

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Научно-исследовательский институт ядерной физики
имени Д.В. Скобельцына

Л.С. Новиков, Е.Н. Воронина

Нанотехнологии и наноматериалы в космонавтике

X Межвузовская научная школа молодых специалистов
«Концентрированные потоки энергии в космической технике,
электронике, экологии и медицине»
23-24 ноября 2009 г.
Москва

Нанонаука изучает фундаментальные свойства объектов нанометровых размеров (нанообъектов) и связанные с ними явления.

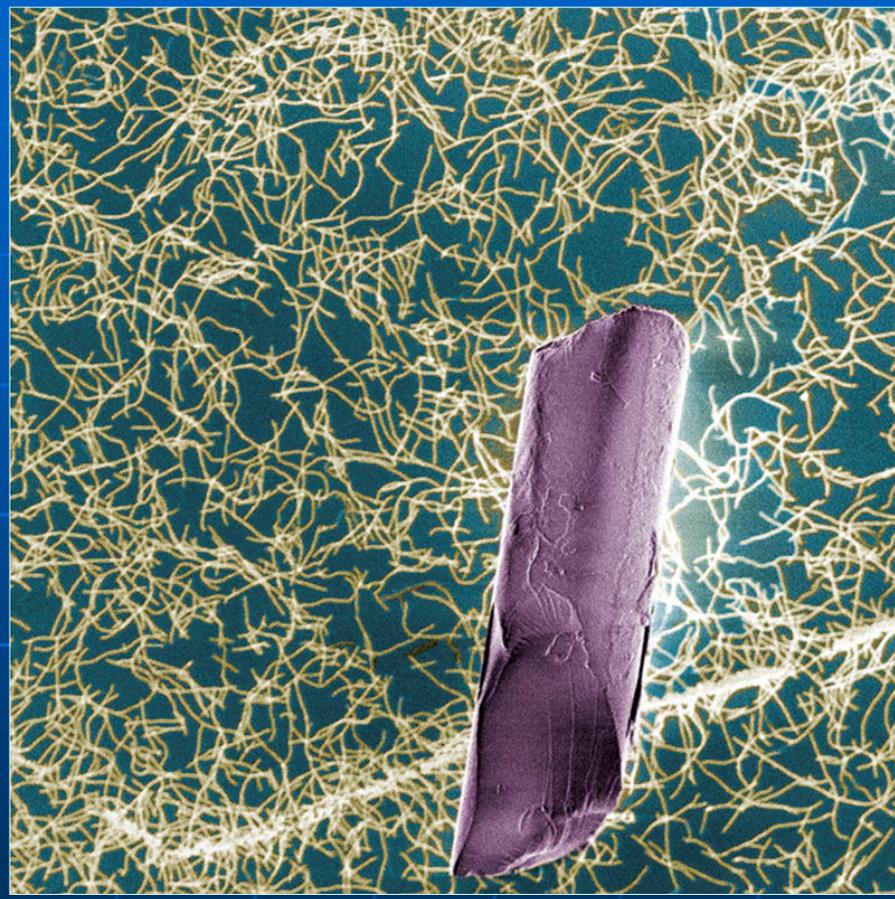
Нанотехнология решает задачи создания самих нанообъектов, материалов на их основе, называемых наноструктурированными материалами или просто наноматериалами, и законченных изделий, в составе которых используются наноматериалы.

Наноиндустрия обеспечивает широкомасштабное производство наноматериалов и содержащих их изделий для применения в различных областях человеческой деятельности.

Нанотехнология – совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, **имеющие принципиально новые качества** и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

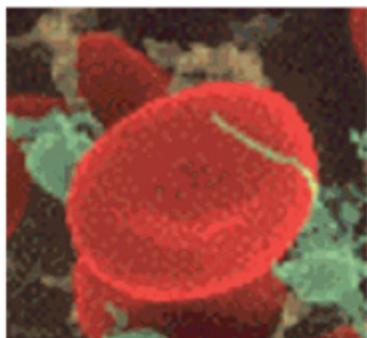
(«Концепция развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий до 2010 г.», принятая в ноябре 2004 г.)

Наноструктурные элементы (нанобъекты) – материальные объекты различной конфигурации: частицы (зерна), волокна, трубки, пленки и др., хотя бы один линейный размер которых лежит в диапазоне 1 – 100 нм, т.е. 10^{-9} – 10^{-7} м.

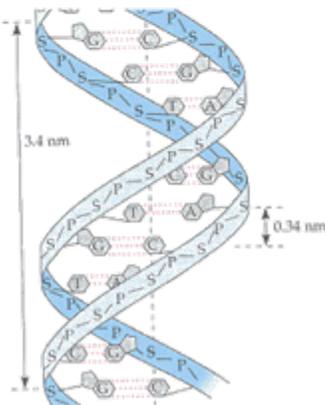
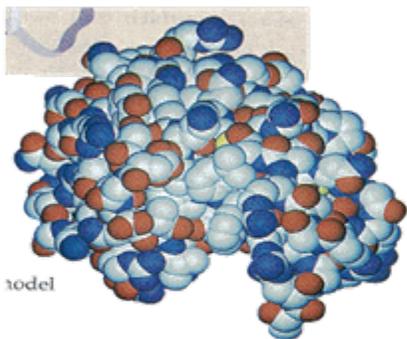


National Center for Electron Microscopy, Lawrence Berkeley Lab, U.S. Department of Energy

Размеры элементов в микро- и наномире



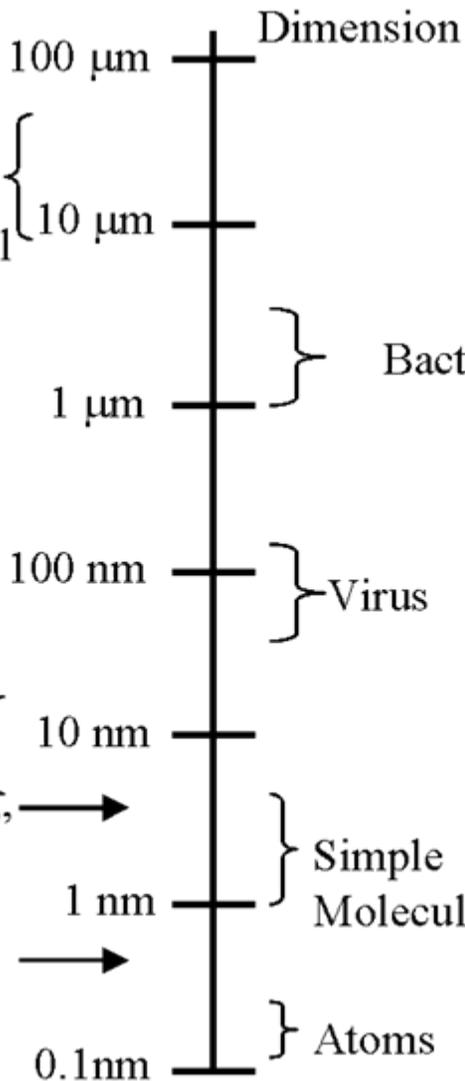
Plant,
Animal Cell



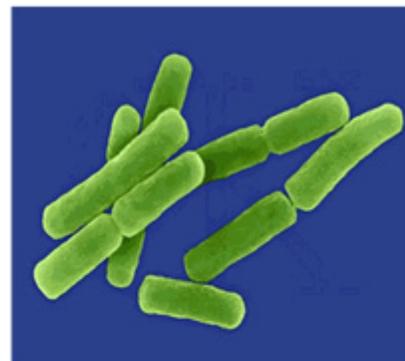
Protein

DNA "turn"

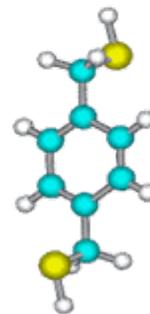
DNA base



Bacteria

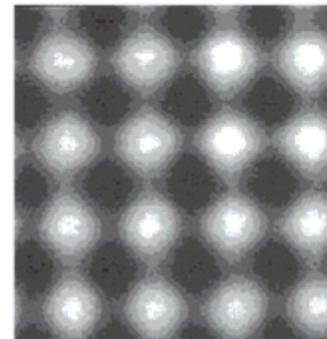


Virus



Simple
Molecules

Atoms



Диапазон размеров	Объект	Размер, единицы
Микро 10^{-1} – 10^3 мкм		мкм
	Шарик авторучки	500–1000
	Волос человека	50–100
	Живые клетки	1–100
	Эритроциты	5–8
	Бактерии	0,5–10
	Вирусы	0,02–0,3
Нано 1–100 нм		нм
	Топологические элементы микросхем	50–100
	Белки (протеины)	4–50
	УНТ многослойные	5–25
	Квантовые точки	5–15
	Клеточная мембрана	7–10
	УНТ однослойные	1–5
	Спираль ДНК:	
	шаг	3,4
	диаметр	2,0
Менее 1 нм Простые молекулы, атомы		нм
	Фуллерен C_{60}	0,71
	N_2	0,34
	H_2O	0,28
	Fe	0,25
	Si	0,24

