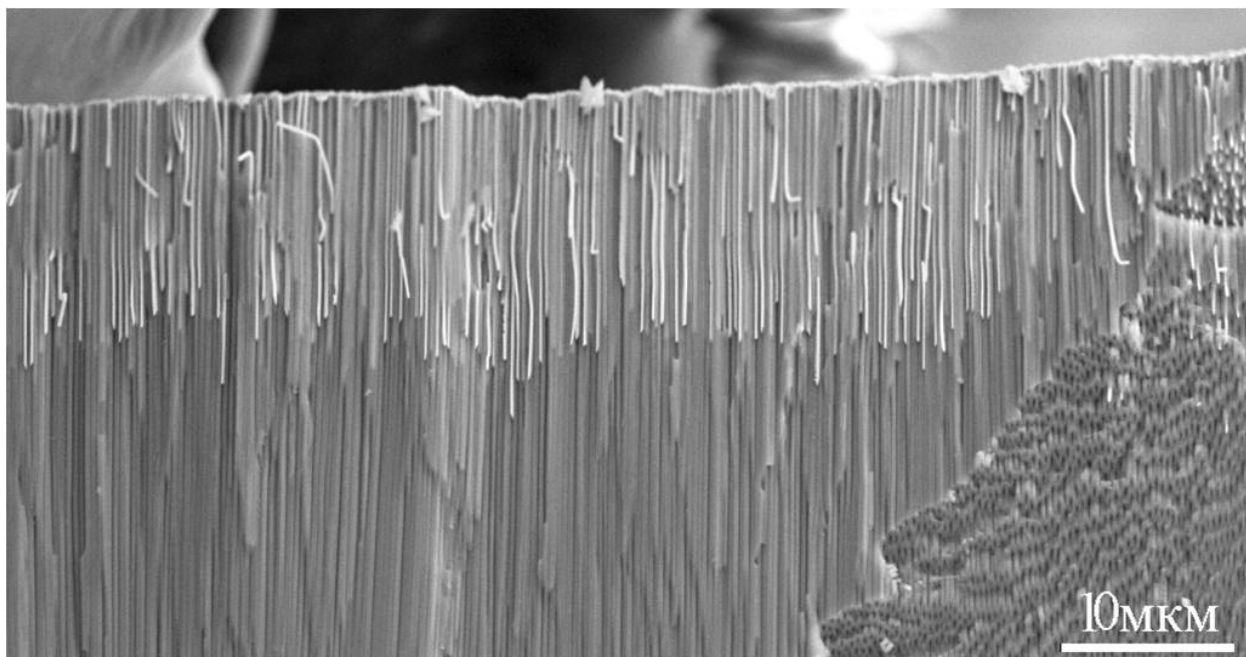
Помимо биокерамических материалов в наномедицине, несомненно, будут использованы наночастицы в своей естественной форме. Дело в том,

что размер самого мелкого кровеносного сосуда (капилляра) в нашем организме составляет около 1 микрона. Наночастицы примерно в 10 – 100 раз меньше устья такого сосуда и, соответственно, могут свободно через него проникнуть и разнестись вместе с кровью по всем закоулкам организма. При этом, хотя Человечество уже века живет среди природных наночастиц, защитные системы организма не реагирует на наночастицы, если они не являются химически токсичными. Санитары нашего организма - фагоциты - наночастицы не заглатывают, просто не замечая их (слишком мелкая цель). В силу указанных причин поверхностно – модифицированные наночастицы – идеальное решение для целевой («векторной») доставки лекарств, визуализации очагов заболевания, усиления терапевтических воздействия на организм при лечении злокачественных опухолей. Коль скоро нанороботы – фантазии, нам остаются лишь «умные» терапевтические наночастицы и различные нанокапсулы, которые реально существуют.

В России по статистике каждые 2 минуты от онкологического заболевания умирает один человек. Окончательно победить рак современная медицина пока еще не в состоянии. Поэтому в борьбе с этим бичом Человечества все средства хороши. И магнитные наночастицы, несомненно, сыграют здесь свою положительную роль (Рис.22). Дело в том, что такие наночастицы могут управляться магнитом, разогреваться переменным магнитным полем, быть видны при магнитной резонансной томографии. Соответственно, магнитные наночастицы могут управляемо доставлять лекарства, сами быть лекарствами (убийство раковых клеток при гипертермии), помогать разделять белки и физиологически – активные вещества, а также контрастировать очаг заболевания.

