

Проектирование будущего. Роль нанотехнологий в новой реальности

Опубликовано [empirv](http://empirv.ru) в 29 ноября, 2009 - 16:56

Выступление **Г.Г. Малинецкого** на **Первой ежегодной конференции** Нанотехнологического общества России «Развитие нанотехнологического проекта в России: состояние и перспективы», 09.10.2009. Москва. Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Дорогие коллеги! Друзья!

Давайте перейдем к другому диапазону временных масштабов – к десятилетиям и векам, к тем общим проблемам, которые предстоит решать России и человечеству.

Наш институт – ныне Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН (ИПМ) – был создан в 1953 году для решения стратегических проблем, требовавших применения прикладной математики и компьютерного моделирования. Без преувеличения можно сказать, что от решения этих проблем зависела судьба нашего отечества и сам ход мировой истории.

Таковыми задачами были совершенствование атомной и водородной бомб, создание космических аппаратов и баллистических ракет, разработка систем управления. Нашим первым директором был выдающийся математик, механик, организатор науки, «главный теоретик космонавтики», трижды Герой Социалистического Труда **Мстислав Всеволодович Келдыш**. Наш институт работал в тесном контакте с коллективами Генерального конструктора, «отца советской космонавтики» **Сергея Павловича Королева** и научного руководителя советского ядерного проекта **Игоря Васильевича Курчатова**.

ИПМ и по сей день занимается стратегическими проблемами. Одной из них является долгосрочное прогнозирование развития мира и России, предсказание наиболее вероятных последствий крупных решений, принимаемых на государственном уровне, а также анализ и планирование воздействий, приближающих нас к желаемому варианту будущего.

Будущее становится объектом проектирования. Эффективные решения в экономической, военной, технологической сферах, в области международных отношений коренным образом зависят от того, насколько хорошо мы представляем мир, технологии и человека через 20–30 лет.

В последней трети XX века произошла научная революция в сфере прогнозирования. Перефразируя **Блаженного Августина**, можно сказать, что прошлого уже нет, настоящее эфемерно и думать следует, прежде всего, о будущем (см. рис.1).

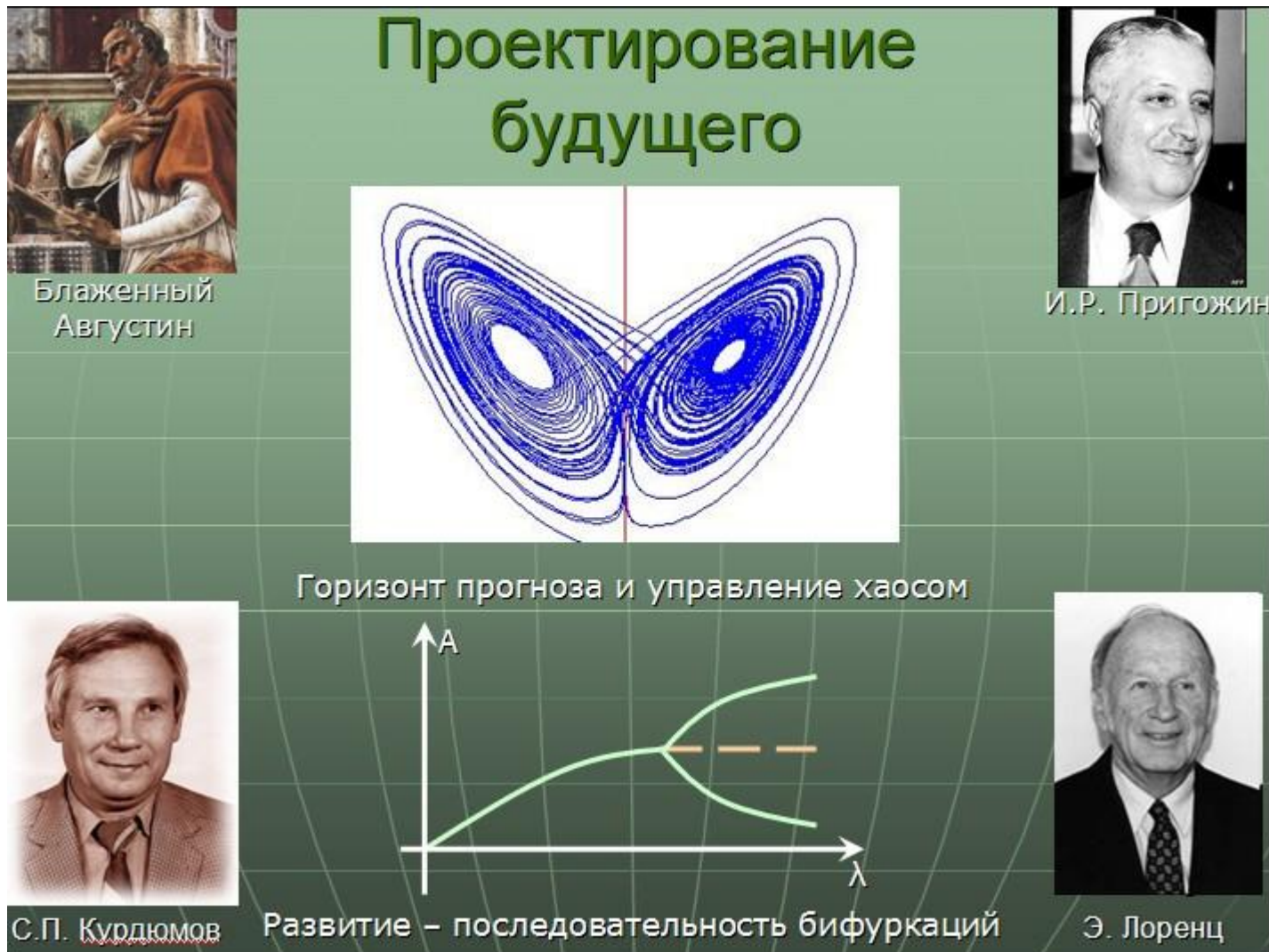


Рис.1

Фундаментальные теории не только открывают новые горизонты, но и помогают осознать пределы наших возможностей, лишают иллюзий. Классическая механика лишила надежды создать вечный двигатель первого рода, получая энергию в механической системе «из ничего». Термодинамика заставила распространиться с проектами вечных двигателей второго рода (когда работа совершается с помощью передачи тепла от холодного тела к горячему без изменения окружения). Квантовая механика с её соотношением неопределенностей показала, что мы не можем бесконечно точно измерять одновременно координату и импульс микрочастицы. Наконец, теория относительности поставила предел для передачи информации в вакууме со сверхсветовой скоростью.

Такие фундаментальные ограничения в последней трети XX века были выявлены в связи с развитием нелинейной науки (нелинейной динамики, синергетики, эти слова сейчас всё чаще употребляют как синонимы). В 1963 году американский метеоролог **Эдвард Лоренц** открыл явление динамического хаоса, странные аттракторы и главное – горизонт прогноза. Это то время, за которое информация о состоянии детерминированной системы (в которой будущее однозначно определяется начальным состоянием) утрачивается, как бы ни была мала погрешность в определении начального состояния. На рисунке 1 показан аттрактор Лоренца – клубок траекторий в пространстве возможных состояний системы, представляющий наглядный образ динамического хаоса. Горизонт прогноза для состояния атмосферы составляет около трех недель. На это характерное время мы не можем получить прогноз погоды, сколько бы метеостанций мы не разместили на Земле, и какими бы мощными компьютерами мы не пользовались. (Суперкомпьютеры в этих задачах решают, к сожалению, очень немного).

Другое важное понятие нелинейной науки – бифуркация (от французского bifurcation – раздвоение, ветвление). В математике так называют изменение числа и устойчивости решений определенного типа. Развитие сложных систем сейчас обычно мыслится как прохождение с течением времени последовательности бифуркаций. В каждой из таких точек фактически делается выбор одного из вариантов развития. Малые воздействия в точках бифуркации могут иметь большие последствия, вдали от них влияние малых воздействий ничтожно.

Одной из пионерских идей XX века стало представление о самоорганизации – спонтанном, самопроизвольном возникновении упорядоченности в открытых нелинейных, далеких от равновесия системах. В процессе самоорганизации в сложных системах выделяется набор ведущих переменных (их называют параметрами порядка), которые подчиняют, определяют остальные характеристики объекта. Огромный вклад в теорию самоорганизации или синергетики (дословно с греческого – теории совместного действия) внес выдающийся исследователь **Илья Романович Пригожин** (Нобелевская премия по химии 1977 года). Само слово синергетика вошло в науку с легкой руки немецкого физика-теоретика **Германа Хакена**.

В России становление синергетики во многом связано с именем специалиста по прикладной математике и междисциплинарным исследованиям, третьего (со времени основания ИПМ) директора нашего института – **Сергея Павловича Курдюмова**.

Ему и его научной школе принадлежит создание и развитие теории режимов с обострением. Так называют режимы, при которых одна или несколько величин, характеризующих систему, неограниченно возрастают за ограниченное время (называемое временем обострения). Режимы с обострением дают приближенное описание (асимптотику) многих нелинейных систем с сильной положительной обратной связью. Они типичны для задач теории горения и взрыва, для некоторых неустойчивостей в физике плазмы, для ряда процессов, изучаемых математической биофизикой, гидродинамикой, химической кинетикой, для экономических кризисов.

Все эти представления нелинейной науки – горизонт прогноза, самоорганизация, параметры порядка, режимы с обострением – имеют непосредственное отношение к проблемам стратегического прогноза и к проектированию будущего.

При этом естественно начать анализ с ключевых, основополагающих процессов, которые определяют сам алгоритм развития человечества. Это процессы демографического роста – пружина и результат всего исторического пути, пройденного цивилизацией. Священник, профессор Ост-Индской компании, экономист и математик, работавший в XIX веке, **Томас Мальтус** считал, что численность человечества растет со временем в геометрической прогрессии – в одинаковое число раз за одинаковые промежутки времени. По его мысли, она растет в соответствии с линейным уравнением $N^* = \alpha N$, $N(0) = N_0$ (см. рис.2), где $N(t)$ – численность человечества в момент времени t , α – постоянная величина, называемая мальтузианским коэффициентом, $N(0)$ – численность людей в начале процесса экспоненциального роста. Решение этого уравнения – экспонента $N(t) = N_0 \exp(\alpha t)$.