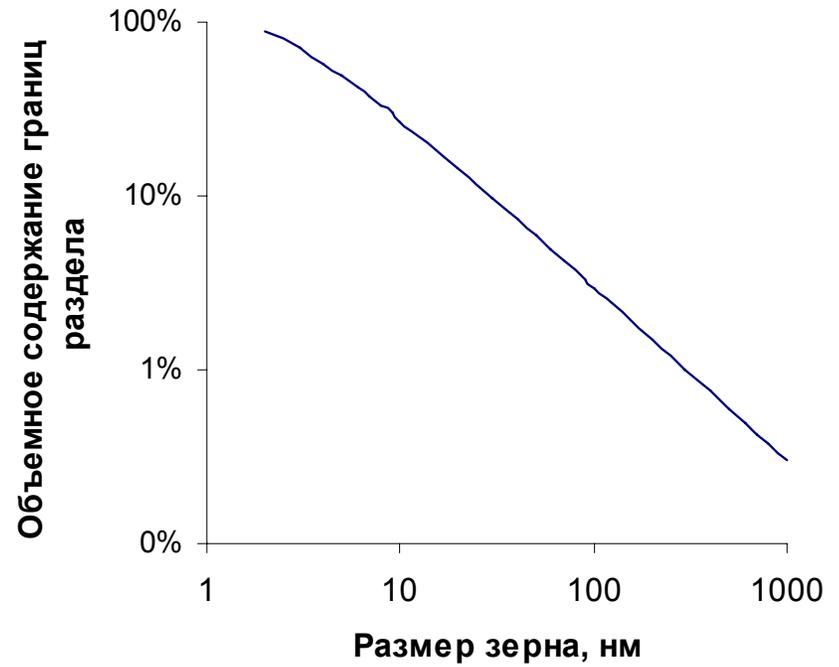
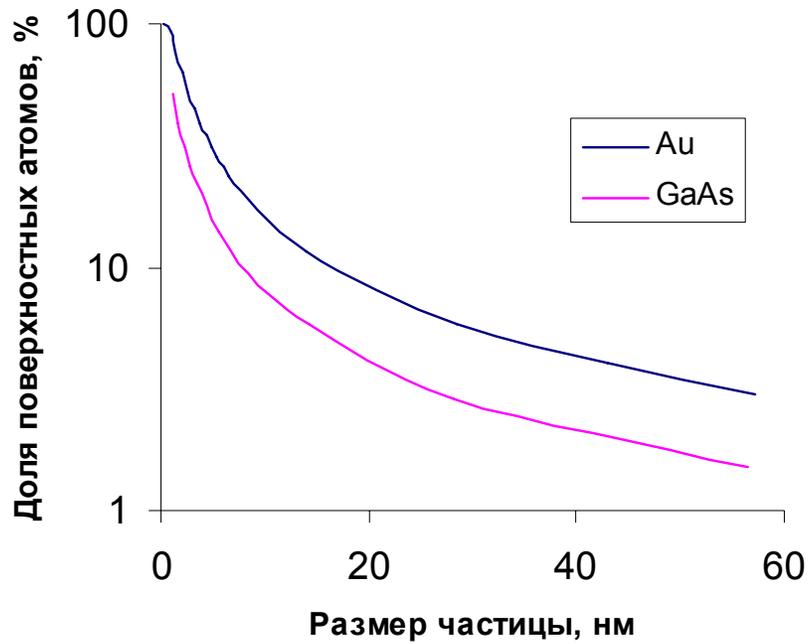
Важные даты в формировании нанотехнологии

- 1959 г. - Лекция Р. Фейнмана, в которой была выдвинута идея создания веществ путем манипулирования отдельными атомами (принцип «снизу-вверх»)
- 1974 г. - Японским исследователем Н. Танигучи предложен термин «нанотехнология»
- 1981 г. - Создание Г. Биннигом и Г. Рорером сканирующего туннельного микроскопа
- 1986 г. - Создание с участием Г. Биннига сканирующего атомно-силового микроскопа
- 1986 г. - Выход в свет книги Э. Дрекслера «Машины созидания: пришествие эры нанотехнологии», в которой рассмотрена возможность создания различных механизмов путем их сборки из отдельных атомов и молекул

Формирование и развитие нанотехнологии

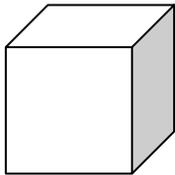


Роль размера частиц

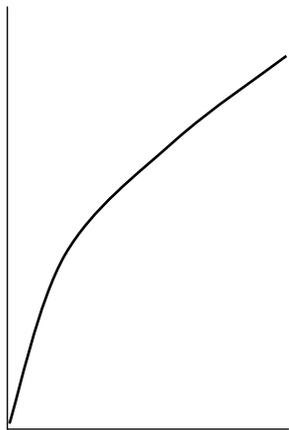


Роль квантовомеханических эффектов

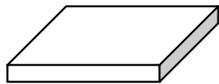
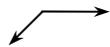
3D