К сожалению, при этом все еще остается «за бортом» важнейшая проблема – выбор защитной оболочки, позволяющей наночастицам «путешествовать» в организме, не нанося ему вреда. Совсем недавно группой ученых из МГУ и наукограда Пущино предложен новый подход к получению таких биосовместимых магнитных наночастиц. Для стабилизации магнитных наночастиц они использовали ... гуминовые кислоты. Это дешевые и совершенно доступные вещества природного происхождения, они есть везде вокруг нас и могут быть выделены из почв, торфа, ила, угля, так как получаются из различных органических «останков» при их переработке бактериями, в процессе окисления и т.д. Сами наночастицы были синтезированы из водных растворов солей железа специальным образом - при высокотемпературном пиролизе ультразвукового «тумана» - аэрозоля. После добавления продуктов разложения к раствору гуминовых кислот были получены совершенно безвредные магнитные жидкости, стабильные в течение по крайней мере нескольких недель. Исследования показали, что в растворе присутствуют магнитные наночастицы гамма – оксида железа (III) диаметром ~ 10 нм. Одним из возможных объяснений того, что компоненты торфа и ила стабилизируют наночастицы, является специфический характер

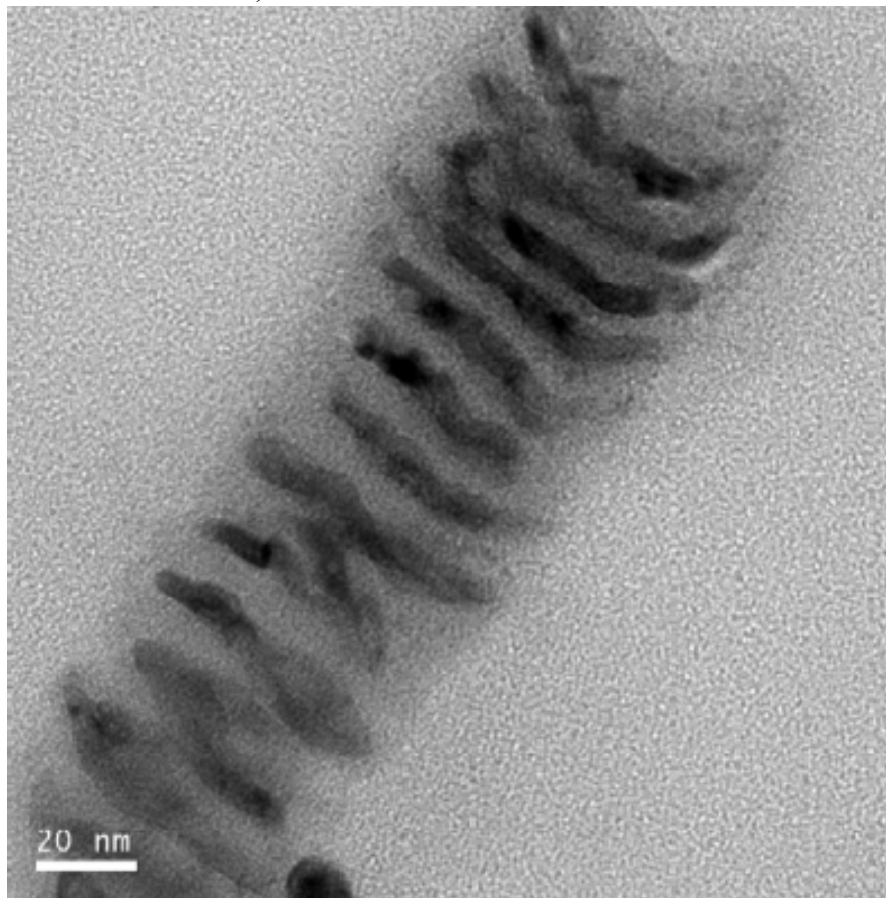
гуминовых кислот. Так, растворяясь в воде, гуминовые кислоты становятся полианионами, которые могут «закрепляться» на доступных центрах поверхности наночастиц с помощью своих многочисленных функциональных групп, «обволакивая» ее целиком и тем самым «поглощая» наночастицы своей разветвленной высокомолекулярной структурой. Гуминовые кислоты являются поверхностно - активными и обладают большим количеством гидрофильных групп, поэтому существенно повышают гидрофильность полученных сложных образований и их стабильность в физиологических жидкостях.



*Рис. 23. Асимметричная мембрана на основе пористого оксида алюминия, в поры которой электрохимически введены удлиненные наночастицы металла палладия, благодаря чему такая мембрана приобретает уникальную способность «фильтровать» водород из газовых смесей (фото К.Напольский, ФНМ МГУ).*