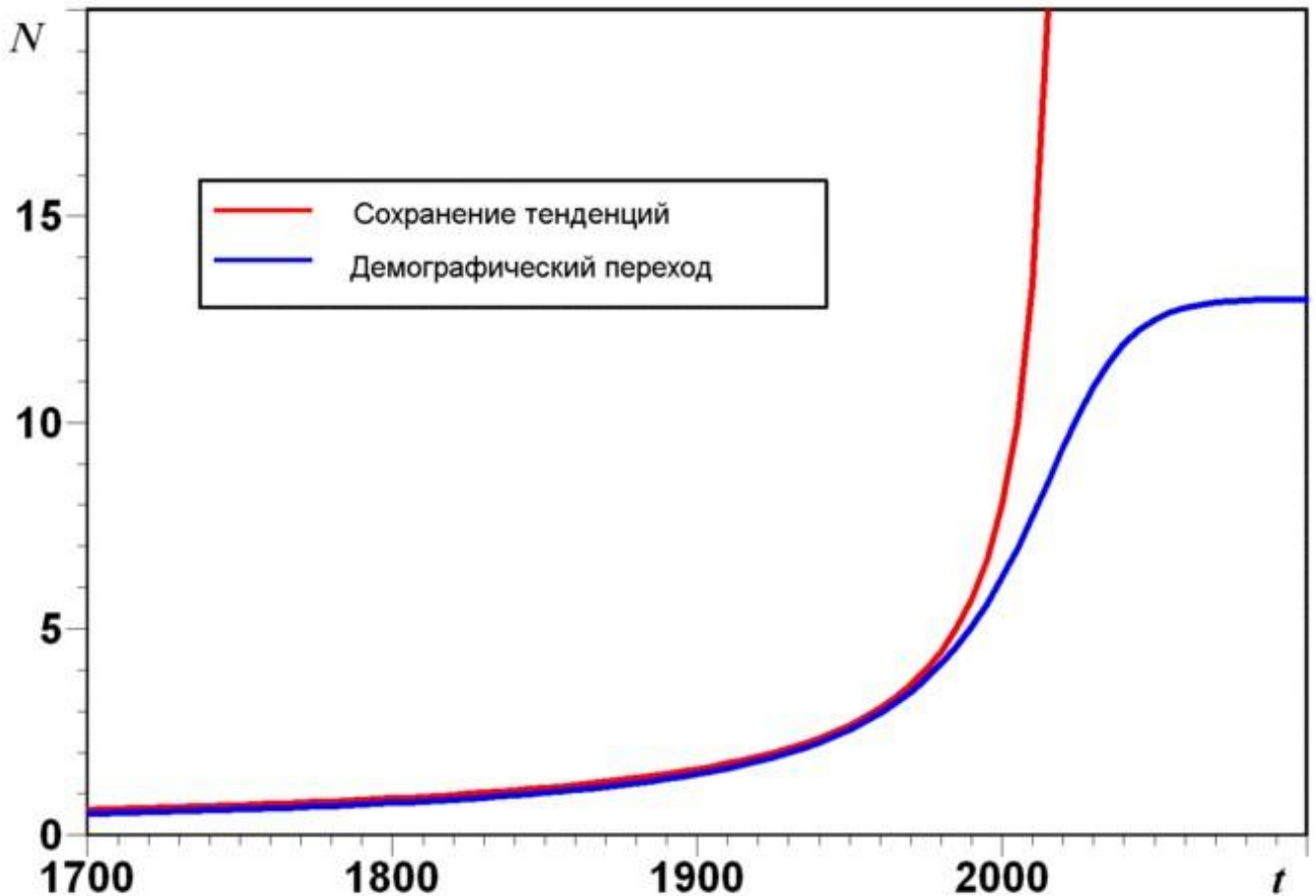


Рис.2

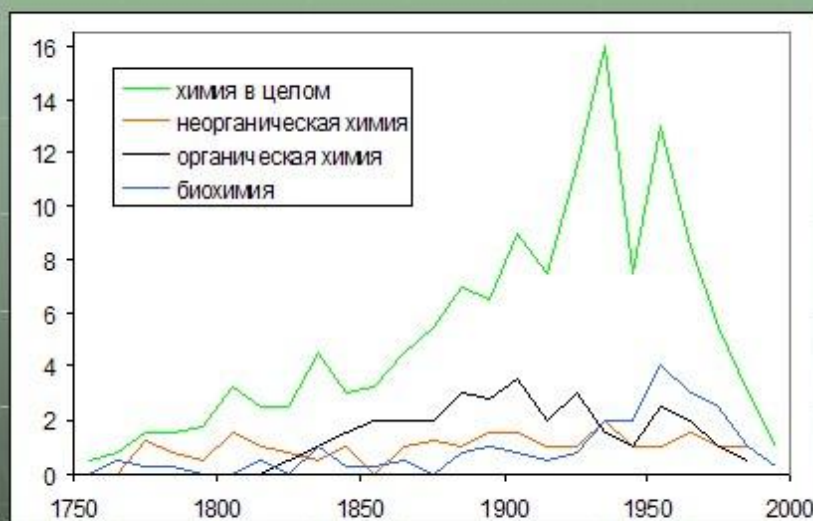
Исследования историков, археологов, палеодемографов, экономистов, проведенные в последние десятилетия, показали, что **Т. Мальтус** в отношении человечества ошибался. Действительно, в условиях избытка ресурса численность различных видов от амёб до слонов растет по экспоненте. Однако это не относится к человеку. Его скорость роста, по крайней мере в течение последних 200 тысяч лет, определялась нелинейным уравнением $N^* = \alpha N^2$. Она росла по гораздо более быстрому гиперболическому закону $N(t) = (t - t_*)^{-1}$, где t_* ~ 2025 год – время обострения. Если бы сохранились сложившиеся за сотни веков тенденции, то нас должно было бы стать бесконечно много уже к 2025 году!

Однако на времени жизни одного, живущего сейчас, поколения происходит изменение алгоритмов развития человечества. Наблюдается резкое уменьшение скорости роста числа людей на планете, называемое глобальным демографическим переходом. По-видимому, историки будущего будут вспоминать века спустя наше время не как век космоса, атома или компьютеров, а как эпоху глобального демографического перехода.

Становление глобальной демографии в России и в мире связывают с работами и моделями профессора **Сергея Петровича Капицы**. В соответствии с его теорией главным и единственным параметром порядка для человечества в целом является сама численность человечества N (принцип демографического императива). Эта теория приводит к парадоксальному выводу – число людей одновременно живущих на планете не превысит 9–12 миллиардов человек, и близкие показатели будут достигнуты уже к середине XXI века. Время экстенсивного демографического роста для человечества заканчивается.

Эти исследования были продолжены в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Экономика и социология знания» в подпрограмме «Комплексный системный анализ и математическое моделирование мировой динамики». В этом проекте участвуют представители 10 академических институтов из трех отделений РАН и исследователи из МГУ. Ведущим институтом в этой подпрограмме является ИПМ, руководителем проекта – академик **В.А. Садовничий**, ответственными исполнителями – иностранный член РАН – **А.А. Акаев** и профессора **А.В. Коротяев** и **Г.Г. Малинецкий** (см. рис.3).

Пределы человечества. Культурный императив



Развитие химии после 1750: По оси ординат – среднее ежегодное число открытий с усреднением за десятилетие

Население:

$$\frac{dN}{dt} = aSN (1 - l)$$

Технологии:

$$\frac{dS}{dt} = bNS$$

Культура:

$$\frac{dl}{dt} = cSl (1 - l)$$

$N_{\text{пред.}} = 11,2 \text{ млрд.}$
 $S_{\text{пред.}} = \$340 \text{ трлн./год}$ ⁵

Рис.3

Из результатов проекта следует, что уже видны и экономические пределы человечества – судя по всему, глобальный валовой продукт нашей цивилизации не превысит 140 трлн. долларов в год (против нынешних 83 трлн.). В этом подходе развивается культурный императив, в котором в качестве параметров порядка выступают и численность населения планеты, и уровень технологий, и культура (её можно в среднем оценивать уровнем образования – числом лет, отданных учёбе).

Интуитивные представления рисуют нам безбрежные горизонты развития науки, грандиозные перспективы процесса познания. Но и это не соответствует действительности. Сотрудник Института химической физики РАН профессор **Олег Валентинович Крылов** проанализировал динамику самой развитой и успешной естественной науки – химии – с 1750 года по начало XXI века. Бессмысленно считать общее число статей – компьютеры, ксероксы, интернет, система грантов сделали информационный шум очень громким. Поэтому он проанализировал химическую энциклопедию, выделил наиболее важные химические открытия, которые и определили дальнейшее развитие (выявил «скелет науки»), а затем построил зависимость среднего ежегодного числа открытий с усреднением за десятилетия. Построенная картина показывает, что пик развития этой области знания давно пройден (он приходился на годы, предшествовавшие Второй мировой войне и эпохе разработки ядерного оружия). Такие зависимости были построены и для отдельных областей химии. Пик развития органической химии, например, был пройден в 1900 году, биохимии – в 1960-м (см. рис.3)

По сути дела, эта область знания, как и многие другие, оказалась в таком же положении, как география после открытия всех континентов. Нужно либо менять предмет изучения (например, в XX веке в основном трудами советских исследователей была создана подводная география Земли), либо более глубоко осмысливать открытое, не надеясь на революционное приращение знаний. Это совсем другая научная стратегия, иные приоритеты, технологии, цели, ожидания...

Однако такое положение дел даёт и совершенно новые возможности. Возможности синтеза, реализации больших проектов, инженерной деятельности в высоком понимании этого слова. Впервые за многовековую историю у человечества появляется возможность реального социального, технологического, экологического выбора. И, конечно, самый впечатляющий и грандиозный проект – конструирование будущего, выбор своей исторической траектории.

Над этими задачами напряженно трудятся десятки тысяч человек во многих развитых странах. В основе их поисков обычно лежит теория выдающегося русского экономиста **Николая Дмитриевича Кондратьева**. В соответствии с ней в основе экономического развития лежит смена технологических укладов. Кризисы, войны, смены партий у власти, стилей в искусстве, мод и исследовательских программ определяются циклами технологического развития.

Синергетика, сложность, новая реальность



Н.Д. Кондратьев
(4.03.1892-17.09.1938)



Уравнение А. Акаева:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} - \left[\sigma_0 - \frac{4}{3} \kappa \lambda v^3 \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right] \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 \left[1 - \frac{s(1-s)}{\kappa} i \right] y = \varphi(t)$$



- Большие волны
- Смена технологических укладов
- Шестой технологический уклад – биотехнологии, проектирование живого, высокие медицинские технологии

6

Рис.4

То, что циклическая динамика мировой экономики – та реальность, с которой нельзя не считаться, наглядно показывает распределение по времени возникновения крупнейших американских компаний (см. рис.4). Из этого распределения видно, насколько сильно меняется «экономическая погода» – например, в период с 1820 по 1825 год, шансов создать компанию, которая два века спустя превратится в экономический гигант, практически не было. А в период с 1904 по 1918 год, напротив, имелись прекрасные возможности, чтобы начать большое дело.

Такая динамика в простейшем приближении хорошо описывается с помощью модели **Акаева-Садовниченко** (см. рис.4), где Y характеризует отклонения от тренда в законе изменения глобального валового продукта. Развитием подобных подходов, технологическим прогнозированием заняты сотни мозговых центров в развитых странах. Среди них особое место занимает Институт сложности в Санта-Фе (США).

Научными лидерами этого института являются нобелевские лауреаты – по физике **Мюррей Гелл-Манн** (выдвинувший в своё время гипотезу кварков) и по экономике **Брайен Артур** (выявивший роль положительной обратной связи в высокотехнологичных кластерах и, в частности, в становлении и развитии Кремниевой долины – основы информационно-телекоммуникационной индустрии США). На основе этого центра сложилась гигантская сетевая структура по всему миру, лейтмотивом деятельности которой является проектирование будущего, анализ тех воздействий, которые через годы и десятилетия смогут изменить ситуацию в желательном направлении. Подобная работа активно ведется в Германии, в Японии, в ряде других стран, непосредственно влияя на их политику, на элиты и массовое сознание. Такая работа должна вестись и в России.