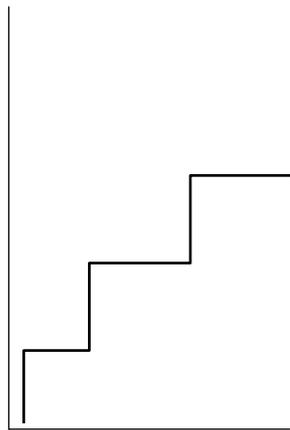
$D(E)$



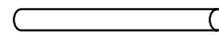
2D



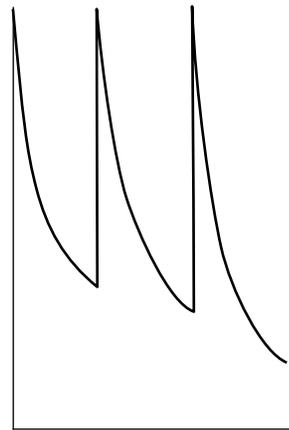
$D(E)$



1D



$D(E)$



0D



$D(E)$

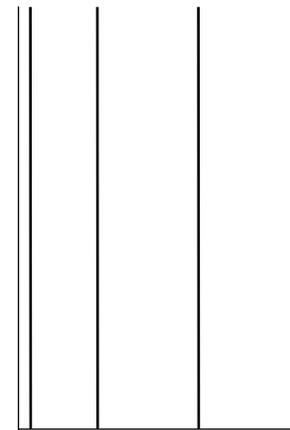
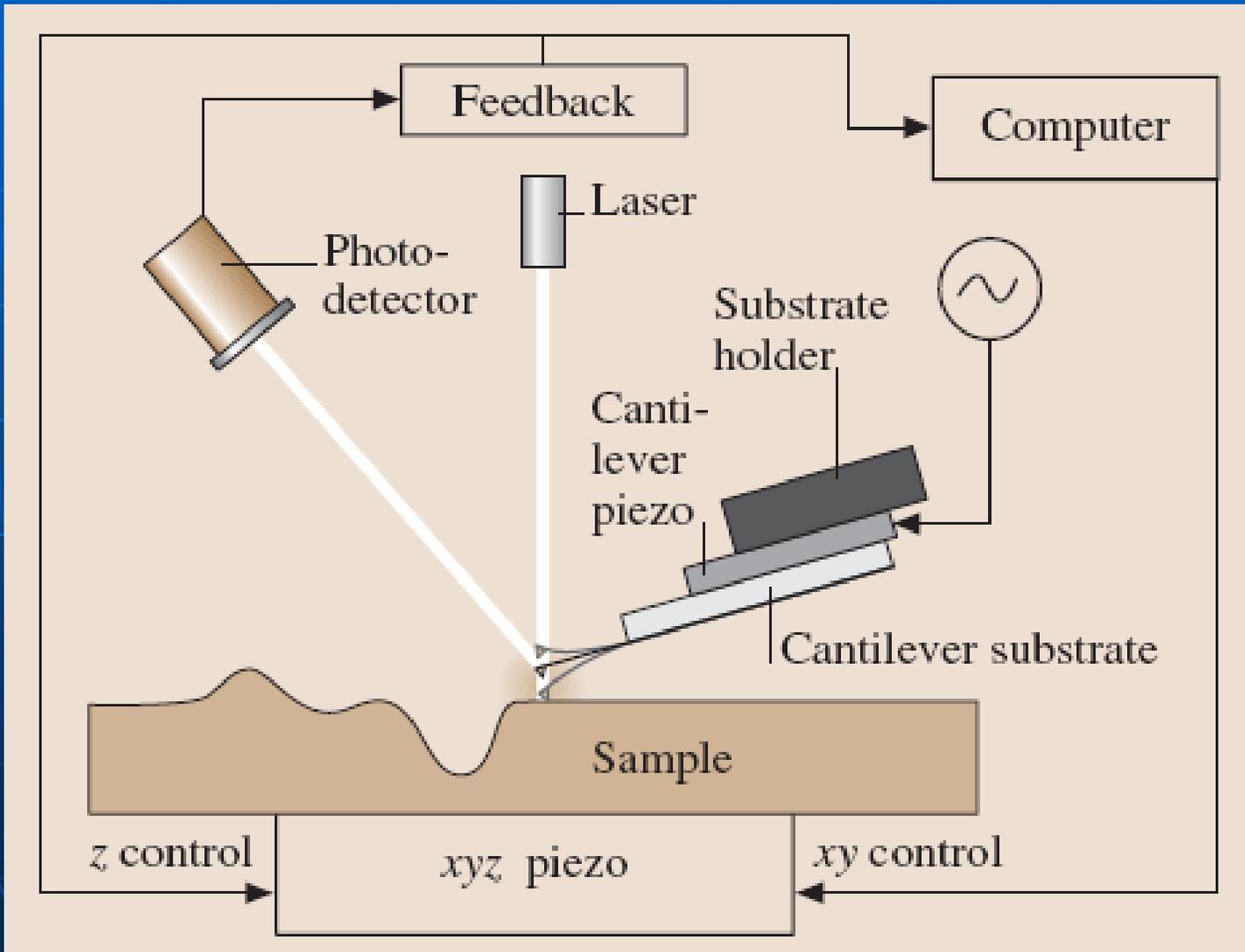
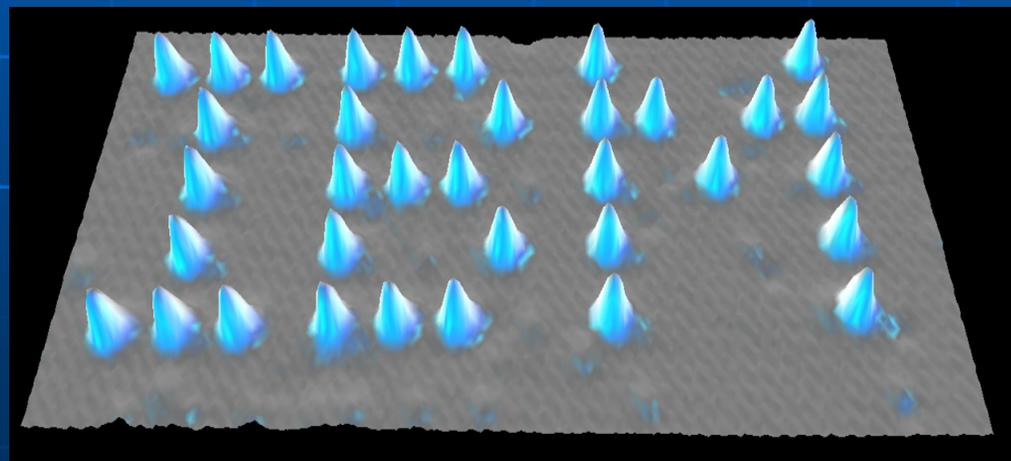
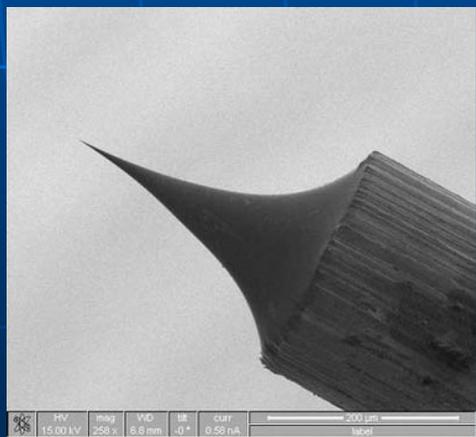
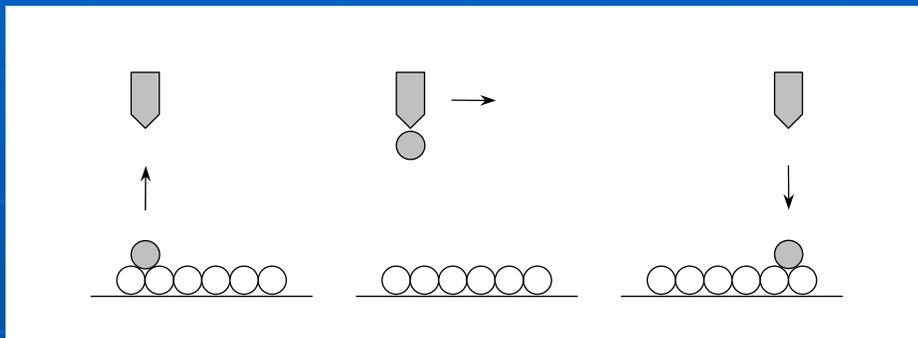


Схема электронных уровней в элементах различной размерности

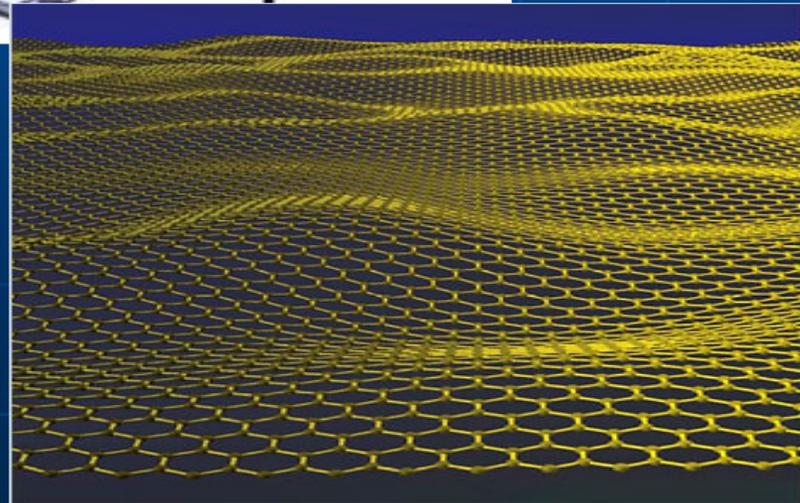
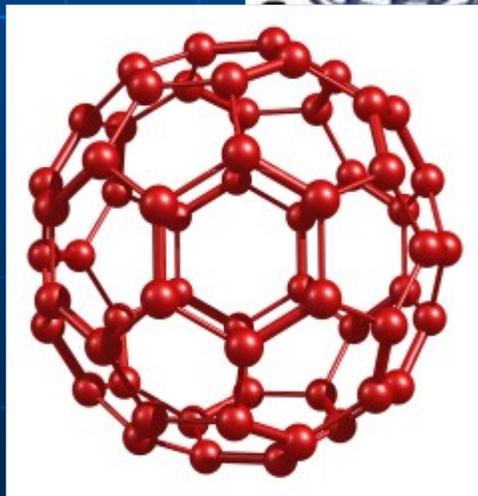
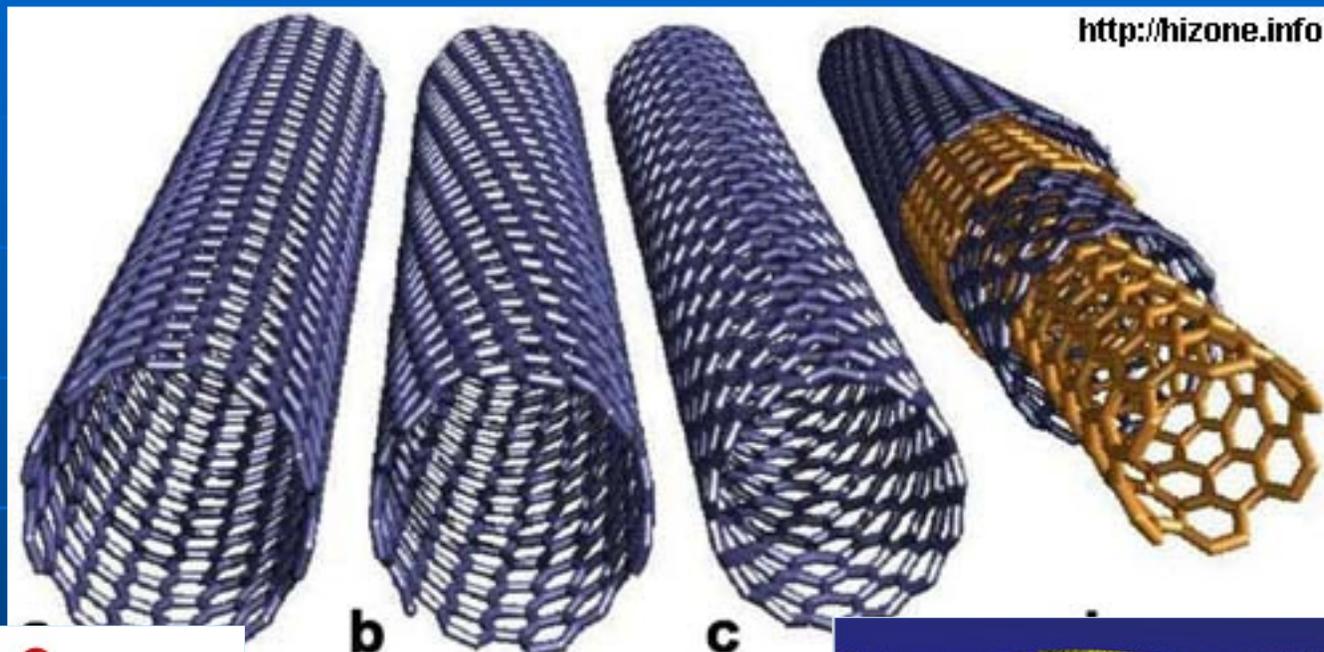
Схема атомно-силового микроскопа