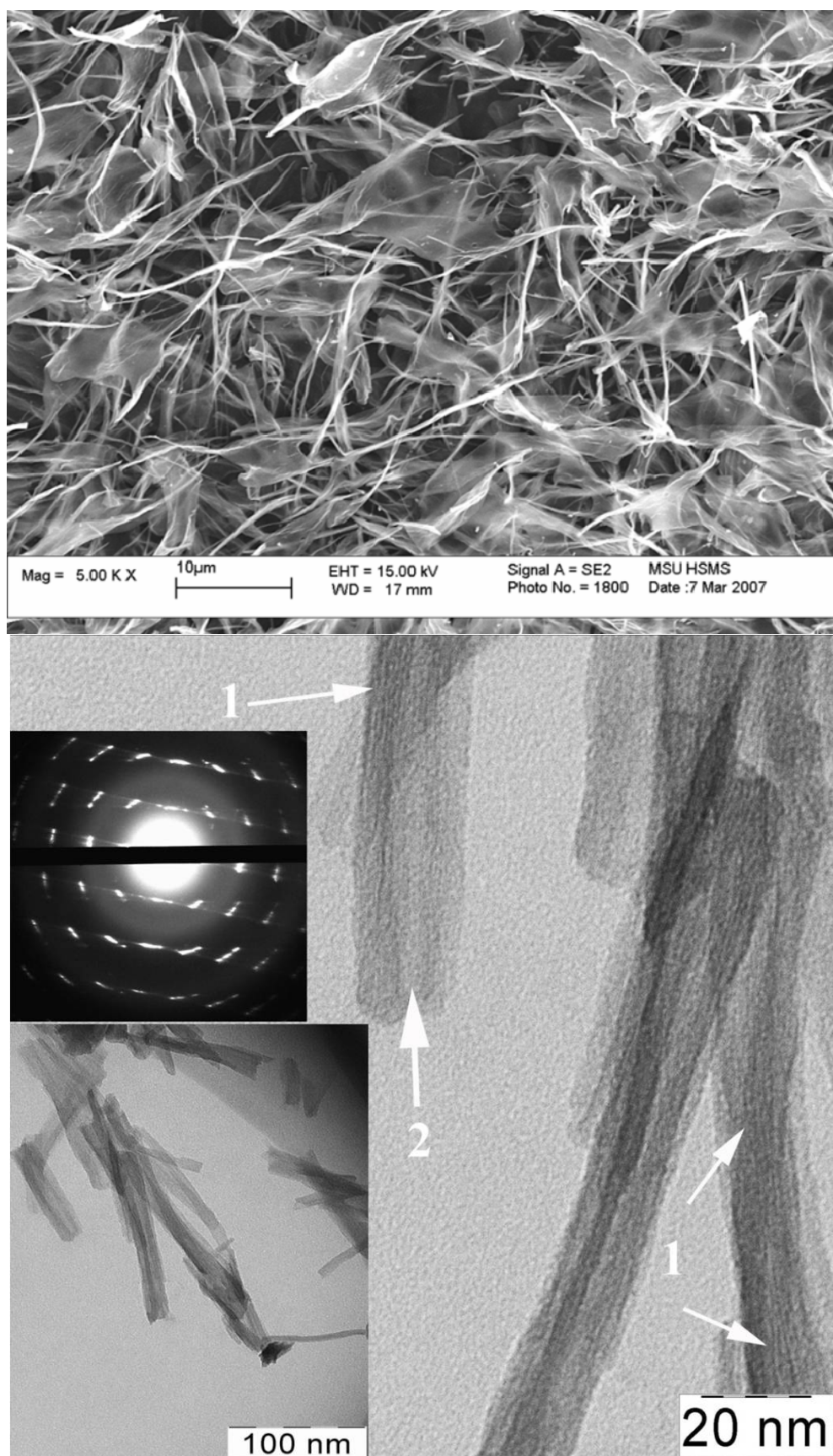
Огромную роль в современном обществе играют процессы очистки и фильтрация – они находят свое применение и в тонкой химической технологии, и в автомобильной промышленности, и в медицине, и в быту. Мы уже привыкли к тому, что воду из – под крана пить нельзя, а после прохождения «через фильтр» - можно. В таких случаях работают мембраны и сорбенты, отделяющие чистую воду от примесей. Мембранная технология – особая, самостоятельная, отрасль науки и техники, обещающая большие достижения, причем в самом недалеком будущем. Мембран и сорбентов существует великое множество, а наиболее перспективными из них могут считаться различные нанокомпозиты, построенные, например, на основе пористых матриц и анизотропных наночастиц, введенных в каналы – поры. Одним из ярких примеров (Рис.23) могут быть мембраны для очистки водорода, которые могут использоваться в водородной энергетике.

Мембраны с другими металлами в порах оксидной матрицы могут проявлять каталитическую активность, а также служить средой для высокоплотной записи информации (Рис.24). И все это получается по очень похожей методике (нанотехнологии).



**Рис. 24.** «Два в одной» - наноструктурированная наночастица – зебра анизотропной формы, электрохимически контролируемо полученная в порах анодированного алюминия, содержащая перемежающиеся области двух различных металлов – магнитного никеля и немагнитной меди. В случае сопряжения ферромагнетик – антиферромагнетик в таких частицах может быть существенно повышена надежность хранения бита информации, не подверженного «амнезии» из-за тепловых флуктуаций. (фото К.Напольский, ФНМ МГУ).

Упорядоченные в порах тонкой оксидной пленки ряды ориентированных в одном и том же направлении ферромагнитных нанопроволок представляют собой композитный наноматериал, плотность записи информации на который может достигать 10 Тб на дюйм, что в 10 – 100 раз выше ныне существующих коммерческих аналогов. И этот материал при своем получении опирается на закономерности, известные из области неорганической и коллоидной химии. А «заказ» на него делает физика, базирующаяся на глубоком понимании существа магнитных явлений, происходящих в твердом теле и взаимодействующих наносистемах. Ключевым моментом здесь являлось изменение формы частиц со сферической (как на Рис.22) на удлиненную, а также упорядочение отдельных элементов.



**Рис. 25.** Необычные анизотропные структуры на основе оксида ванадия  $V_2O_5$  – сверхтонкие ленты (вверху), полученные испарением льда из замороженного в жидком азоте коллоидного раствора, а также наносвитки с полианилином, полученные впервые на ФНМ МГУ при комнатной температуре (внизу).