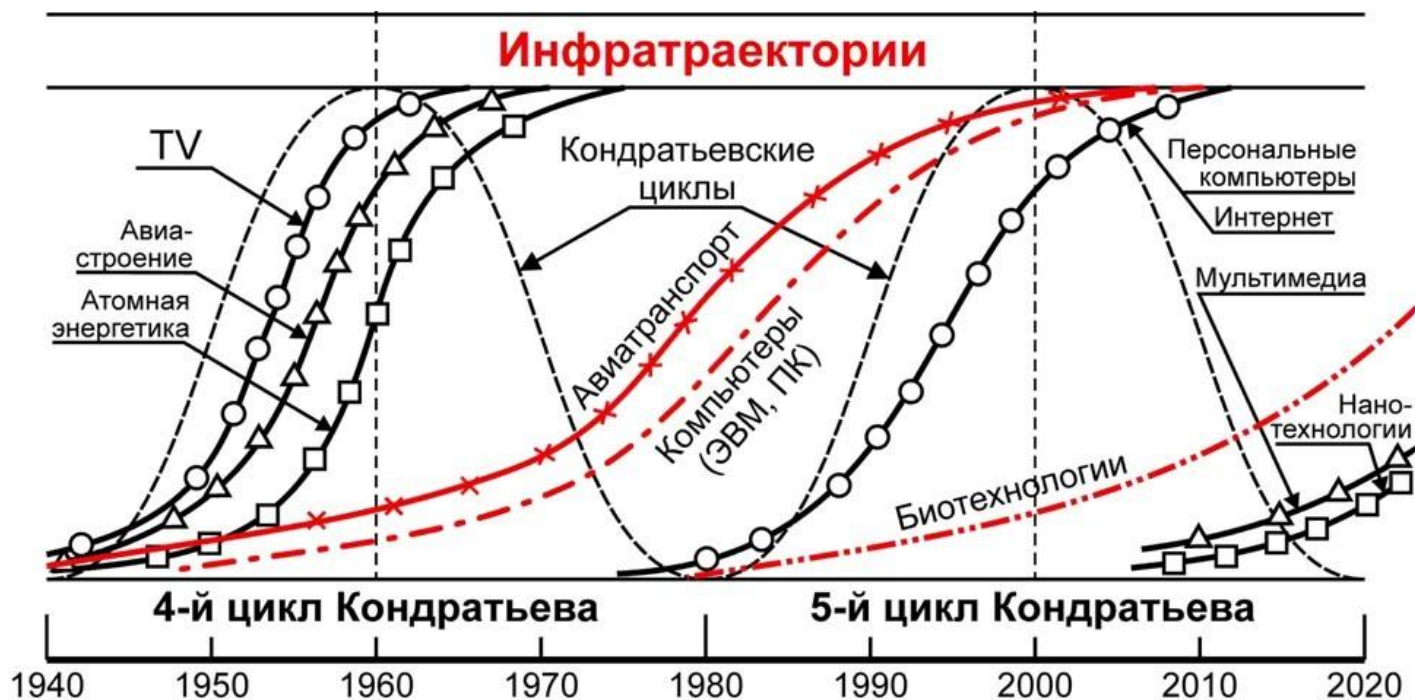


Рис.5

Существует естественный цикл развития макротехнологии (см. рис.5). Вначале развитие фундаментальной науки, идей, которые могут получить практическое воплощение, подготовка кадров, организация опытно-конструкторских разработок (10–15 лет), создание технологий, быстрое совершенствование созданного, производство и начало реализации появившихся возможностей (10–15 лет) и, наконец, диффузия появившихся инноваций во всю техносферу и экономическую систему (10–15 лет). В итоге 30–45 лет. Это развитие описывается так называемыми инфратраекториями (см. рис.5), показывающим, какая часть потенциальной «экономической ниши» для данной макротехнологии уже освоена, какая часть пути в развитии и рассматриваемой отрасли уже пройдена, в какой фазе цикла она находится. Это чрезвычайно важно, так как экономическая, технологическая, образовательная, инновационная политика в разных странах кардинально зависят от фазы развития рассматриваемой отрасли.

Заметим, что разные отрасли развивались в разном темпе – относительно быстро авиастроение, атомная энергетика, телевидение, интернет. И относительно медленно отрасли, меняющие инфраструктуру современного мира – авиатранспорт, компьютеры, биотехнологии, – переходя из одного кондратьевского цикла в другой.

И Бог и черт в деталях – для конкретного и содержательного прогноза, анализа и предвидения здесь требуется большая аналитическая работа, системный анализ и математическое моделирование.

Обратим внимание на то, что и логика, и характерные времена, и механизмы инновационного развития здесь очень существенно отличаются от обычной экономической деятельности. В обычной «быстрой» экономике характерные вложения, развитие производства или иные операции рассчитаны на месяцы, в лучшем случае на несколько лет. В инновационном секторе, где создается и используется новое, приходится ориентироваться и планировать с горизонтом в несколько десятилетий. Это требует и совершенно других стратегий, и алгоритмов, и кадров. Для ведения обычного предпринимательства, как правило, получают второе высшее образование по специальности мастер делового администрирования (Master Business Administration). В то время как развитие высокотехнологичного сектора требует мастера инновационного администрирования (Master Innovation Administration). Программы и курсы для подготовки таких специалистов были разработаны в Научно-образовательном центре ИПМ и востребованы в ряде регионов России.

Направление экономической науки, связанные со сменой технологических укладов, было развито выдающимся экономистом, последователем **Н.Д. Кондратьева И. Шумпетером** (1883–1950) (см. рис.6). Именно смена технологических укладов и является движущей силой технологического и социального прогресса, многих кризисов, и, в частности, того, который сейчас переживает современный мир.



И. Шумпетер
(1883-1950)

Технологические уклады



VI технологический уклад

- Биотехнологии
- Нанотехнологии
- Вложения в человека
- Новое природопользование
- Новая медицина

V технологический уклад

- Компьютеры
- Малотоннажная химия
- Телекоммуникации
- Электроника
- Интернет

IV технологический уклад

- Массовое производство
- Автомобили
- Самолеты
- Тяжелое машиностроение
- Большая химия

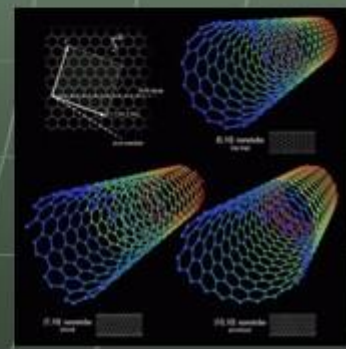


Рис.6

В самом деле, освоение возможностей IV технологического уклада (локомотивными отраслями которого были тяжелое машиностроение, большая химия, массовое производство, автомобилестроение, авиастроение и несколько других) было основой советской индустриализации, форсированного промышленного развития. Реализация этой программы позволила стране выстоять в Великой Отечественной войне, стать сверхдержавой, добиться паритета с США в области стратегических вооружений.

Возможности, предоставленные V технологическим укладом (связанные с развитием компьютеров, малотоннажной химии, телекоммуникаций и интернетом), были упущены нашей страной, втянувшейся в бесплодные разрушительные реформы.

Сейчас весь мир готовится к технологическому скачку (судя по нашим прогнозам, это будет происходить в 2014–2018). Локомотивными отраслями рождающегося VI технологического уклада, вероятно, станут биотехнологии, нанотехнологии, робототехника, высокие гуманитарные технологии, новая медицина, новое природопользование. Сейчас, именно сейчас, решается, какие отрасли, страны, регионы, корпорации станут ведущими, а какие ведомыми на новом витке технологического развития. От эффективных, продуманных действий в этой сфере сейчас зависит будущее нашей цивилизации – мира России.

Системная причина охватившего мир кризиса состоит в том, что отрасли V технологического уклада уже не дают прежней отдачи и не требуют тех гигантских финансовых средств, которые сегодня есть в мире. В самом деле, в России сегодня уже более 150 миллионов мобильных телефонов. Реклама может заставить приобрести людей по два мобильных телефона. Но заставить приобрести по три, видимо, уже не удастся. В этой отрасли произошло насыщение. И производство мобильных телефонов с переднего края технологического развития быстро дрейфует в направлении аутсайдерских технологических ниш.

С другой стороны, отрасли VI технологического уклада ещё не созрели для массивованного вложения средств. И это межвременье естественно приводит к кризису. Поэтому нынешний период крайне важен. Именно в это время отбираются и проходят обкатку те нововведения, под флагом которых будет происходить развитие до 2040–2050 годов. Именно сейчас мы находимся в точке бифуркации в технологическом пространстве и имеем реальные возможности многое изменить.

Если этого не сделать, то страна будет развиваться по инерционному сценарию, и место экономических, технологических факторов на этих больших, исторических временах займут цивилизационные факторы. В течение последних 20 лет, сотрудник Физического института им. П.Н. Лебедева, профессор **Д.С. Чернавский** развил динамическую теорию информации. Ключевым в этой теории становится понятие ценной информации – таких сведений, знаний, навыков, которые помогают носителям этой информации выжить и передать её потомкам. Таковой информацией могут быть языки, верования, валюты, моральные нормы, смыслы и ценности, цивилизационные проекты и образы будущего. Уравнения теории позволяют выяснить, как будет происходить распространение информации по территории со временем.

В рамках этой теории сотрудником ИПМ **А.С. Малковым** был представлен геополитический сценарий развития России до 2030 года. Вновь будем иметь в виду инерционный сценарий. Наиболее вероятные зоны влияния различных цивилизационных проектов и, соответственно, осуществляющих их стран показаны на рисунке 7.



Рис.7. Инерционный вариант развития России-2030

Здесь рассматривается вариант, когда войска не вводятся на территорию России, и противостояние имеет место в экономической, демографической сфере и главное – в пространстве смыслов, ценностей, информации, цивилизационных проектов. Сахалин и Курилы в этом варианте отходят к Японии, возникает зона китайского влияния на Дальнем Востоке. Чукотка, Камчатка, Восточная Сибирь, огромные территории Севера, часть Западной Сибири оказывается в зоне американского влияния. (Уже сейчас в американских газетах пишут о возможности и желательности покупки Восточной Сибири, европейские политики начали говорить о том, что огромные минеральные богатства России за Уралом – достояние всего человечества, Китай выражает готовность и желание осваивать Северный морской путь, если наша страна не может и не хочет это делать сама). В Поволжье и на Кавказе возникают мусульманские анклавы. Появляется Северо-Западная республика.