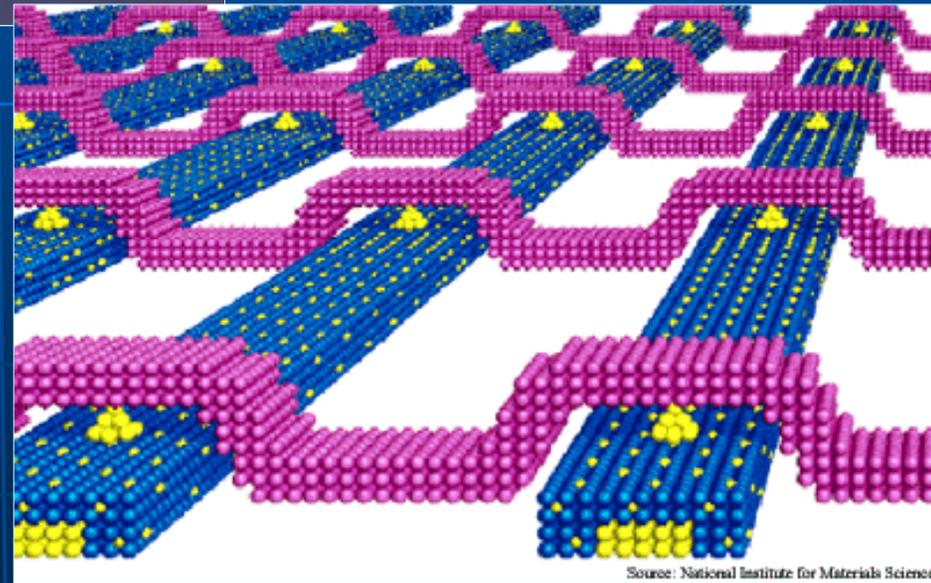
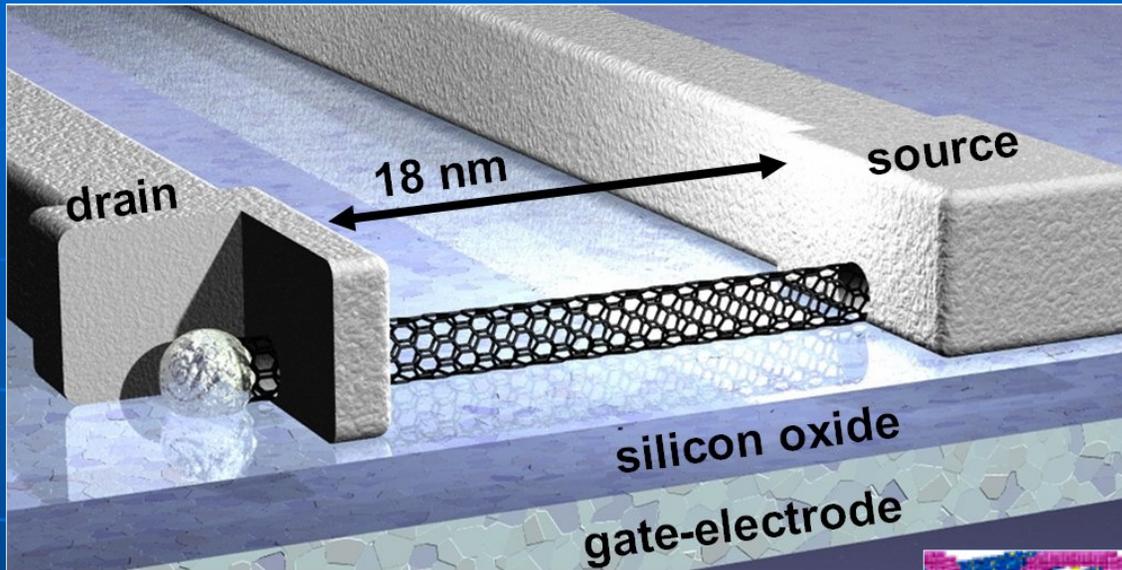
Перемещение атомов с помощью зонда



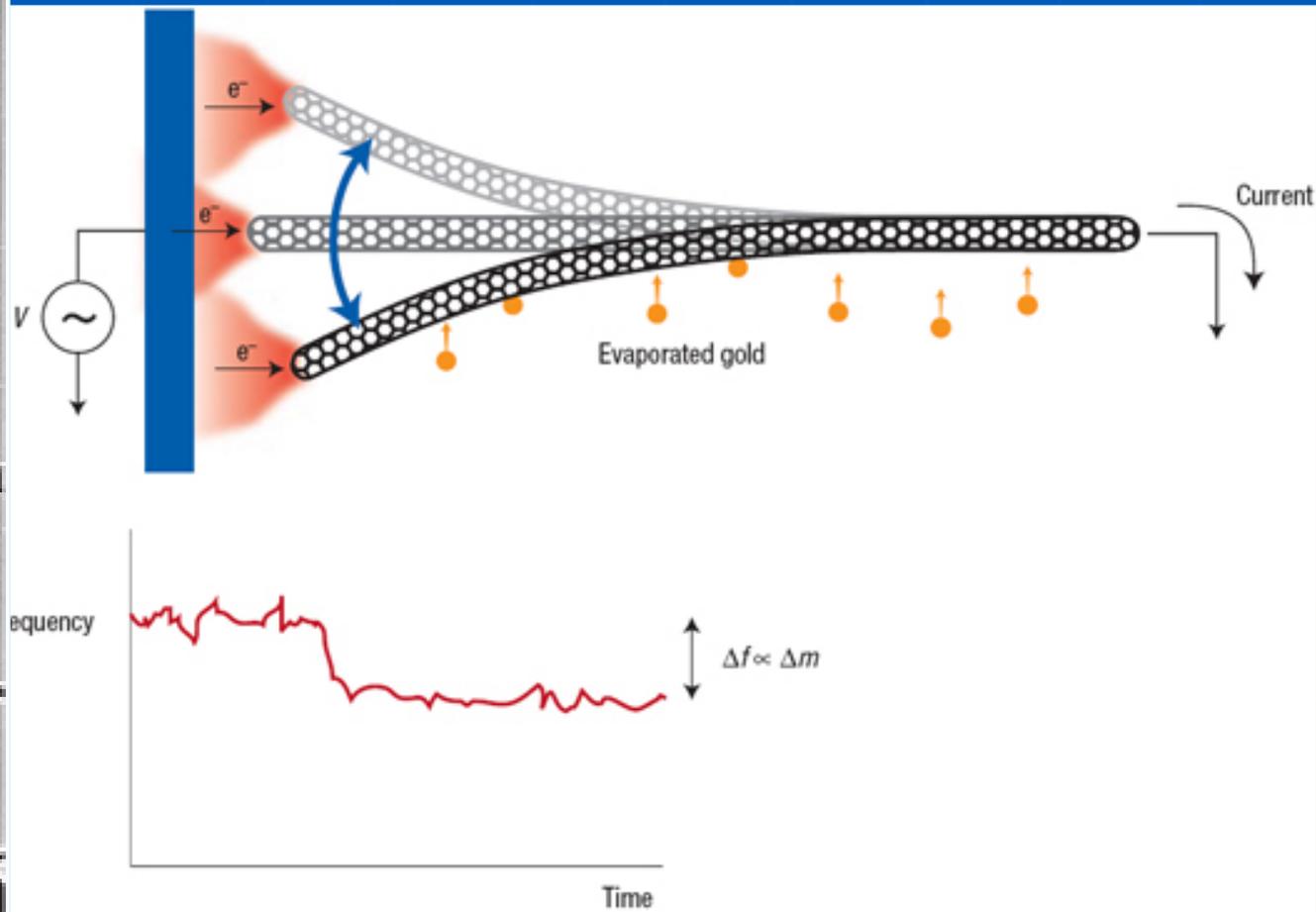
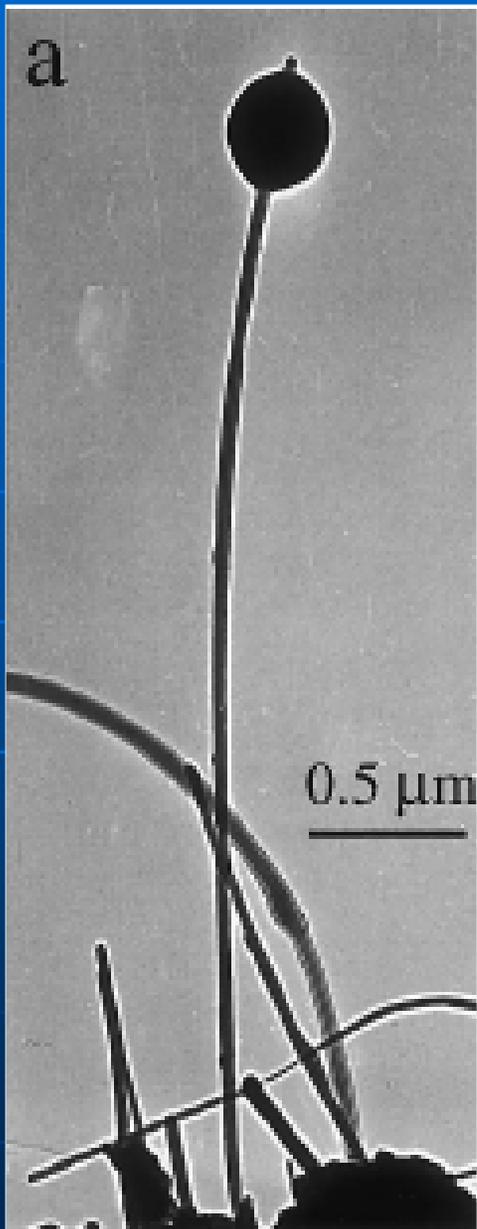
Углеродные наноструктуры