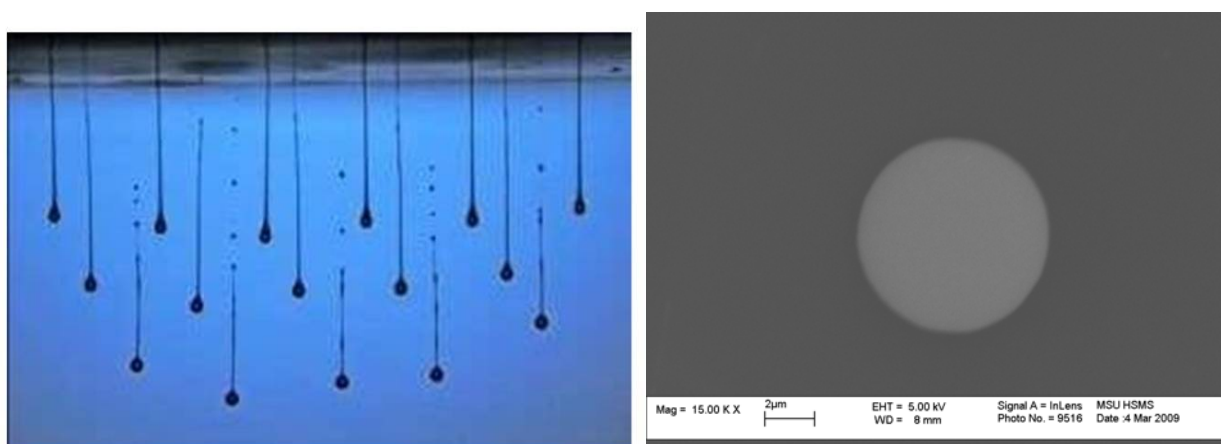
Без изменения формы (морфологии) частиц тепловое движение разрушило бы магнитную запись после достижения суперпарамагнитного предела для наночастиц определенного размера, а отсутствие упорядочения вызвало бы невозможность высокоплотной записи информации. Поэтому данный пример идеально демонстрирует правильный подход при получении наноматериалов, рассмотренный на Рис. 10 и Рис.11.

Как еще многие, вероятно, помнят, в культовом фантастическом фильме «Матрица» восставшие «умные» машины в условиях энергетического голода делали из людей батарейки – химические источники тока. Пока ощутимого голода не наблюдается, да и глупые машины не восстали, однако проблема создания новых химических источников тока, в том числе с использованием наноматериалов, очень актуальна именно сейчас, когда развиваются технические средства медицины, микроэлектроники, бытовой техники, экология, энергосберегающие технологии, гибридные системы автомобильных двигателей и пр.

Химический источник должен работать долго, надежно, быстро заряжаться (если это аккумулятор) и с удовольствием отдавать всю свою мощность, если требуется, внешней электрической цепи. При традиционной архитектуре современного литий – ионного аккумулятора в процессе его зарядки ионы лития и электроны «насильно» внедряются в электрод (при разрядке это анод), в котором сами они сидеть не собираются (не хотели бы, им это невыгодно). Зато стоит подключить внешнюю электрическую цепь, и ионы самопроизвольно будут переходить из анода в катод через ион – проводящую мембрану, в котором им находиться выгодно. При этом поток электронов, отделенный от противотока катионов лития мембраной, пойдет по металлическим проводникам внешней цепи. Таким образом, за счет энергии химической реакции напрямую формируется электрическая «энергия», которую Человечество достаточно хорошо умеет использовать (превращать в различные виды полезной работы). И именно здесь наноматериалы имеют сразу несколько естественных преимуществ перед «обычными»: они дисперсны и имеют большую площадь поверхности, что облегчает кинетику и увеличивает «глубину» обмена ионами лития, им уже некуда разрушаться дальше при циклировании (зарядке – разрядке источника) и поэтому такие источники живут дольше, структура таких материалов необычна (слоистая, туннельная) и часто способствует их использованию в процессах, сопровождающихся интеркаляцией – деинтеркаляции ионов. Так, катодные материалы на основе различных морфологических форм оксидов ванадия имеют параметры, в несколько раз превышающие коммерчески доступные сейчас материалы. Анизотропные структуры на основе оксидов ванадия экспериментально показывают емкость до 500 – 550 мАч/г и отсутствие деградации свойств после сотого (и далее) цикла зарядки – разрядки (Рис.25).