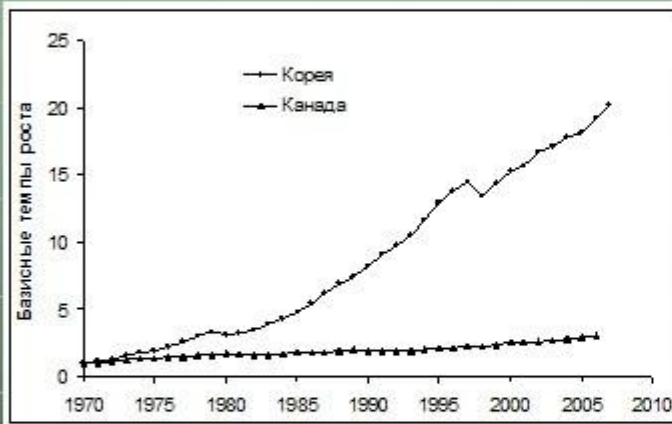
Из проведенного в рамках упоминавшегося проекта исследования вытекает, что для того, чтобы развитие пошло по другому сценарию, нашей стране нужны сверхусилия, обретение будущего, экономический, технологический, инновационный прорыв. Мы должны в полной мере воспользоваться теми возможностями, которые представляют технологии VI уклада.

Если не сделать этого, то нашей страны очень скоро не будет. Располагая 30% всех природных богатств мира, Россия производит немногим больше 1% мирового валового продукта... При таком положении дел и в условиях беспощадной схватки за ресурсы, которой грозит обернуться XXI век, шансов на длительное благополучное существование у нашей страны нет.

Не менее убедительными, чем прогнозы, модели, системный анализ, являются образцы, примеры развития стран-аналогов. И такие примеры есть. Примерно в таком же положении, как сейчас Россия, в 1970-х годах, в начале развития V технологического уклада находились Канада и Южная Корея (см. рис.8). Канада добилась больших успехов в предыдущие годы, в дальнейшем довольствовалась невысокими базисными темпами роста экономики, и сохранила свою роль экономического и ресурсного сателлита США. В то же время Южная Корея вложила сверхусилия и совершила экономический и технологический рывок. Это потребовало огромных вложений в экономику и резкого подъёма образовательного, культурного, научного уровня населения страны. В течение ряда лет доля инвестиций в валовом внутреннем продукте (ВВП) страны превышала 35%. Такие показатели даже представить трудно. Сеул стал первым городом мира по числу физиков на душу населения, а южнокорейские школьники передвинулись в лидирующую группу по части физико-математических олимпиад.



Сверхусилия и структурные сдвиги



Правила «одной пятой» и «половины»:

- Отраслевая структура = обрабатывающая промышленность 20% + финансы 25% + услуги 22%
- Обрабатывающая промышленность = высокотехнологичная¹ 20% + средневысокотехнологичная 30%

Рис.8

Южнокорейское экономическое чудо было связано и с большим проектом, направленным на возрождение страны, и с беспощадной борьбой с коррупцией и вывозом капитала из страны. Кроме того, тем, кто проектировал будущее Южной Кореи, и тем, кто воплощал их замыслы в жизнь, удалось найти социально-экономические структуры, адекватные массовому сознанию и ожиданиям общества. Такими структурами оказались вертикально интегрированные компании – чеболи. В них была реализована практика пожизненного найма и забота о всех сторонах жизни работников. Национальные традиции и образы массового сознания не уничтожались, а выявлялись и эффективно использовались.

В рамках проекта, выполненного в ИПМ, было показано, что «экономическое чудо» – это бифуркация в экономической системе, позволяющая перевести экономику из низкопродуктивного в высокопродуктивное состояние. Выяснено, при каком положении «ручек» – управляющих параметров – это будет происходить.

Другой эффективный инструмент, который также успешно использовался в Южной Корее и в других странах – лидерах экономического развития – это управление структурными сдвигами. Оптимальная структура, судя по опыту ряда стран Организации по экономическому сотрудничеству и развитию (ОЭСР) подчиняется «правилу одной пятой и половины»:

- Экономика = 20% обрабатывающей промышленности + 25% финансы + 22% услуги + остальное;
- Обрабатывающая промышленность = 20% высокотехнологичный сектор + 30% средневысокотехнологичный сектор + все остальное.

Структура экономика России пока очень далека от таковой.

России предстоит очень быстро пройти очень большой путь...

Многих студентов, исследователей, инженеров радует и успокаивает факт создания «РоснаноТеха». «Что-то делается. Значит и мы двинулись к высоким технологиям», – часто приходится слышать такие мнения. То, что внимание общества, властей, предпринимателей, ученых привлечено к классу технологий, которые, видимо, сыграют очень важную роль в VI технологическом укладе, от радно. И эта часть деятельности корпорации заслуживает всяческой поддержки (сейчас, по данным социологов лишь 2% граждан России представляют, что такое нанотехнологии, и такое положение дел надо менять).

Но очень важен в этом, как и во многих случаях, не процесс, а результат. Результат же этого проекта (как и других программ такого типа) определяется тем, насколько точно и реалистично продумана стратегия, определена цель и точно выбран путь её достижения. И уже на этом этапе начинаются проблемы, о которых мы регулярно беседуем с коллегами из «РоснаноТеха».

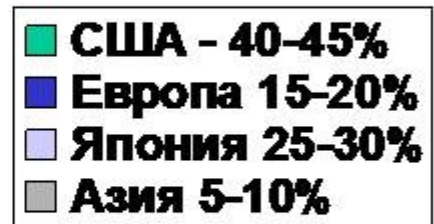
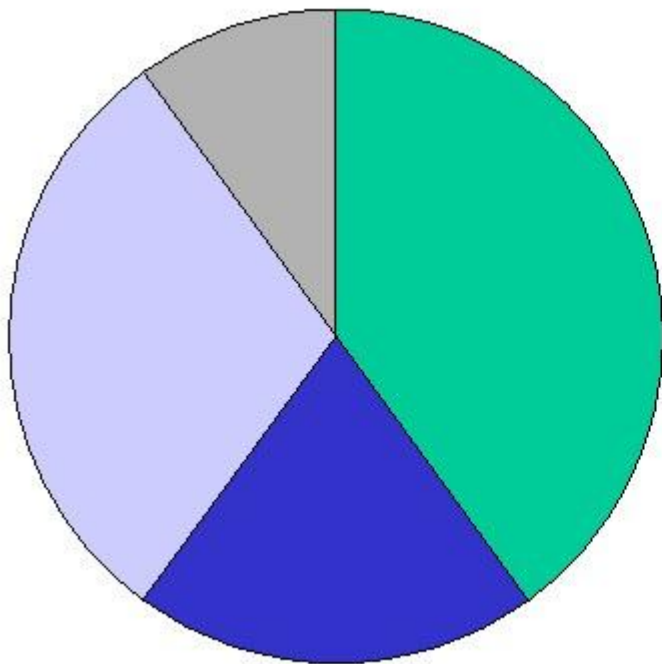


Рис.9

Мировой рынок нанотехнологической продукции сейчас разделен так, как показано на рис 9. Доля России здесь пренебрежимо мала. Естественно спросить себя, с какой продукцией мы оттесним кого-нибудь из лидеров и за счет каких конкурентных преимуществ (если уж говорить на экономическом языке, который предпочитают в «Роснанотехе»). Нет ответа.

Другой вопрос, ещё более острый. Посмотрим, в каких отраслях используются достижения нанотехнологии (см. рис.10). Этим отраслей в силу междисциплинарности наноауки, наноинженерии, нанотехнологий много. Нанотехнологии выступают как приправа к основному блюду. Но этого-то блюда, самих отраслей, в России-то пока и нет. Поэтому, решив готовить нанотехнологическую приправу, надо определить какую отрасль параллельно следует создавать. Это вопрос государственного планирования, выбора промышленной и технологической политики. В СССР этим занимался Госплан и ряд министерств, в США это делают влиятельные и эффективные государственные и негосударственные структуры. В современной России подобными проблемами не занимается никто, в том числе и «Роснанотех».



Рис.10

Мировой и отечественный опыт показывают, что бессистемные инновации, как правило, не приводят к значимым социально-экономическим результатам в обозримые сроки.

Очень часто в дискуссиях о нанотехнологиях в России сторонники «рыночного подхода» («пусть прорастет что угодно, лишь бы за это деньги платили») кивали на опыт США, которые, по их мысли, «развивали всё». Другие эксперты, в том числе и автор этих строк, считали, что очень скоро выбор будет сделан, намечено магистральное направление и приняты соответствующие государственные решения.

Именно это и сделал **Барак Обама**, выдвинув энергетическую инициативу США (см. рис.11). В соответствии с ней акцент должен быть сделан на солнечной энергетике. Огромные пустыни Аризоны и Невады должны быть покрыты солнечными батареями. В соответствии с выдвинутым планом 69% всей электроэнергии и 35% всей тепловой энергии к 2050 году должна будет обеспечиваться солнечной энергетикой. Именно под это будет, в первую очередь, «заточена» американская нанотехнологическая программа.



Рис.11

Масштабы проекта грандиозны. На рисунке 11 показаны нынешний «углеводородный бюджет» США на 2007 год, прогнозируемые показатели при сохранении нынешнего типа энергетики (с планированием у американцев, в отличие от нашего экономического блока, все в порядке) и при условии реализации энергетической инициативы **Обамы**.

Стоимость этого проекта – более 500 миллиардов долларов, из которых 150 миллиардов будут вложены в этот президентский срок.

При этом **Обама** проводит параллель между нынешней американской энергетической инициативой и программой «Аполлон». Последнюю он оценивает следующим образом: «Громадные инвестиции в науку и технологии, в образование и обеспечение исследований создали мощный поток любопытства и творчества, принесшего неисчислимую пользу. Мы должны повторить это». Обратим внимание на то, что акцент делается не на прибылях, а на творчестве и воплощении мечты. Эта программа дополняется большой образовательной инициативой. Результатом последней должно стать повышение общего уровня американского школьного образования, отбор и продвижение талантливых ребят на ключевые посты в науке, предпринимательстве, государственном управлении. Американские школьники должны более глубоко осваивать физику и математику и занять первые позиции среди своих сверстников в мире.

Обратим внимание на разительное противоречие между американскими образовательными инициативами и основными направлениями реформирования российской средней и высшей школы (введение единого государственного экзамена (ЕГЭ), переход к системе бакалавр-магистр с разрушением сложившейся в России системы высшего образования, уход государства из образования и перевод его на рыночные рельсы, попытка реализации принципа «Деньги следуют за учениками» и ряд других инициатив Высшей школы экономики, которые уже нанесли огромный урон российскому образованию, а значит и будущему нашего отечества).

О подготовке кадров, которым предстоит увидеть и воплотить в жизнь возможности VI технологического уклада, следует сказать особо. К 2015 году по существующим прогнозам рынок нанотехнологической продукции должен превысить 1 трлн. долларов. Значительная часть таковой будет производиться в США. По американским оценкам это потребует подготовки около 800 тысяч специалистов для работы в этой области. В соответствии с задачей, поставленной президентом **Д.А. Медведевым**, к этому времени Россия должна владеть 4% этого рынка. Несложные оценки показывают, что для этого в нашей стране необходимо готовить не менее 30 тысяч специалистов. Заметим, что, в соответствии со своим уставом, государственная корпорация Роснано с фундаментальными исследованиями, прикладными разработками, опытно-конструкторскими работами и образовательной деятельностью не занимается и их не поддерживает.