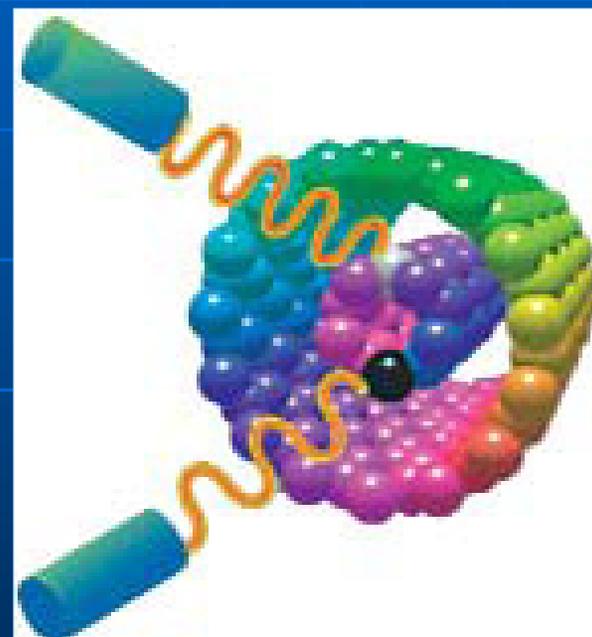
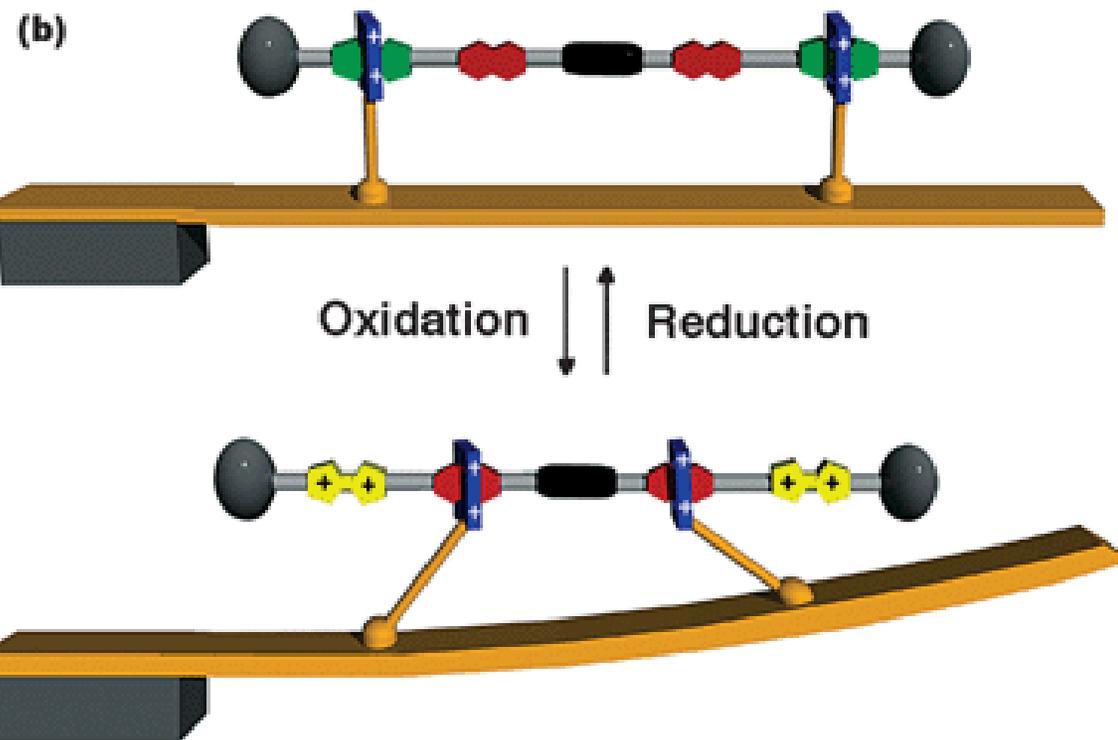
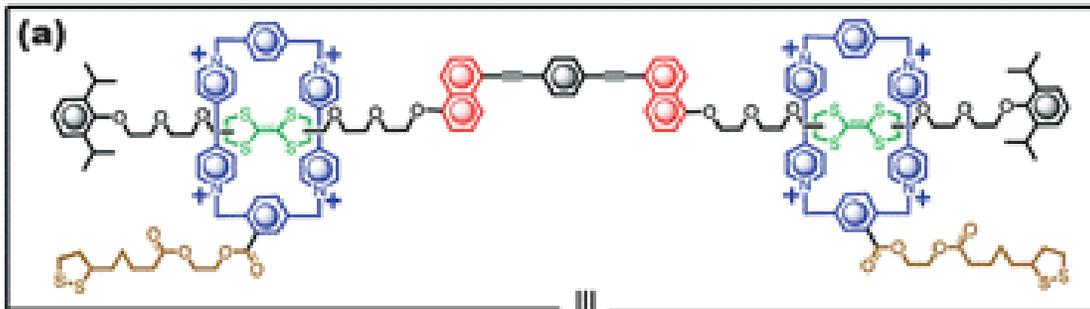
Элементы нанoeлектроники



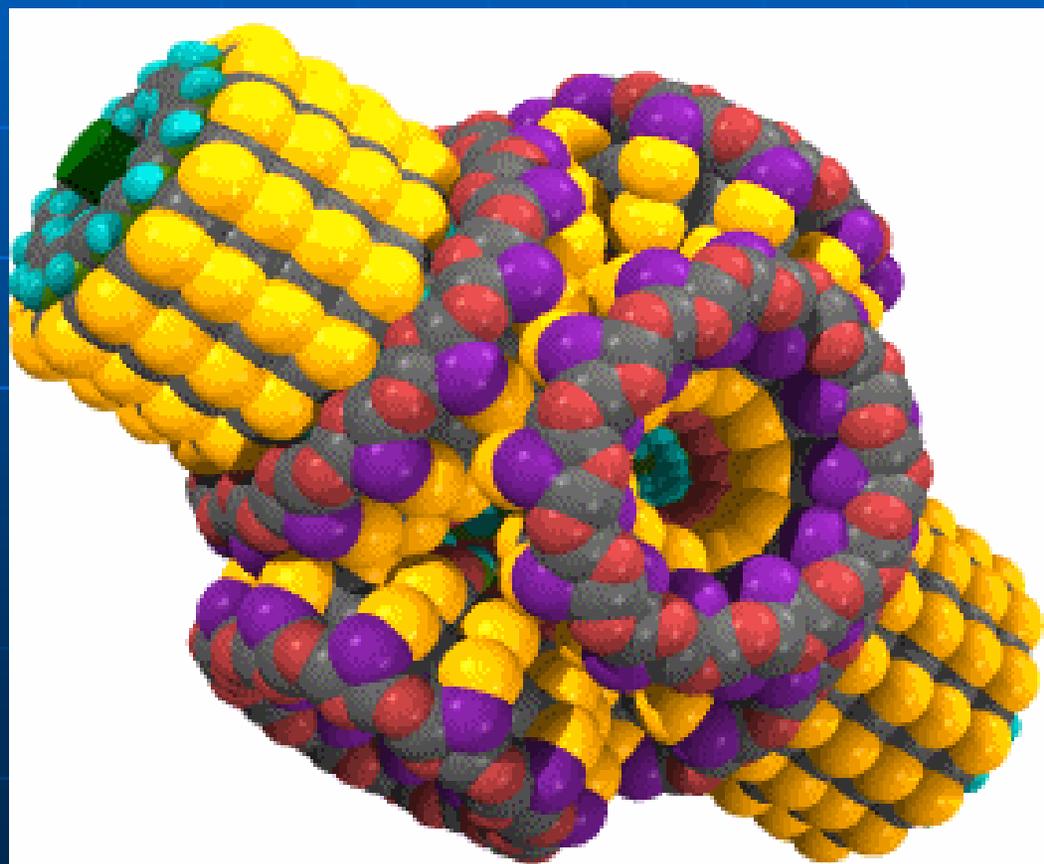
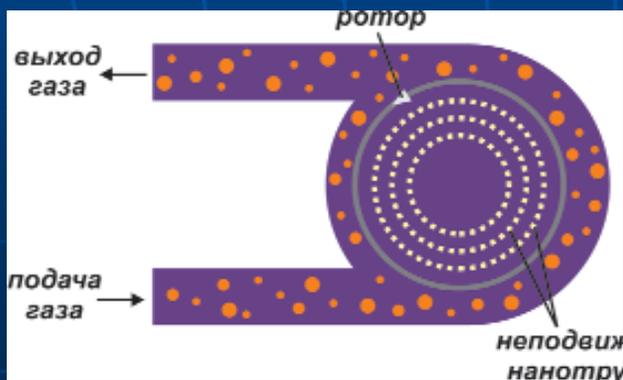
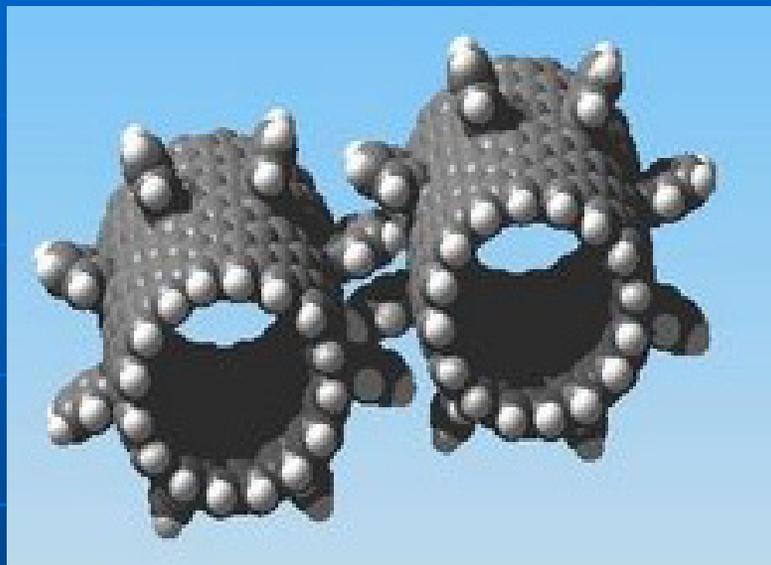
Наносенсоры