Новым поколением литиевых химических источников тока являются литий – воздушные аккумуляторы. Устройство такого аккумулятора является

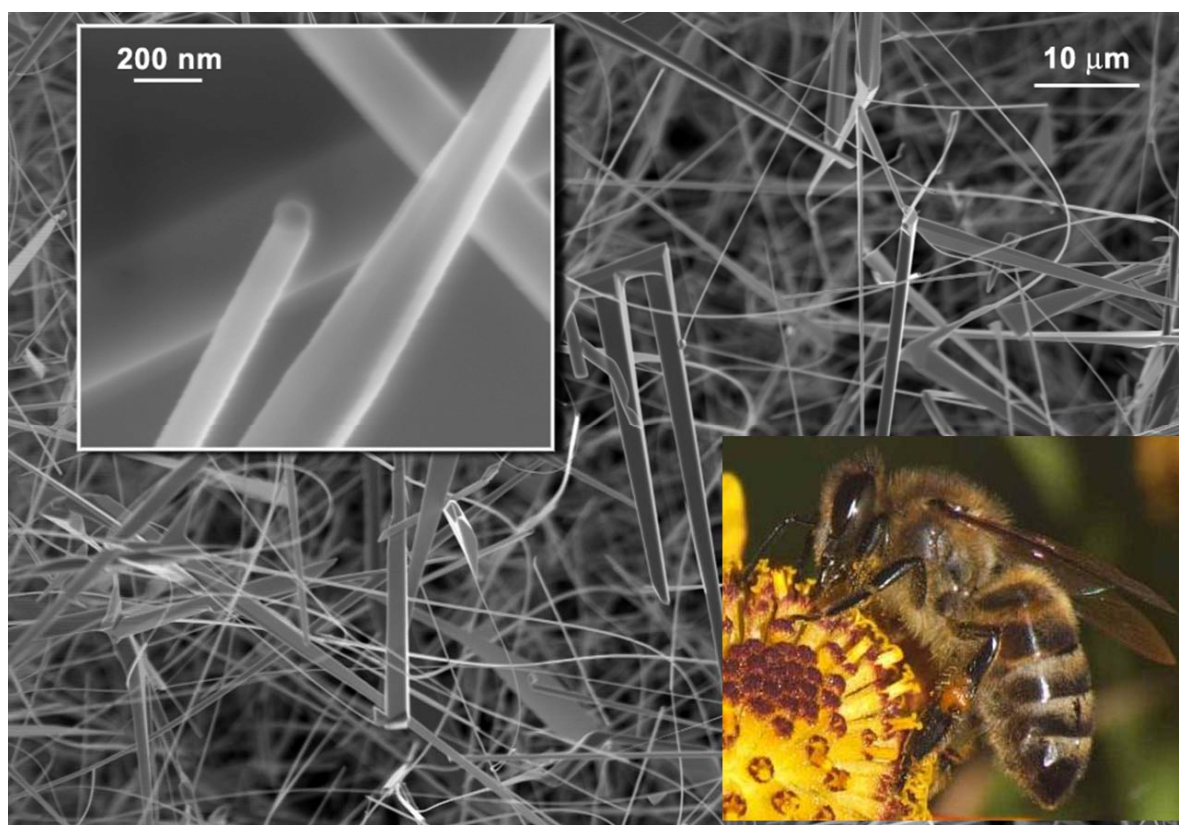
достаточно простым и эффективным, так что оно использует в качестве потенциалообразующей реакцию окисления кислородом воздуха металлического лития, реализуемую путем ионного обмена через слой неводного литий-содержащего электролита и реакции восстановления кислорода на внешней пористой мембране, содержащей «катализатор» процесса восстановления и проводящий компонент, необходимый для обеспечения эффективной передачи заряда по поверхности внешней мембраны. Основным преимуществом такого химического источника тока является неограниченный запас окислителя во внешней среде (кислорода воздуха) и, соответственно, чрезвычайно высокие емкостные характеристики таких аккумуляторов, уже примерно на порядок превышающие аналогичные показатели коммерческих литий – ионных аккумуляторов при сохраняющихся высоких мощностях разрядки и других эксплуатационных характеристиках.



**Рис. 26.** Капли чудесных чернил, содержащих наночастицы, висящие в воздухе (слева, стробоскопическая съемка) и уже на подложке (справа), сканирующая зондовая микроскопия, Д.М.Иткис, ФНМ МГУ.