Готовятся специалисты подобного профиля достаточного высокого уровня в России? Готовятся. В качестве примера можно привести факультет наук о материалах – МГУ им. М.В. Ломоносова, созданный и возглавляемый академиком **Ю.Д. Третьяковым**. Этот факультет готовит по 25 человек в год – 175 человек за 5 лет... По-видимому, реализация нанотехнологического проекта России требует совсем другого, гораздо более серьезного отношения к подготовке кадров со стороны государства. Опыт подготовки инженерных и научных кадров, которые были необходимы для технологического рывка, в нашей стране имеется.

Если рассматривать процесс развития как прохождение ряда бифуркаций, то естественно спросить себя, какие бифуркации, связанные с нанотехнологиями, будут проходить в ближайшем будущем. Какой выбор делается сейчас? Что может существенно изменить нашу реальность и открыть двери в будущее?

Обратим внимание на несколько возможностей. Первую из них условно можно назвать переходом к «прозрачному миру». В самом деле, большие технологические сдвиги часто связаны не с экономической выгодой, а с решением насущных проблем жизни общества (экономика скорее подстраивается и обслуживает, являясь на этом переломе ведомой, а не ведущей переменной). Обратим внимание на одну из насущных проблем российского общества. Известен следующий исторический анекдот. Великий русский историк **Н.М. Карамзин** вручал царю свою книгу «История государства российского». Царь задал историку вопрос, в чем же главная нить российской истории. «Воруют-с», – последовал ответ.

Однако великий историк, видимо, и вообразить не мог, в какой ситуации окажутся граждане государства российского несколько столетий спустя. По данным Генеральной прокуратуры РФ, объем взяток, даваемых и принимаемых в России, сравним с национальным бюджетом. По её оценкам более 90% всех лекарств, продаваемых сейчас под видом импортных препаратов, являются фальсификатом. Могут ли нанотехнологии помочь решить эту острую проблему, которая приобрела для страны характер национального бедствия?

Могут! Вспомним про взрывы домов, машин, излюбленные методы террористов в недавние годы. И вдруг всех этих напастей стало значительно меньше. Мудрость и политическая воля руководителей принципиальна, однако очень важную роль сыграли и технологии. Микродобавки во взрывчатку позволили безошибочно определять по микрочастицам, оставшимся после взрыва, завод-производитель и партию взрывчатки... Это немедленно сузило коридор возможностей злоумышленников.

В России есть несколько коллективов, – один из них в Ярославском государственном университете им. П.Г. Демидова – которые имеют технологию нанесения и считывания нанометок. Такие метки могут наноситься на разные предметы, от запасных частей автомобилей и самолётов до драгоценных камней, искусственных хрусталиков и главное – таблеток. Практически все товарные потоки в стране можно сделать «прозрачными», что поможет очень быстро навести порядок. Было бы желание!

И здесь возникает общий, не только для России, вопрос. Современные технологии, включая нанотехнологии, дают возможность многое тайное сделать явным. В самом деле, даже выключенный мобильный телефон позволяет в каждый момент времени зафиксировать местонахождение человека. Достаточно простая система позволяет фиксировать все передвижения, включая скорость и ускорение данного автомобиля. Эта информация помещается на обычной флешке. При сопряжении этой информации с данными уже созданных геоинформационных систем (ГИС) и подобными данными от других автомобилей делает это «прозрачным» всё дорожное движение. Системы глобального позиционирования уже позволяют в массовом порядке отслеживать движение большегрузных автомобилей по дорогам Западной Европы.

Несколько исследовательских групп, анализируя останки башен-близнецов, обнаружили, микроследы взрывчатки, находящейся на вооружении спецподразделений американской армии. Тайное быстро становится явным.

Достаточно простые системы, выглядящие как кулон на шее, уже позволяют фиксировать в реальном времени происходящее с человеком, записывая всё, что он говорит, всё, что ему говорят. Ближайшее будущее за системами постоянного непрерывного мониторинга организма и фиксации всего, что он видит... Большие усилия вкладываются в то, чтобы сделать «прозрачными» и фиксируемыми ощущения и мысли.

Здесь мы подходим к очень важному, метафизическому вопросу. В какой мере для человека важна его личная свобода, индивидуальное пространство, право на частную, не фиксируемую никем жизнь? В какой мере совместимы с безопасностью общества и техносферы даже не свобода действий, слова, собраний, а свобода мысли? До сих пор наличие ряда свобод считалось краеугольным камнем нашей цивилизации и основой для развития. Но, может быть, в наступающей эпохе всё станет иным? Вопросы, которые в XX веке поднимали авторы множества антиутопий, развитие технологий ставит в конкретную практическую плоскость.

Этот круг проблем мы обсуждали на секции междисциплинарных и конвергентных технологий НОР в Институте философии 08.10.2009. В выступлении академика **В.С. Стёпина** и других ведущих философов звучали слова о том, что действительно технологическая антропология ставит перед человечеством и вечные, и совершенно новые проблемы. Но фиксировать наличие проблем и вести неспешные академические дискуссии сегодня недостаточно. Реальность требует от исследователей, экспертов, от всех нас поисков решений и ответов.

Время выбора уже пришло... Нынешнюю ситуацию очень точно отражает картина, написанная в 1882 году известным французским художником **Ж. Лефевром** – «Пандора с ларцом». После того как ларец был открыт в мир хлынули беды, горести, недуги. И на дне ларца осталась лишь надежда. Очень не хотелось бы повторения этого вечного сюжета в сфере нанотехнологий.

Одной из главных инноваций 2008 года стала инициатива, выдвинутая создателем фирмы Google (одна из наиболее популярных поисковых служб и Интернете) **Сергеем Брином** и руководителем фирмы 23 andme **Линдой Вэй**. Эта

инициатива – индивидуальная расшифровка геномов и их выкладывание в Сети. Такая инновация может стать революционной. Только пока неясно, открывает ли она двери в сказку или ящик Пандоры. Мнения экспертов разделились.

В своё время на юбилей нобелевского лауреата **Дж. Уотсона**, открывшего основу строения ДНК – двойную спираль – был сделан подарок – расшифрован его геном. Получен текст генома, содержащий около трех миллиардов букв А, Т, Г, Ц, который легко помещается на флешку. Тогда этот подарок обошелся более, чем в 1 миллион долларов. Сейчас в США такая диагностика стоит несколько тысяч долларов. Имеется национальная программа, цель которой – сократить эту стоимость до 1 тысячи долларов. Это позволит сделать такой анализ массовым.

Пока каждому, решившему выложить свой геном в сеть, исследователи могут сказать немного (обратив внимание на предрасположенность или подверженность сотне с лишним заболеваний). Однако возможность сравнительного изучения геномов и сопоставление их с историями болезней сулит фантастически быстрый прирост знаний в этой области.

Почему это может быть дверью в сказку? Потому что это меняет отношение людей к своему здоровью. Они смогут сейчас предпринять усилия, чтобы парировать угрозы, которые возникнут через 20–30 лет. Кроме того появляется возможность изготавливать лекарства индивидуально, на основе знаний генома данного пациента.

Почему это может стать ящиком Пандоры? Это ключ к изготовлению не только лекарств, но и оружия – расового, этнического, ориентированного на конкретные группы в человеческой популяции. Пока мы можем прочитать очень немного из записанного этими 3 с лишним миллиардами букв... ДНК – видимо, самая сокровенная информация о человеке, не сравнимая с письмами, прослушками, видео или тестами IQ. В сети она оказывается достоянием всех.

Несколько лет назад **Дж. Уотсон** посетил Москву. Его лекция в Доме ученых прошла с огромным успехом. По его словам, успешно оперировать на уровне ДНК в лечебных целях (в частности, для лечения ряда психических заболеваний) мы не научимся в ближайшие лет 50. Однако очень скоро, проанализировав геном ещё не родившегося младенца, мы сможем сказать, кто придёт в наш мир – великий музыкант или выдающийся спортсмен, маньяк или посредственность. Одно это может радикально изменить нашу цивилизацию... Мы окажемся именно в той ситуации, которая описана во множестве антиутопий.

Другой поворотный пункт, который сейчас проходит человечество. Спросим себя – какой период из прошлого наиболее близок к ситуации нынешнего кризиса с его глобализацией, дорогими энергоносителями, слабеющим доминантом и быстро растущими и набирающими силу бывшими странами-аутсайдерами.

Теория американских исследователей **Л.Г. Бадалян** и **В.Ф. Криворотова** (мы в ИПМ активно сотрудничаем с этими учеными в рамках проекта, связанного с построением математической истории) дает ответ на этот вопрос. В соответствии с этой теорией осмысление прошлого, стратегический прогноз требуют комплексного, системного анализа техноценозов (или, для краткости, ценозов), включающих осваиваемую и используемую территорию, Главный энергоноситель, используемые экономические и управленческие технологии, характеристики «человеческого капитала», ключевые с точки зрения выживания и развития в данных природно-климатических условиях.

Конец XIX – начало XX века. Мир, как и сейчас, однополярен. Над владениями доминанта – Великобритании – не заходит солнце. Сделки на все стратегические товары заключаются в Лондоне и только в Лондоне. Доминирование обеспечивается контролем за добычей, распределением и потоками главного энергоносителя той эпохи – угля.

Но эра угля кончается, мировая угольная инфраструктура становится всё более дорогой, а длань доминанта всё более тяжелой. Это приводит к нестабильности мировой финансовой системы. Появляются альтернативы – нефть и электричество, на которые ставят США, Германия, отчасти Россия.

Не в силах выдержать конкуренцию в экономическом пространстве доминант делает ставку на военную силу. Форсировано развиваются военные технологии. Вспомним **Альфреда Нобеля**, сделавшего капитал на динамите и других боеприпасах. Торпеды, танки, аэропланы... Чтобы заменить экономику угля на экономику нефти и по-новому распределить соответствующие геополитические роли, потребовалось две мировые войны...

Начало XXI века – тот же сюжет в других декорациях. Однополярный мир. Слабеющий доминант США, могущество которого основано на контроле за нефтяными потоками и ценами на нефть. Потребляя 40% мировых ресурсов, эта страна производит только 20% мирового валового продукта. Это порождает нестабильность мировой финансовой системы (при мировом ВВП в 80 трлн. долларов в год объём финансовых инструментов 800 трлн... У США нет шансов расплатиться со внутренними и внешними долгами. Мировой печатный станок, которым эта держава пока монополично владеет, оказался не панацеей), а также ставку на военную силу. В настоящее время оборонный бюджет США превышает военные бюджеты всех остальных стран мира вместе взятые (см. рис.12).

Рис.12

Несмотря на кризис, ключевые оборонные программы Пентагона не были остановлены (несколько месяцев назад, на воду был спущен очередной ударный авианосец «Джордж Буш»), некоторые переориентированы на более эффективные виды оружия.

И вновь человечество и главные игроки на мировой арене играют в ту же игру, что и весь XX век. Высокие технологии становятся инструментом для того, чтобы достичь военного превосходства. Вопросы принципиальные, сущностные, гуманитарные вновь и вновь пробуют решить на технологическом уровне, совершенствуя щит и меч. В настоящее время военные и политики всё чаще делают ставку на нанотехнологии.

И по-видимому, вновь и вновь эта стратегия не приведет к успеху ни обладателя более совершенного меча, ни всё человечество. Одним из самых мудрых решений XX века, к которому непосредственное отношение имел первый директор ИПМ, академик **М.В. Келдыш** – решение об ограничении стратегических вооружений и об отказе от систем противоракетной обороны. Опыт показывает, что проще, разумнее, эффективнее договориться об ограничении вооружений, которые пока не созданы.