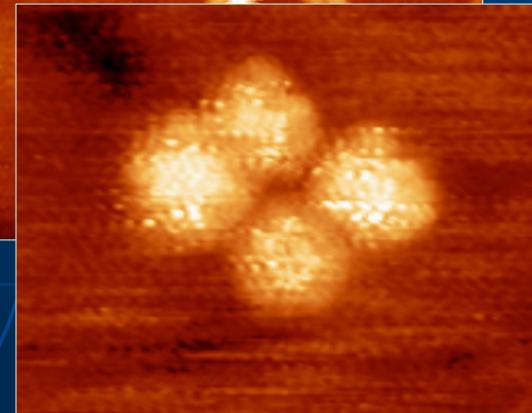
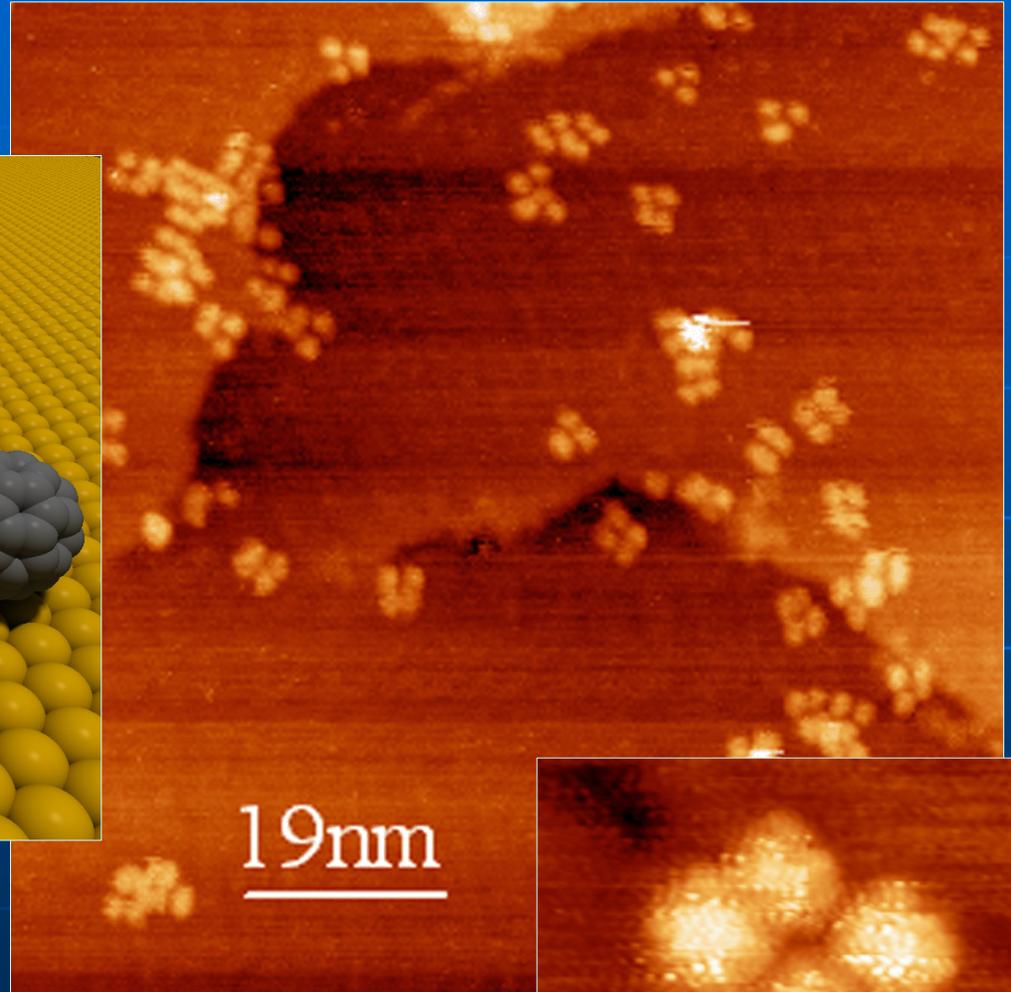
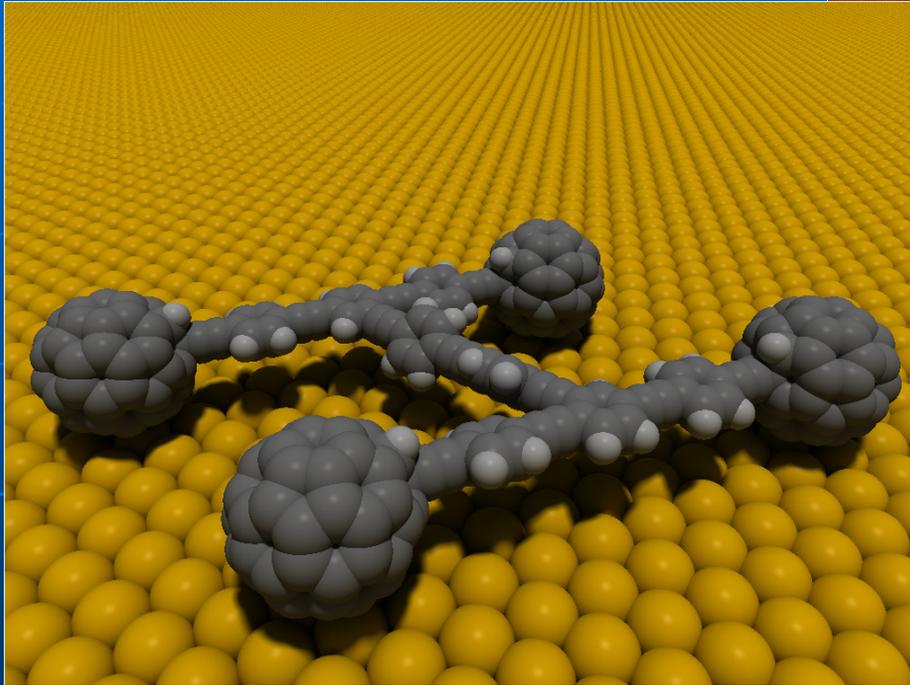
Элементы НЭМС