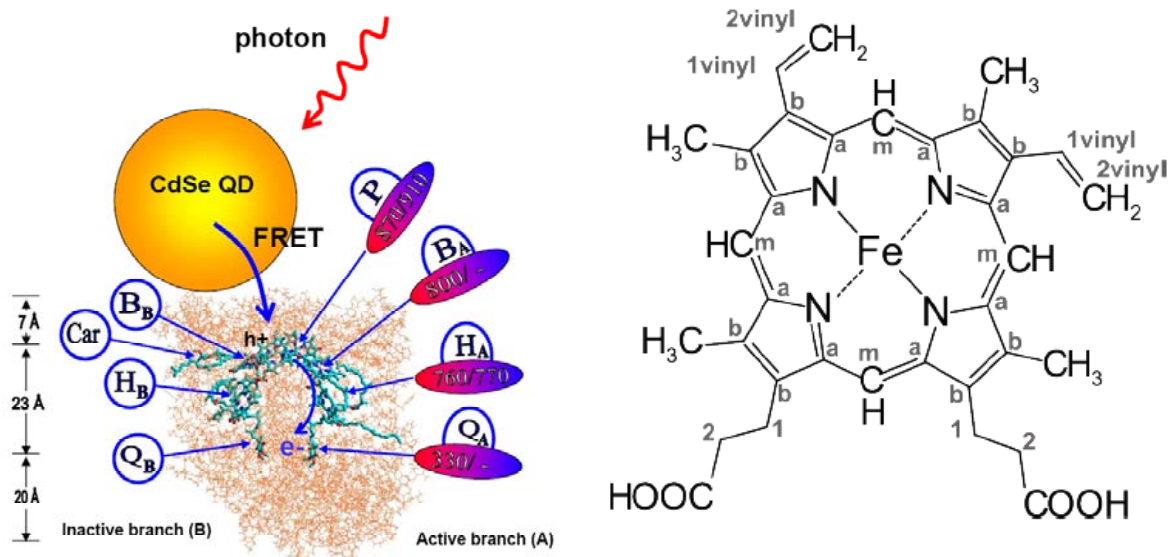
Использование микропечати является новым, бурно развивающимся современным методом формирования различных устройств гибкой электроники, имеющим близкие перспективы промышленного применения. Смысл технологии очень прост – нарисовал на компьютере – и тут же напечатал. К одной из основных проблем, связанных с развитием технологии микропечати, относится разработка фундаментальных подходов к технологиям получения расходных материалов («чернил») с необходимыми функциональными свойствами, а также тщательный физико-химический, морфологический, реологический, метрологический анализ полученных стабильных суспензий и их компонентов. Эта проблема во многом сводится к синтезу и химической модификации разнообразных наночастиц с заданными химическим и фазовым составом и морфологией, а также к изучению поведения таких частиц в исходном растворе и при удалении растворителя из ограниченного объема микрокапли. В последнее время во всем мире многие высокотехнологичные компании (Samsung, LG, Degussa / Evonic и др.) переходят на технологии прототипирования и коммерческого изготовления

современных устройств микроэлектроники, сенсорики, фотовольтаики, супергидрофобных поверхностей с эффектом «лотоса» с использованием компьютерного дизайна и микропечати. Одним из перспективных направлений создания планарных структур является разработка методик нанесения микромассивов люминесцентных и резистивных сенсоров, чувствительных к определенным (взрывоопасным, токсичным, биологически активным) компонентам газовой фазы или физиологических жидкостей. Возможность легкого варьирования состава композитных сенсоров, формирующихся при высыхании микрокапель «чернил», позволяет создавать с помощью микропечати комбинированные устройства (lab-on-chip) для экспресс-анализа сложных газовых смесей и жидкостей. Подобный «комбинаторный» подход является очевидным преимуществом использования микропечати для аналитических и медицинских целей. В случае трехмерной печати становится возможным изготовление мембран, керамических фильтров и других керамических изделий сложной формы, особо стоит отметить интерес к трехмерной печати медицинских имплантантов. По данным различных зарубежных компаний к 2010 году мировой рынок устройств и их компонентов, произведенных с использованием микропечати, составит до 7 миллиардов долларов.



**Рис. 27.** Нитевидные кристаллы диоксида олова, обладающие, как и «усики пчелы» сенсорными свойствами – способностью «почувствовать» те или иные молекулы. На врезке показано, как такие кристаллы растут «через каплю» на вершинах нитевидных кристаллов по механизму «пар – жидкость – кристалл».

Неизменными атрибутами всех телевизионных супергероев всегда, кроме гигантских запасов энергии и силы, являлись обостренные, как у экстрасенсов, чувства. Наноматериалы, кроме того, что они умеют «работать», с фотонами, электронами, магнитным полем, позволяют создавать также сверхчувствительный «электронный нос» (Рис.27) и чувствительный «глаз» (Рис.28). В первом случае наночастицы широкозонных полупроводников типа диоксида олова или их нитевидные кристаллы в области совсем небольших температур (100 – 150<sup>0</sup>С) способны очень существенно изменять свою электрическую проводимость в случае присутствия в анализируемом воздухе молекул токсичных или взрывоопасных газов, даже если они не имеют никакого цвета и запаха, и даже если опасный газ разбавлен в миллионы раз окружающим воздухом. Это может спасти шахтеров от взрыва в шахте, предотвратить экологическую катастрофу на опасном химическом производстве, спасти от взрыва и пожара жилые дома и газовые магистрали, обезопасить взрывчатку террористов в аэропортах и на вокзалах.



**Рис. 28.** Сопряжение (конъюгация) неорганических наночастиц и биологических молекул: фоточувствительных белок бактериородопсин (слева), порфириновой ядро нашей крови (справа).

Еще более чувствительными в отношении обнаружения химических молекул, в общем случае – в отношении изменения окружения – являются конъюгаты функциональных наночастиц и биологических структур, созданных самой природой. Это и сверхчувствительные и селективные биосенсоры для медицины, и средства для диагностики заболеваний, и элементы альтернативной энергетики (Рис.28). Такой «симбиоз» совершенно естественен, поскольку многие биологические молекулы принадлежат нанобиуму по своим размерам и имеют очень специфические функции, которые выгодно дополняются свойствами неорганических наночастиц. На

этом стыке лежит, вероятно, один из самых интересных разделов современной науки – нанобиотехнологии.