По-видимому, подобное время уже настало для сферы нанотехнологий, и пора договариваться о том, чтобы не создавать ряд видов оружия и не переносить гонку вооружений на наноуровень.

Диалектика развития систем оружия и военных реформ показывает, что в этой области, к сожалению, очень легко, но совершенно недопустимо слишком далеко отставать от мировых лидеров. И в этой связи множество вопросов возникают в связи с радикальной военной реформой, проводимой под руководством министра обороны РФ, господина А.Э. Сердюкова (см. рис.13). В соответствии с обнародованными показателями этих преобразований количество частей в сухопутных войсках должно сократиться к 2012 году примерно в 10 раз, в военно-воздушных силах вдвое, в военно-морском флоте вдвое, в ракетных войсках стратегического назначения в 1,5 раза. Радикальному сокращению уже подверглись военные наука и образование, ликвидированы (за небольшим исключением) военные кафедры в гражданских вузах. Это создает достаточно неустойчивую напряженную ситуацию, поскольку по обычным вооружениям, по оценкам экспертов, военный потенциал России по отношению к суммарному военному потенциалу стран-членов НАТО находится в отношении 1:50 – 1:60. Сокращения ядерных вооружений в соответствии с планом, предложенным России **Б. Обамой**, по оценкам многих экспертов вообще могут взорвать паритет, пока существующей в этой области.

Рис.13

Поэтому естественно спросить себя, на какой технологической и кадровой основе будет проводиться модернизация российской армии? Очевидно, что и возможности, связанные с нанотехнологиями и специалисты, способные увидеть такие возможности и воплотить их в реальность, должны быть востребованными. Пока этого не видно. Но, возможно, ситуация вскоре изменится или уже изменилась.

Другая важнейшая для России сфера, под которую также должно быть «заточены» отечественные нанотехнологии. Это мониторинг и обеспечение безопасности техносферы, которая уже подошла к опасной черте (см. рис.14). Очень велик износ основных фондов – в угольной и горнодобывающей промышленности 80–90%, в электро и теплоэнергетике – 46%, в жилищно-коммунальном комплексе 40%. В области нефтепереработки 80%, на химических заводах 60–100%, на атомных станциях 60–80%. На последних в среднем происходит более 40 аварий в год. Средний возраст оборудования в РФ –21,5 год по сравнению с 9,8 годами в СССР (в 1990 году) или 9 годами в нынешних развитых странах мира.

Рис.14

С другой стороны, мониторинг и прогноз бедствий и катастроф является не только гуманной, но и очень выгодной сферой деятельности. Мировая статистика показывает, что каждый рубль, вложенный в прогноз и предупреждение бедствий и катастроф, позволяет сэкономить от 10 до 100 рублей, которые пришлось бы вложить в ликвидацию или смягчение последствий уже произошедших бед. Мировым сообществом, занимающимся управлением риском, с 1994 года был взят курс на мониторинг, прогноз и предупреждение бедствий и катастроф. Нанотехнологии дают здесь большие возможности и, конечно, они должны быть использованы в полной мере.

Ещё один поворотный пункт и вызов, ответ на который человечеству предстоит дать в ближайшие годы. Выдающийся философ **Фридрих Ницше** во второй половине XIX века предрекал эпоху прихода «сверхчеловека». При этом приставку «сверх» он относил к сфере морали, этики, к социальным стратегиям и целям этого «нового человека».

Междисциплинарная парадигма NanoBioInfoCognito, которая становится магистральным путем развития исследований и разработок, переносит этот круг метафизических, экзистенциальных проблем в конкретную прикладную плоскость. При этом речь, прежде всего, идёт о расширении физических, психологических, интеллектуальных возможностей человека. Ряд исследовательских программ эту цель формулирует явно. Более того, многие эксперты полагают, что именно «расширение человека», создание сверхчеловека и является главной целью всей нанотехнологической деятельности, в то время как всё остальное является лишь «операцией прикрытия».

Источников, подталкивающих развитие именно в эту сторону, несколько.

- Военные программы. Уже давно понято, что самым слабым звеном в современной вооруженной борьбе является именно человек. Поэтому надо либо избавиться от него (большинство специалистов сходится на том, что пятое поколение истребителей будет последним, далее наступит эра беспилотников), либо модернизировать самого человека, наделив его сверхспособностями. Несколько лет назад на заседании Президиума РАН делал доклад профессор С.Д. Варфоломеев – один из ведущих специалистов в области биохимии и энзимологии. По его оценке, основная часть пути по направлению к созданию новых органов чувств человека уже пройдена учёным. И до первых практических результатов осталось 7–10 лет.
- Реабилитация больных различными недугами. Благородная цель сделать слепого зрячим, глухого слышащим, слабого – сильным- всегда была мечтой человечества. Но если можно кардинально изменить характеристики и возможности больного организма, то что же можно сделать со здоровым...
- Профессиональный спорт. Это не только гигантский полигон для рекламы мировых брэндов, это возможность сделать приемлемым и желаемым новые стандарты жизни. Многие виды спорта уже превратились в спорт достижений химических и биологических лабораторий...

Остановиться на этом пути далеко не просто. Поэтому возможности и риски происходящего развития в этом направлении стоит анализировать со всей серьёзностью. Стоит обратить внимание на несколько достаточно очевидных рисков, которые уже подробно рассматривались фантастами и футурологами, а сейчас детально анализируются мозговыми центрами США и ряда других развитых стран.

Один из рисков – новое неравенство. Люди при этом будут различаться не только способностями, материальным положением и социальным статусом, качеством жизни, но и её продолжительностью. Десятки дополнительных лет активной жизни можно будет купить. Такого острого неравенства человечество ещё не знало. Подобный конфликт – «короткоживущие» против «долгоживущих» в своё время анализировал советский фантаст **И. Ефремов**. В перспективе возможно расщепление человечества на несколько новых рас, что также рассматривалось фантастами, а сейчас активно обсуждается футурологами как вполне реальная перспектива.

Очевидная проблема, связанная с жизнеустройством. Как распорядиться появившимися возможностями, что будут делать здоровые, активные, способные жить люди? Чем их занять, или чем они сами себя займут? Давайте посмотрим на распределение работающих по сферам экономики в развитых странах. Чтобы прокормить население, сегодня достаточно

двоих из 100 пусть 15 человек из этой сотни заняты в сфере производства и 5 управления. Для чего нужны, и что же делают остальные? Имитируют трудовую активность и потребляют?

Эта проблема не новая. Представим себе, что явился волшебник и предложил удвоить продолжительность жизни, осуществить фаустовскую мечту о второй молодости... Что может быть желанней?

Но ведь именно это и было сделано в XX веке! В начале века средняя ожидаемая продолжительность жизни российских мужчин была близка к 30 годам. Сейчас при всех издержках реформ она вдвое больше. На что же уходят эти годы и возможности? По данным социологов, на важнейшее дело – общение с детьми, на их воспитание – граждане России тратят в среднем 45 минут в сутки, в то время как у телевизора они проводят более 3 часов 40 минут. Вместо полноценной собственной жизни они живут призрачной чужой. И далее, двигаясь по тому же пути, мы вновь столкнемся с тем, что наряду с технологическими и медико-биологическими проблемами возникают не менее сложные социально-психологические задачи, вопросы нового жизнеустройства и самой сущности человека. Неразумно строить дом, не имея вначале его проекта (и человечество осознало это много веков назад). По-видимому, сейчас та же ситуация складывается с будущим. Не продумав, не просчитав, не осмыслив по-настоящему его проект, мы очень рискуем.

Обращу внимание ещё на один «подводный камень» на пути «расширения человека». Работа с нелинейными системами показывает, что во многих случаях подобные объекты ведут себя парадоксальным, антиинтуитивным образом. Потянув за одну ниточку, мы можем вызвать целую лавину изменений. Медики регулярно предупреждают о побочных действиях различных лекарств. Совместный, синергетический эффект действия 5–6 средств (что не редкость в терапии) – вообще нерешенный вопрос, источник парадоксов и одна из причин того, что терапия по-прежнему оказывается на грани искусства, науки, ремесла.

Биологи и биотехнологи, вероятно, исходя из подобных соображений, всё чаще говорят о «проклятии Люцифера» – изменив один элемент человеческого организма, наделив его сверхвозможностями, мы рискуем получить неожиданные побочные последствия многократно превосходящие все положительные эффекты от нашего вмешательства.

По-видимому, нанотехнологии ждут ещё две революции. Возможно, они поджидают нас не в столь уж далеком будущем. В настоящее время главное место занимают наноматериалы с их удивительными свойствами и захватывающими дух перспективами. (Отчасти, именно это дает основание скептикам утверждать, что речь идет об очередной моде и PR-проекте) и что ничего нового в нанотехнологических инициативах нет.

Но следующий этап, с которым, вероятно, будет связана следующая нанотехнологическая революция – начало эры наноустройств, которые двигаются, взаимодействуют с окружающей средой и друг с другом, решают самостоятельно или в ансамбле весьма сложные задачи. Прикладная математика уже показывает, как много возможностей при этом откроется. Упомяну лишь некоторые её направления.

- **Многоагентные системы.** «Команды», «стаи», которые открывают новую главу и в моделировании, и в управлении, а со временем и в технологиях. И, конечно, в системах вооружений. Главная идея этого подхода вызывающе проста. Есть сущности, которые имеют набор правил, определяющих их динамику, их состояние и набор действий, которыми они могут пользоваться. По сути, каждая такая сущность – некоторая, порой довольно сложная, математическая модель. Область приложения таких моделей оказалась очень велика – от организации взаимодействия на поле боя до самоорганизации в сообществе компьютерных программ, от проблемы возникновения альтруизма в ходе биологической эволюции, до взаимодействия первобытных племен. Пионерские работы, связанные с целесообразным поведением и с играми конечных автоматов были сделаны ещё в 1970 в ИПМ в работах М.В. Цетлина и других учеников академика И.М. Гельфанда под знаменами кибернетики. Но сейчас-то всё это можно воплотить на совершенно другом уровне.
- **Клеточные автоматы.** Раньше студенты, а теперь и школьники знают о придуманной в 1970 году кембриджским математиком Джоном Конвеем игре «Жизнь». Её правила удивительно просты. Есть бесконечный лист одинаковых клеток. Клетки на этом листе бывают «живыми» или «мертвыми». Время дискретно Живая клетка становится мертвой на следующем шаге, если у неё меньше двух (смерть или жизнь) или больше трех (смерть от перенаселенности) живых соседей. Мертвая клетка «оживает» на следующем шаге, если у неё ровно три живых соседа.

Эта игра порождает множество разнообразных конфигураций – циклы, «планеры», «корабли», «крокодилы». «планерные ружья» и прочее. В свое время энтузиасты даже издавали журнал, посвященный этой игре. Но главное состоит в том, что эта игра эквивалентна машине Тьюринга – универсальной вычислительной машине, на которой принципиально возможно решение всех задач, доступных компьютерам.