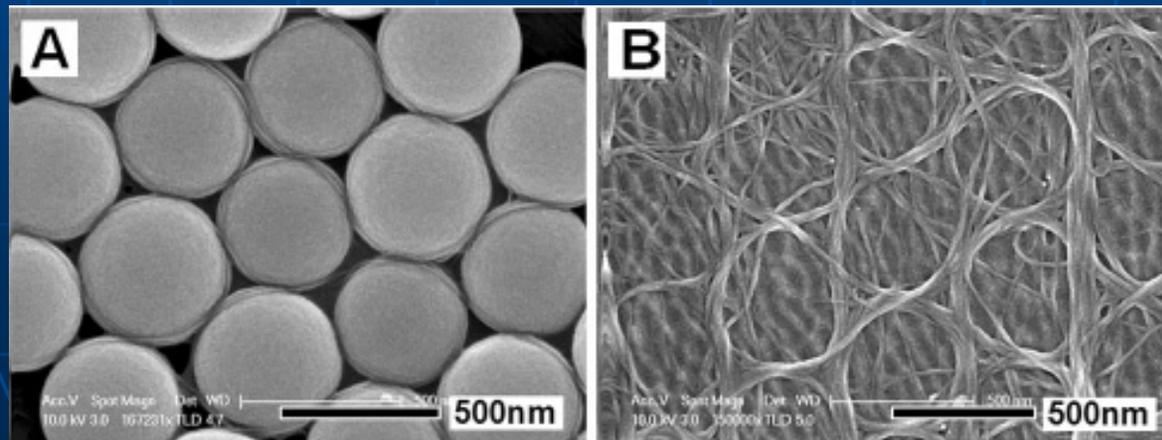
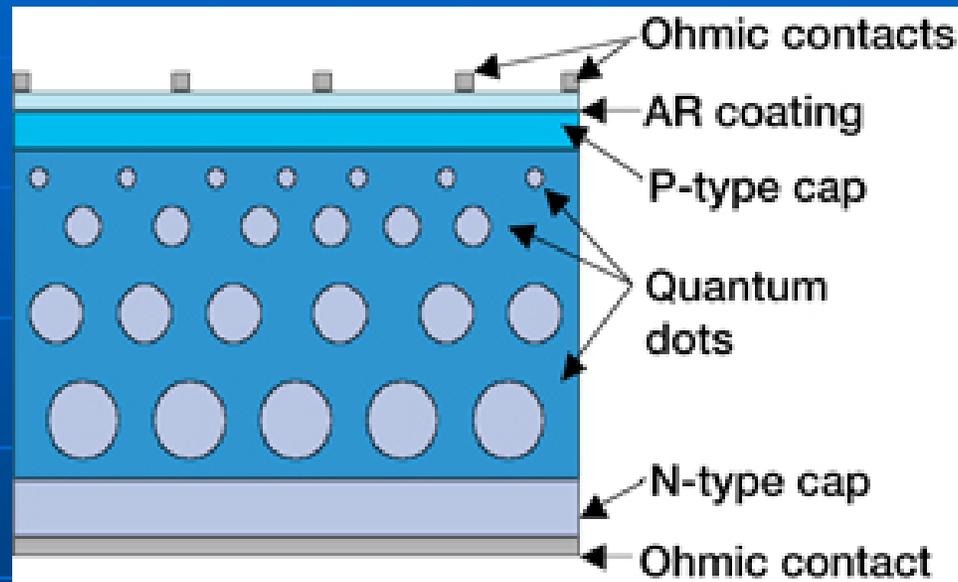
Элементы НЭМС