Самой интересной фундаментальной задачей здесь является исследование «эффектов близости» и энергетического взаимодействия наночастиц металлов, обладающих плазмонным резонансом, и полупроводниковых квантовых точек с функциональными структурами живых клеток, а также белками фотосинтетических реакционных центров биологических систем. Плазматическая мембрана клеток – это первая структура, взаимодействующая с «внешними» веществами, в том числе наночастицами. В зависимости от размера наночастиц и особенностей клеток наночастицы могут не только адсорбироваться на клеточной поверхности, но и интеркалировать во внутримембранное пространство на разную глубину. Наночастицы серебра или золота, адсорбированные на поверхности или введенные в цитоплазму клеток, будут представлять собой своеобразные зонды - нанобиосенсоры, при помощи которых экспериментатор получает информацию о конформации и свойствах биомолекул, находящихся вблизи НЧ. При этом регистрируемый сигнал так называемой SERS – спектроскопии комбинационного рассеяния обладает большой интенсивностью и высоким разрешением. Использование подобных биосенсоров для исследования структурных и функциональных характеристик живых клеток, что является актуальным не только для решения фундаментальных медико-биологических задач, но и для диагностики клеточных патологий на ранних стадиях болезни, когда другие методы еще ничего не обнаруживают.

Близким к этому направлению является использование природных биологических молекул (пигменты, ДНК, белки, и т.д.) в различных устройствах, например, электронных или фотонных. Разработка миниатюрных и высокоэффективных искусственных «биоаккумуляторов» является весьма многообещающим направлением, так как лучшие современные солнечные батареи имеют коэффициент полезного действия не выше 15-17%, в то время как расчеты показывают, что, используя фотосинтетические реакционные центры, вполне реально получить 25-30%, поскольку сам процесс первичного разделения зарядов идет со 100%-ым выходом. В природных фотосинтезирующих организмах свет изначально поглощается антенными светособирающими комплексами и передается в виде энергии экситонного возбуждения на специализированные белки реакционного центра, в которых эта энергия трансформируется в химическую энергию, используемую затем организмом для синтеза необходимых для существования веществ. Реализация такого процесса в искусственных устройствах должна включать в себя не только сам генератор фототока (которыми будут служить белки реакционных центров), но и систему эффективного светосбора энергии света. Следует отметить, что энергетическая эффективность фотосинтеза, с учетом спектрального распределения освещенности земной поверхности, имеет величину лишь около 5% во многом по причине слабого поглощения фотосинтезирующими организмами света УФ-диапазона. Правильно подобранные полупроводниковые

нанокристаллы (флуоресцирующие квантовые точки, КТ) могут исполнить роль дополнительной «антенны» светового излучения, слабо поглощаемого самими натуральными фотосистемами. Эффективный резонансный энергетический транспорт между молекулами квантовых точек и фотосинтетических РЦ из пурпурных бактерий дает шансы на громкий успех, а сама идея конверсии солнечной энергии в «биотопливо» искусственными фотосинтетическими системами является одной из наиболее дерзких в нанотехнологиях.

Таким образом, в конце статьи можно высказаться за наличие нескольких аксиом, с которых следует начинать истории, что такое мир нанотехнологий.

**Аксиома 1.** Нанотехнологии способны выступить локомотивом («катализатором»), который будет способствовать движению вперед в области науки, технологии, техники, образования, ВПК и других важнейших отраслях. Иными словами, развитие нанотехнологий в России преследует цель долговременного использования полученных результатов российским обществом.

**Аксиома 2.** Понятие «нанотехнологии» не является «однородным и бесформенным» (или универсальным). Нанотехнологии имеют различный смысл, значимость и наукоемкость в зависимости от их **практического приложения** к той или иной области человеческой деятельности. Иными словами, нанотехнологии применимы в различной степени практически во всех значимых областях промышленности и повседневной жизни и пр., однако методы и целесообразность их применения, а также способы использования их результатов могут кардинально различаться. Кроме того, нанотехнологии сосуществуют в различных стадиях своего исторического развития. «Эволюционные» нанотехнологии – те знания и технологии, которые известны уже давно или очень давно, но которые только сейчас начали относить к нанотехнологиям. Такие технологические приемы, которые уже разработаны или требуют лишь незначительного улучшения для доведения до оптимального состояния, практически не требуют генерации новых знаний, а также не нуждаются в проведении интенсивных научных исследований современного уровня. Подобные нанотехнологии, как правило, работают с хорошо известными дисперсными или ультрадисперсными системами и не нуждаются в использовании «наноэффектов», изменяющих размерно-зависимые физические свойства нанообъектов. Эти технологии могут быть многотоннажными и дать сиюминутный экономический эффект без больших шансов получить новую защищенную международными патентами и лицензиями интеллектуальную собственность.

«Революционные» нанотехнологии - наукоемкие нанотехнологии, основанные на генерации новых знаний и идей, использовании самого современного синтетического и аналитического оборудования. Они не могут быть воплощены в промышленное производство немедленно, однако способны создать задел как для развития новых отраслей производства высокотехнологичных материалов и устройств, так и новой интеллектуальной собственности, которая не защищена еще патентами

других стран и поэтому официально может стать именно нашей (если вовремя успеть это сделать). Такие нанотехнологии основываются на развитии фундаментальных исследований в области нанотехнологий на отдаленную перспективу, поиск новых эффектов, принципов функционирования, пока еще не существующих материалов.