Этот результат больше 30 лет воспринимался как теоретический парадокс. Ведь всё это имеет большой практический смысл, если сами элементы – клетки – имеют молекулярные или сравнимые с ними размеры. Тогда нечего подобного не было, но сейчас, весьма вероятно, такие объекты появятся.

Можно обратить внимание на «биологические вычисления» и, в частности, на ДНК-вычисления. Уже показано, что простейшие логические задачи могут решаться набором молекул ДНК и рестриктаз, перемешанных в пробирке. И это только начало.

Не так давно в лексиконе специалистов по прикладной математике появилось слово тьюрмиты. В основе всей теории вычислений находится машина Тьюринга, аппарат, который имеет головку, считывающую символ на бесконечной ленте и способный в результате этого сдвинуть ленту влево или вправо, напечатать другой символ взамен прочитанного и изменить своё внутреннее состояние. Тьюрмит устроен почти так же, только он «живет» на бесконечной плоскости и сам оказывается в состоянии двигаться по ней в зависимости от прочитанного символа и своего внутреннего состояния. Мир тьюрмитов удивительно интересен, и даже простейшие из них могут делать много неожиданного. Возможно, подобные такие сущности смогут реализовать хотя бы часть своих удивительных возможностей на наноуровне.

Нанотьюрмит может оказаться полезен не только сам по себе, но и как ступень к наноассемблеру – гипотетическому устройству, которое способно в соответствии с программой собирать из отдельных атомов желаемое. О наноассемблерах мечтают и грезят очень многие из тех, кто занимается и знакомится с нанотехнологиями. Наверно, работа над созданием нанотьюрмитов должна показать, насколько оправданы эти мечты и грезы.

Покончив с главным – с целями, надеждами, мечтами, угрозами и рисками – можно обратиться к методологии. К обсуждению путей, которые ведут к сияющим вершинам, угадывающимися вдали. Вернемся к основам. **Ричард Фейнман** в речи на одном из юбилеев (та знаменитая статья про то, что внизу ещё много места, 1959 года) сформулировал главную идею нанотехнологии – формировать сущности, совершенные и не имеющие дефектов, на атомарном уровне.

По мысли **Р. Фейнмана**, надо создавать машины, которые будут делать минимашины. Те, в свою очередь, будут производить микромашины. Последние будут изготавливать наномашины, ну а те уже будут собирать желаемое на атомном уровне (движение «сверху–вниз»). Думаю, что **Р. Фейнман**, произнося юбилейную речь, прекрасно представлял дерзость, фантастичность и несбыточность идеи. Дело в том, что при уменьшении размеров всё большую роль начинают играть поверхностные эффекты. Уменьшение размеров машин на порядки (как в обычных инженерных технологиях) будет приводить не к количественным, а качественным эффектам (подобно тому, как происходит переход от обычной механики к атомной физике, а от неё к физике атомного ядра).

Однако и в жизни, и в науке есть место чуду – вдохновленные идеями **Р. Фейнмана** исследователи создали туннельный микроскоп – прибор, который позволял не только видеть, но и оперировать отдельными атомами, двигаясь с макроуровня на нануровень.

И, тем не менее, это не путь в наномир. Чтобы получить значимые количества вещества нужно выстроить в желаемом порядке сравнимое с числом Авагадро $6 \cdot 10^{23}$ количество атомов. Если наш микроскоп тратит на доставку одного атома в желаемое положение 1 секунду, то для того, создать такое количество вещества, потребуется 10^{18} лет. Астрофизики утверждают, что наша вселенная примерно в 100 раз моложе...

Где же ключ к дверям в сказку, к тому миру, где есть ещё очень много места? Это три магические слова – самоорганизация, самоформирование, самосборка. Иными словами, создание таких условий, чтобы процессы на нануровне пошли в желаемом для нас направлении.

В качестве примера можно привести символ нанотехнологий в целом и нанотехнологического общества в частности – фуллерен, C_{60} . Подобно тому как **Кекуле** увидел структуру молекулы бензола, представив ухватившихся за хвосты соседок круг из шести обезьян, и здесь наглядный образ, пришедший из архитектуры, сыграл решающую роль.

Американский архитектор **Бакминстер Фуллер**, творивший в 1930-х, мыслил о новой геометрии, о прорыве в будущее, летающих машинах. Наиболее известные из его творений – ячеистые купола сферической формы. Они не только очень красивы – внизу справа американский павильон на одной из выставок ЭКСПО, фрагментом которого стал фуллеровский купол. Этот павильон вошёл в анналы мировой архитектурной классики. Подобные купола обладают замечательной легкостью и прочностью и имеют массу других инженерных достоинств.

К идее фуллеренов вело множество путей. Например, можно было вслед за выдающимся популяризатором науки **Б. Джоунсом** анализировать плотность разных веществ, увидеть разрыв в этом ряду и «придумать» «полую молекулу».

Наконец, можно было, исходя из первых принципов и классической теоремы **Леонарда Эйлера** про число вершин, ребер и граней многогранника, предсказать, что формула простейшей молекулы данного класса именно C_{60} . Далее, воспользовавшись компьютерными квантово-механическими программами, можно было оценить, насколько такая молекула будет устойчива, каковы будут её энергетические уровни, а также множество других свойств. Ну а после этого уже искать её среди частичек сажи... Всё это увлекательная и ставшая легендой классика нанонауки. Но нанотехнологией это стало лишь после того как **Р. Смолли** (Нобелевская премия по химии 1996 года) выяснил, при каких условиях, давлениях, температурах, в какой атмосфере подобные молекулы возникают сами... Иными словами, при каких условиях происходит самоорганизация и самоформирование подобных объектов. Ну а далее путь известен – от пионерских статей к обзорам, монографиям, патентам, учебникам, диссертациям, базам данных, дипломным и курсовым работам. Подобные работы мне не раз приходилось слышать в Российском химико-технологическом университете им. Д.И. Менделеева.

Открытие потребовало десятилетий поисков, высокой квалификации, огромного труда, фантазии и удачи. (За простые работы обычно нобелевские премии не дают). Но после того, как тропинка пройдена, естественно спросить, как же происходит самоорганизация на наномасштабах. У кого спросить? Да у ученых, которые профессионально занимаются теорией самоорганизации или синергетикой. Кроме того, ответ хотелось бы получить не только на языке принципов и законов, но и на языке конкретных компьютерных моделей.

Автор этих строк вместе с единомышленниками давно продвигает идею расширения в России круга работ по компьютерной химии и химической информатике. Давно пора иметь журнал подобного профиля, вокруг которого может сложиться сообщество учёных, занимающихся такими проблемами. И на этом уровне очень важна самоорганизация... Идею о создании журнала активно поддерживают на разных уровнях, но воз пока и ныне там.

Есть и ещё одно направление в нанонауке, по которому можно было бы двигаться намного активнее. На уровне наномасштабов очень трудно продвигаться методом проб и ошибок. Даже для того, чтобы посмотреть и понять, что же получилось в результате эксперимента, сплошь и рядом приходится пользоваться сложнейшим оборудованием.

Но в науке всё более важное место занимают идеи междисциплинарности. Они позволяют переносить идеи, методы, подходы из одной области в другую. И то, что требовало огромных усилий и десятилетий работы в одних областях, порой может быть пройдено за считанные годы усилиями небольших коллективов в другой. В основе такого подхода лежит универсальность многих закономерностей и связанных с этим теорий, алгоритмов, инженерных решений, математических моделей. Последнее особенно важно, так как в руках ученых оказался эффективный инструмент, лежащий на грани между теоретическим анализом и проведением опытов – вычислительный эксперимент. С теорией его объединяет то, что моделируется реальность, заданная уравнениями, предложенными учеными. С экспериментом – возможность в ходе расчётов новое, необычное, удивительное, то, что сегодня «не ухватывается» теоретиками с помощью карандаша и бумаги. Общим местом стало утверждение о том, что в области нанотехнологий зачастую вычислительный эксперимент оказывается не только проще, информативней, наглядней натурального, но и также и содержательнее последнего.

В нашем институте полтора десятка лет ведутся исследования в этом направлении. Работает научный семинар под руководством член-корр. РАН **Ю.П. Попова** – «Математическое моделирование процессов и устройств нанотехнологий».

Казалось бы, ветер перемен должен надувать паруса тех коллективов, которые занимаются подобными проблемами.

- Во-первых, от нанотехнологий сейчас многого ждут, поэтому естественно, вначале посчитать на компьютере, а потом воплощать в реальность.
- Во-вторых, и в мире, и в России без дела простаивают гигантские компьютерные мощности.

Появление и развитие суперкомпьютеров лишь усугубило эту ситуацию. Есть замечательный инструмент, но пока непонятно под какие задачи... Полцарства за интересную проблему для суперкомпьютера.

И в этом контексте задачи из нанонауки, из наноинженерии, нанотехнологий могут оказаться именно тем, что нужно! В самом деле, возьмем одно из популярных нанотехнологических направлений – фотонные кристаллы. Они позволяют делать со световыми волнами удивительные вещи. Но для их создания требуются материалы, размеры однородностей в которых сравнимы с длиной световой волны. Огромное поле для суперкомпьютерной деятельности...

- В-третьих, новые средства требуют больших усилий и специальных алгоритмов (на рисунке проиллюстрирована схема асинхронно-параллельного метода, созданного в ИПМ В.Д. Левченко для решения подобных задач). Безо всего этого параллельность, возможности супервычислений и всю имеющуюся компьютерную мощь не использовать. И здесь тоже специалисты по прикладной математике, имеющие в этом направлении большой опыт, были бы полезны.

Поэтому я, грешным делом, лет 5 назад, когда нанотехнологии начали входить в моду, ожидал, что в один прекрасный день наши сотрудники, которые занимаются этими задачами на мировом уровне, проснутся знаменитыми. Пока ничего подобного не произошло. Но, видимо, это впереди. В любом случае компьютерная нанотехнология сегодня – это большой, не пользующийся сегодня в достаточной степени ресурс.

Последнее методическое замечание касается отношения к нанонауке. Как ни странно, многие серьёзные ученые, включая ряд исследователей, избранных в Академию наук по секции нанотехнологий, считают, что... нанонауки не существует, а есть лишь мода, брэнд, под который легче выбивать гранты, деньги, ресурсы.

Они толкуют, что на самом деле занимаются физикой, химией, информатикой – настоящими серьёзными вещами, а приставку «нано» добавляют к месту и не к месту, потому что сейчас так принято. Считаю такой взгляд на вещи вредным заблуждением. Нанонаука существует! И чем быстрее мы это осознаем (вслед за учеными большинства развитых стран), тем лучше!

Приведем два примера подтверждающих этот тезис. Одной из самых больших загадок, которую наука XX века оставила в наследство исследователям XXI, века является проблема сознания. Механизмы восприятия, осмысления увиденного, взаимосвязь логики и эмоций, алгоритмы работы памяти, принципы работы мозга поняты в гораздо меньшей мере, чем хотелось бы, несмотря на огромные усилия и внушительный арсенал экспериментальной биологии.