**Аксиома 3.** Нанотехнологии не возникли внезапно и на пустом месте. Они являются междисциплинарной областью исследований (при этом под междисциплинарностью следует понимать *комплексную структуру знаний*, более широкий научный кругозор, достигнутый за счет усложнения знаний, но не в ущерб профессиональной четкости и фундаментальной глубине), основанной на достижениях химии, физики, биологии, механики и других классических наук, а также связанным с закономерной эволюцией этих и других наук прорывом в разработке методов синтеза и анализа (в том числе – визуализации и моделирования) веществ и материалов. Именно поэтому к нанотехнологиям следует подходить без фобий, как к новой междисциплинарной, наукоемкой и ресурсоемкой области исследований и инноваций. Именно поэтому нанотехнологии требуют новые высококвалифицированные, специально подготовленные, кадры и особую инфраструктуру исследований и сертификации их результатов.

**Аксиома 4.** Для нанотехнологий не только размер имеет значение. Важнейшими параметрами наносистем являются, как минимум, размер, размерность, упорядочение и функциональность. Учет всех этих характеристик порождает нано- и микроструктурированные материалы, обладающими наивысшим, как говорят, инновационным потенциалом и действительно способными определить весь дальнейший прогресс в нанотехнологии.

Развитие нанотехнологий теснейшим образом связано с развитием образования. Только молодые способны решить любые амбициозно поставленные задачи, а также выработать фундаментально новые подходы, опережающие время. Российская наука и инновационные компании не должны развивать тупиковые направления и сосредоточиться на наиболее перспективных. В России уже развивается нанотехнологическое олимпиадное движение, проводятся молодежные конкурсы, Фестивали науки, многие из которых были инициированы усилиями Московского Университета. В одной только Интернет – олимпиаде по нанотехнологиям ([www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)) ежегодно принимают участие тысячи человек. Примечательно, что при проведении Фестивалей Науки наибольшим интересом пользовались выставки научной фотографии, позволившие многим школьникам и другим посетителям Фестивалей визуально увидеть и прочувствовать микро- и наномир современных материалов (Рис.29). И это только начало...



а.



б.

**Рис.29.** Молодые и талантливые – вперед! (а) Часть фотографий – призеров конкурса научных фотографий Второго Фестиваля Науки в г.Москве. Московская школьница, участник III Интернет – олимпиады по нанотехнологиям, Е.Никитина (9 кл.) объясняет Ректору МГУ академику В.А.Садовничему суть своей работы по получению магнитной жидкости, которую она выполняла на факультете наук о материалах МГУ. (б) молодые ученые – призеры Второго Международного Форума РОСНАНО по нанотехнологиям.

... То ли еще будет! Нанотехнологии только открывают нам путь в совершенно другой, лучший, мир, который мы сможем приблизить лишь совместными, согласованными усилиями. «За нанотехнологиями и нанонаукой – будущее, в нашей стране и в мире, поэтому вы находитесь на самом переднем крае научных исследований!», - сказал Ректор МГУ, академик В.А.Садовничий. И у нас нет никаких оснований опровергнуть эти слова.

*Авторы благодарят студентов и аспирантов факультета наук о материалах, химического факультета, кафедры биофизики биологического факультета МГУ за помощь в подготовке настоящей статьи. Большинство фотографий получено с использованием оборудования Центра Коллективного Пользования МГУ им.М.В.Ломоносова «Технологии получения новых наноструктурированных материалов и их комплексное исследование».*

### **Литература:**

1. «Нанотехнологии. Азбука для всех.» под ред. Акад. Ю.Д.Третьякова, М.:Физматлит, 2008, 367 с.
2. «Богатство наномира», альбом научной фотографии под ред. Акад. Ю.Д.Третьякова, М.: Бином. Лаборатория знаний, 2009, 265 с.
3. И.Яминский, Линейка длиной в один нанометр. «Квант», н.4, 2009, сс.2-7
4. 1. Ю.Д.Третьяков, Е.А.Гудилин, Е.А.Киселева, Наноматериалы и нанотехнологии в классическом университете: от образования к инновациям, изд-во Московского Университета, серия «Инновационный университет», Москва, 2007, 149 с.
5. Е.А.Гудилин, Ю.Д.Третьяков, Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов, Успехи химии, 78 (9) 2009, 867 – 888.
6. Е.А.Гудилин, Первая Интернет-олимпиада «Нанотехнологии – прорыв в Будущее!» (идея, уроки, задания и решения), Международный журнал «Альтернативная энергетика и экология», н.1, 2008, с.72-139.
7. Ю.Д.Третьяков, Е.А.Гудилин, «Там, внизу, все еще очень много нанобума», газета «В мире науки», 6 сентября 2008
8. Е.А.Гудилин, Е.А.Киселева, «Весна нанотехнологического образования», газета «Московский Университет», № 11 (4202) апрель 2007
9. О.А.Брылев, Е.А.Гудилин «Факультет наук о материалах Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова», журнал «Российские нанотехнологии», 2008, т.3, вып. 9-10, с. 20-29.
10. [www.nanometer.ru](http://www.nanometer.ru)