Стандартная точка зрения сводится к тому, что разгадка тайн мозга связана с самоорганизацией. Действия и устройство клеток мозга – нейронов, на первый взгляд, подробно изучены и хорошо поняты. И новое качество, которое и отвечает за феномен сознания связано с их взаимодействием. Один из выдающихся математиков и физиков-теоретиков XX века **Роджер Пенроуз** выдвинул альтернативную гипотезу, меняющую сам взгляд на проблему. В соответствии с ней работа, активность мозга не аналогична работе машины Тьюринга. Ему удалось показать, что математики сегодня смогли решить алгоритмически неразрешимые задачи. Последние представляют собой проблемы, для которых нельзя написать программу для машины Тьюринга, предложить алгоритм, выполняя который, мы рано или поздно обязательно получим ответ.

Одну из таких задач решил сам **Р. Пенроуз**. Это задача о замощении плоскости набором плиток (без пробелов и наложений) непериодическим образом. Иными словами, требуется оценить, сколько типов плиток потребуется, чтобы замостить плоскость ими можно было только непериодическим образом и предъяснить этот набор. Именно это и было сделано – оказалось, что достаточно плиток двух типов – а потом доказано, что эта задача алгоритмически неразрешима. Мозг устроен совсем не так, как машина Тьюринга!

Разгадку этого парадокса он видит на наноуровне. Он связывает её с гипотетическим явлением, возникающим в ансамблях квантовомеханических систем. В основе квантовой механики лежит явление редукции волнового пакета. Именно это явление позволяет фиксировать динамику микрообъектов с помощью макроприборов. Р. Пенроуз называет такую редукцию субъективной (микрочастица начинает вести себя как классический объект, когда появляется прибор, субъект, наблюдающий и фиксирующий её динамику) Именно это является основой множества парадоксов и темой дискуссии Бора с Эйнштейном. Можно даже сказать, что многие свойства частицы «рождаются» в момент её наблюдения. **Р. Пенроуз** предположил, что существует и объективная редукция, заставляющая ансамбль микрочастиц время от времени «голосовать», приобретая классические свойства.

Если это так, то элементами сознания могут быть отдельные клетки. Профессор **С. Хамерофф** из Аризонского университета в Тусоне считает, что своеобразные квантово-механические вычисления происходят в микротрубочках цитоскелета нейронов, имеющих диаметр 25 нм. Они состоят из молекул белков – тубулинов – которые могут находиться в двух внутренних состояниях или, как говорят биологи, конформациях. Именно они, в соответствии с гипотезой Хамероффа, и отвечают за феномен сознания. Сейчас вкладываются большие усилия в экспериментальную проверку гипотез Пенроуза – Хамероффа. В немалой степени интересу к этому подходу способствовали книги самого **Р. Пенроуза** – «Новый ум короля» и «Тени сознания», рассчитанные на широкий круг исследователей. Второй пример также относится к основам естествознания. Вероятно, существование жизни на Земле критическим образом зависит от странного свойства воды расширяться при замерзании (в противоположность большинству других жидкостей). Иначе возникающий лёд попросту опускался бы на дно морей и океанов. Это-то привычное и удивительное свойство воды и получило объяснение в последние годы. Исследование наноструктуры воды, проведенное несколькими исследователями на синхротронах (излюбленном инструменте нанотехнологов), показало, что она как бы состоит из двух фаз. Одна регулярная и легкая, которая состоит из кластеров наномасштабов, другая хаотичная и менее плотная. И при изменении температуры меняется доля вещества в каждой из них. Это и приводит к привычному и удивительному явлению, известному нам со школьных времен. Известный философ и методолог науки **Томас Кун** (который и ввел термин парадигма) считал, что есть характерный признак того, что новые идеи и теории успешно замещают предшествующие. Это происходит тогда, когда они оказываются способны более глубоко и точно объяснить и описать какой-нибудь феномен, трактуемый предшествующими теориями в области их применимости. Иными словами более ясно осмыслить не новое, а старое. Но в области нанонауки это происходит на наших глазах!

По-видимому, с нанонаукой может оказаться связан и радикальный поворот в самой научной стратегии человечества. В самом деле, лидерами современной физики в течение многих десятилетий были физика элементарных частиц с её гигантскими ускорителями и космология с её радиотелескопами. Казалось бы, чем меньше (до 10^{-31} м и далее) пространственные размеры изучаемого или чем они больше (до метagalлактики, мегапарсеков и т.д.), тем исследование фундаментальнее. Именно это экстенсивное развитие, рост вширь по шкале масштабов и служило источником вдохновения для многих поколений физиков. Наверно, это героический период, юность естествознания.

Однако на наших глазах приоритеты кардинально меняются. Становится ясно, не только насколько тяжёлым становится каждый шаг вглубь и вширь, но и то, что знание, полученное на этих масштабах, во всё меньшей мере может быть использовано для понимания и изменения нашей реальности.

Вероятно, у человечества есть адекватная ему шкала масштабов, на понимание и освоение которой и должны быть направлены основные усилия учёных. И наномасштабы, вероятно близки к нижнему краю этой шкалы.

Нанотехнологии сегодня открывают двери в сказку. Они позволяют воплощать многие мечты. Но для этого надо эти мечты иметь. Приходится мыслить более широко и дерзко, чем это обычно принято в научном сообществе в периоды её медленного эволюционного развития. По возможности, которые есть у исследователей в области нанонауки и наноинженерии, могут более никогда не представиться. Пожалуй, знаковым примером воплощения красивой, удивительной мечты являются метаматериалы. В детских сказках, в «Руслане и Людмиле» важную роль играет шапка-невидимка, делающая невидимым того, кто её надевает. В западной традиции и в «Гарри Поттере» такую же роль играет эльфийский плащ. Противоречит ли существование подобных предметов законам природы? Этот вопрос волновал ещё великого Максвелла – создателя современной электродинамики. Размышляя над ним классик предложил конструкцию удивительной линзы. Полезно думать над неразрешимыми задачами...

В 1967 году профессор Московского физико-технического института **В.Г. Веселого** опубликовал в «Успехах физических наук» странную необычную работу, посвященную электромагнитным волнам в сферах отрицательной диэлектрической проницаемостью и отрицательной магнитной проницаемостью. Необычность работы заключалась в том, что на момент публикации работы... таких сред просто не было. Странность заключалась в необычной оптике таких сред. Из институтского курса физики известно, что скорость прохождения света через среду пропорциональна $(\epsilon\mu)^{1/2}$. И если оба коэффициента отрицательны, то свет должен так же благополучно распространяться, как в обычной среде. Но показатель преломления в этом случае может быть отрицателен.

Рис.15

А это прямой путь к шапке-невидимке (см. рис.15). Можно так расположить слои с обычным отрицательным коэффициентом преломления, что лучи будут огибать предмет, посвященный внутри полости и, выходя из под шапки-невидимки так, как будто внутри неё ничего нет.

Всё это осталось бы красивой физической фантазией, если бы не метаматериалы, в которых размеры неоднородностей сравнимы с длиной волны. В них можно устроить неоднородности так, что эффективные и для волн из определенного диапазона частот действительно будут отрицательны. Профессору **Пендри** удалось экспериментально построить соответствующую систему. Линзы Пендри–Веселого стали также одним из символов нанотехнологий. Начался бум работ в этой области. Выяснилось, что к подобным результатам можно было бы добраться, пробираясь и по другим тропинкам. Очень красива «математика метаматериалов» (справедливости ради надо сказать, что несмотря на обилие книг по нанотехнологиям, некоторые из которых можно смело отнести и к «нанопурге», достойной книги и по метаматериалам на русском языке пока нет). Двери в сказку открылись... Что за ними? Новое поколение военной техники – самолетов и роботов-невидимок? Или что-то иное.

Помнится в «Сказке о царе Салтане» фигурировал шмель, способный выполнить разведывательные миссии, а при необходимости и жалить супостатов, без вреда покидая поле боя. И эта сказка реализована (рис.16). Летательный аппарат спецназа Израиля на фоне большого пальца. Он способен ко всему, о чем говорится в сказке, и к ещё большему. А ведь это только микро, а не нано боевое устройство. системы наноуровня (например планируемые в рамках проекта «Умная пыль») мы просто не увидим невооруженным глазом. Но их наличие может кардинально изменить тактику и способы вооруженной борьбы...

Рис.16

Сегодня нанотехнологии могут открыть двери в сказку. Но какой окажется она? Доброй или жестокой? Какие мечты будут воплощения? Будет ли витать над всем этим комплексом идей и технологий призрак Кощея Бессмертного и призрак люден (homo ludens – человек играющий из книги И. Хейзинги или нелюди из романа Стругацких «Волны гасят ветер»). А может быть удастся реализовать что-то иное, более светлое и высокое?

Пожалуй, нынешняя ситуация с нанореальностью очень точно описана в одной из песен, которую пела **Алла Пугачева**: «Наш мир устроен так, что всё возможно в нём. Но после ничего исправить нельзя». Хочется строить набело, чтобы необходимость исправить не возникла. Поэтому наше сообщество – Нанотехнологическое общество России, которое может системно, всесторонне и профессионально посмотреть на проблемы развития этой сферы очень важно. На том крутом повороте, который проходит мир и Россия, хотелось бы не ошибаться...

Наш институт прошёл со всей страной все этапы практического освоения космоса от межконтинентальных ракет и запуска первого спутника до миссий к марсу и Венере и системы «Энергия–Буран». Один из наших сотрудников, который работал с **С.П. Королевым, М.В. Келдышем**, другими выдающимися инженерами и учеными – **Александр Константинович Платонов** – делит путь в космос на три этапа.

Вначале приходят фантасты и мечтатели. Они грезят о несбыточном, предлагают небывалое и немислимое. Затем мечта захватывает людей и приходят энтузиасты. Их горение, самоотверженность находки показывают, что какие-то из замыслов мечтателей, пусть даже очень скромно, можно воплотить в реальность. Затем лицам, принимающим решения, показывают возможности, перспективы, масштабы и смыслы проекта. И тут уже приходят профессионалы и делают сказку былью. Сейчас мы живем в очень коротком, напряженном и ответственном времени. В области нанонауки, наноинженерии, нанотехнологий в считанные годы должны появиться и мечтатели, и энтузиасты, и профессионалы. Им предстоит спроектировать будущую реальность, сформировать её научную основу, найти технические решения, отыскать адекватные производственные,

экономические, социальные технологии. И воплотить всё это в реальность. Начать и кончить. А наше общество, – все мы – постараемся в этом помочь себе и друг другу.

Это очень интересная масштабная и трудная задача. Но без её решения России не обойтись.

[Георгий Геннадьевич Малинецкий](#) родился в 1956 году в городе Уфе. В 1973 году закончил среднюю школу № 62. В 1979 году закончил с отличием физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова (кафедра математики). В 1982 году закончил аспирантуру ИПМ АН СССР и защитил кандидатскую диссертацию, в 1990 году докторскую. С 1982 года и по настоящее время работает в ИПМ. С 2000 года в должности заместителя директора по науке. Профессор, доктор физико-математических наук, лауреат премии Ленинского комсомола (1985) и премии Правительства Российской Федерации в области образования (2002).

Заместитель директора Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, вице-президент Нанотехнологического общества России

Похожие статьи

- [Георгий Малинецкий. Доклад о перспективах РФ](#)
- [Всё, кроме нанороботов](#)
- [Российские R&D: динамика трехлетия](#)