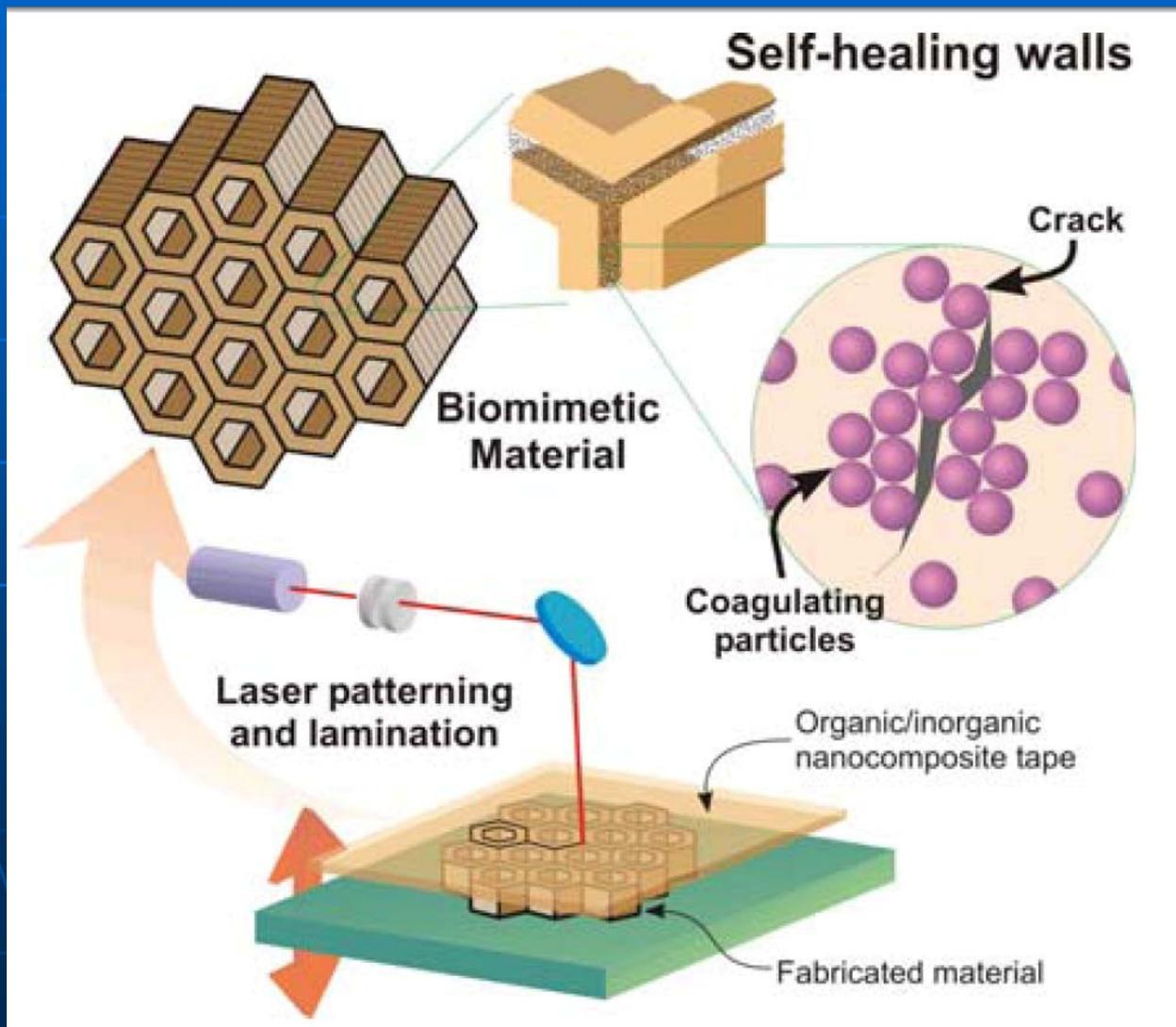
Наноавтомобиль



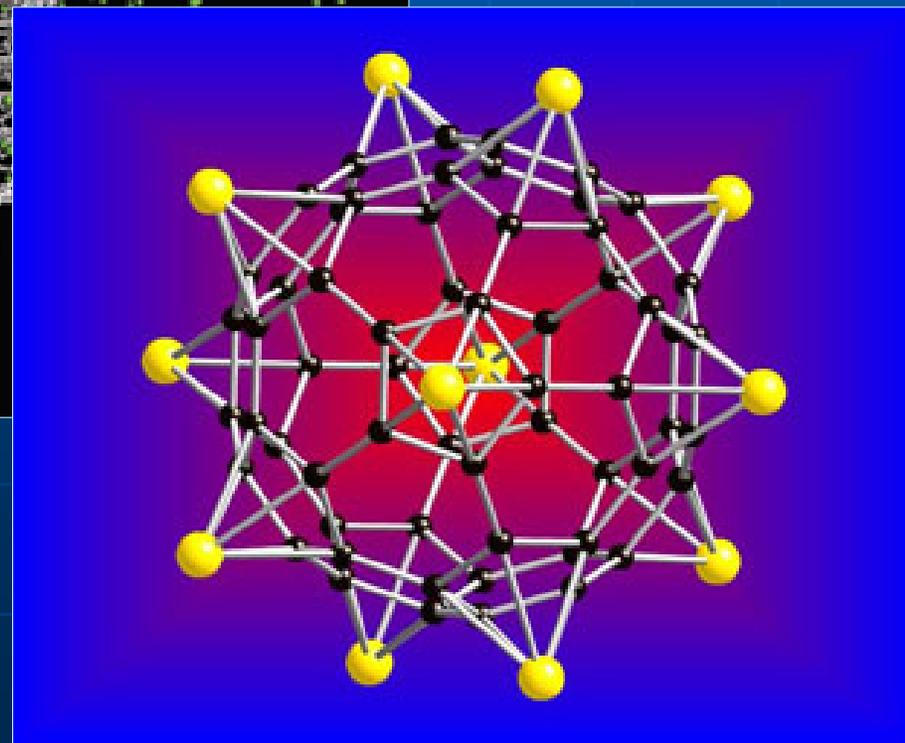
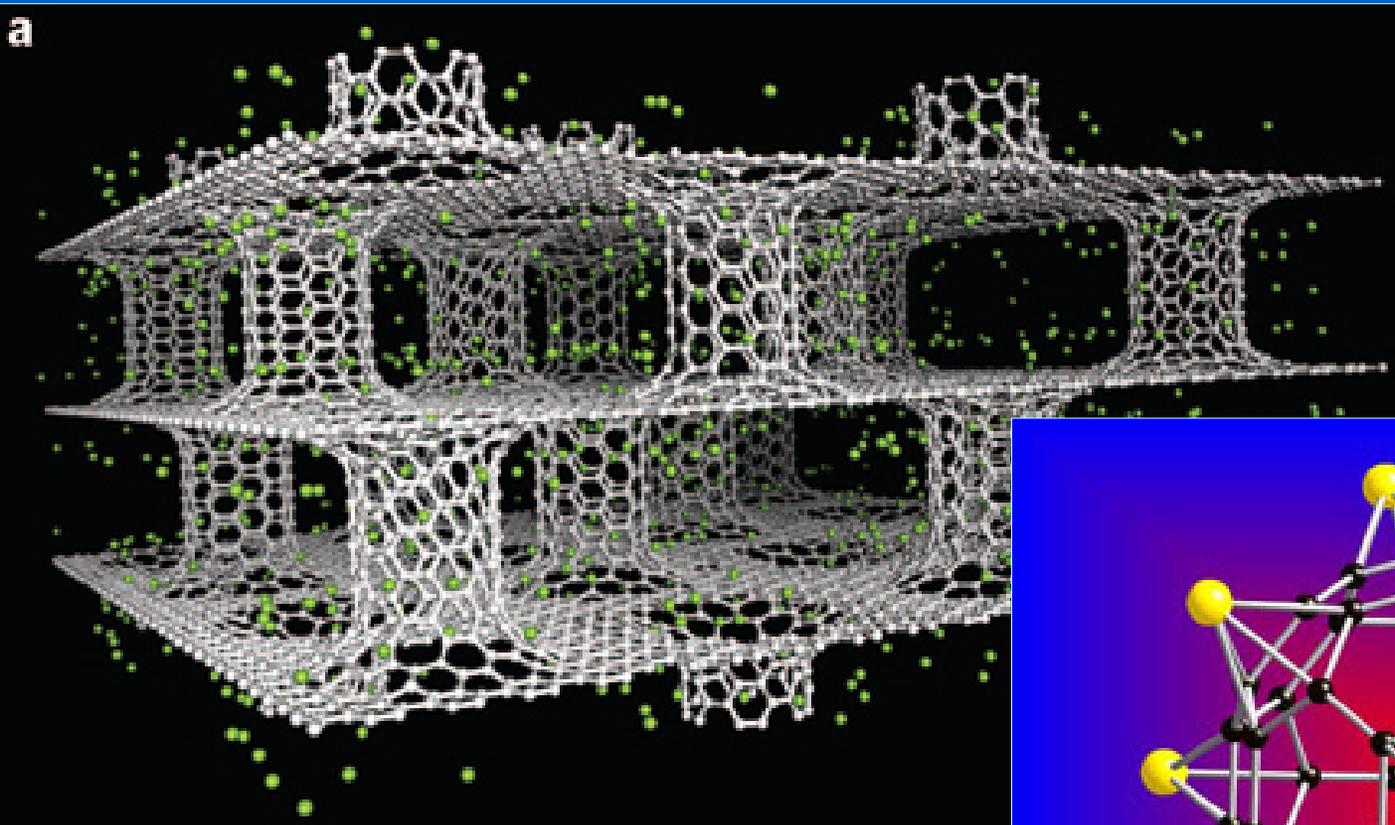
ФЭП на квантовых точках и проводящая сетка из УНТ



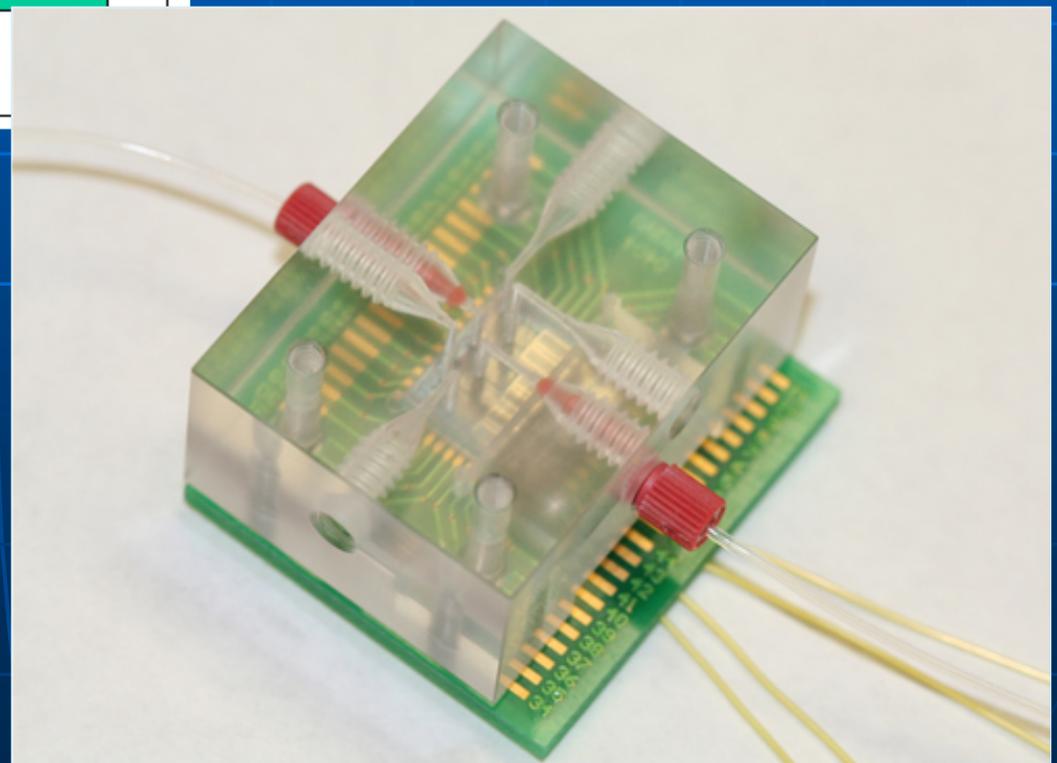
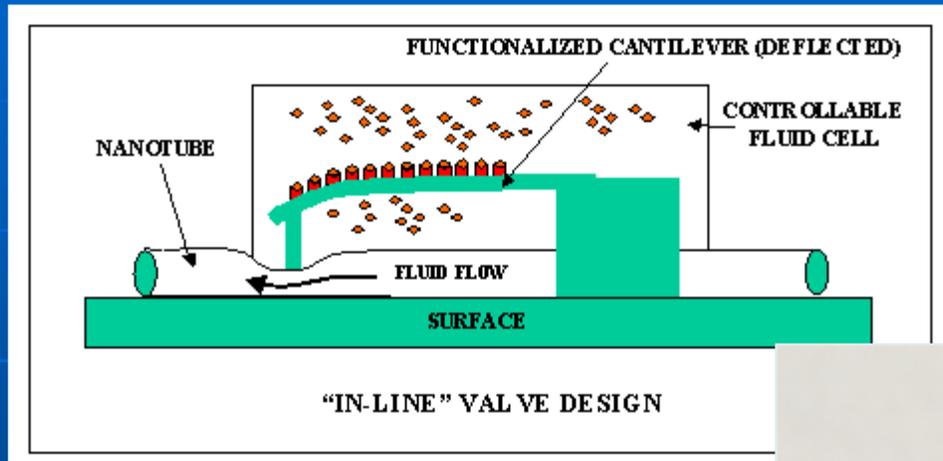
Технология изготовления самоизлечивающегося материала



Нанохранилища водорода



«Лаборатория-на-чипе»



Этапы развития космонавтики



1970-е – 2000-е

Прикладные космические программы:

- космические системы связи, радиовещание и телевидение;
- системы глобальной навигации;
- геодезия и картография;
- изучение атмосферы, земной поверхности, водных ресурсов;
- экология и климат;
- военные космические программы

1960-е – 2000-е

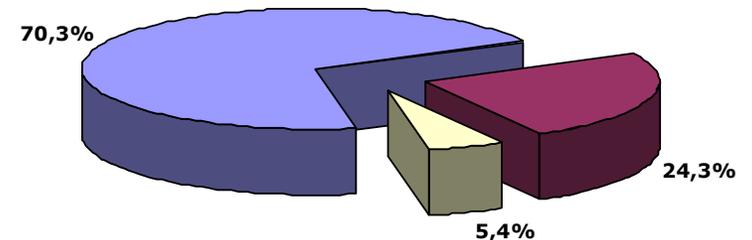
Исследования околоземного и межпланетного космического пространства, Луны и планет Солнечной системы
Космическое материаловедение

1957-1961

Прорыв в космос
Открытие РПЗ

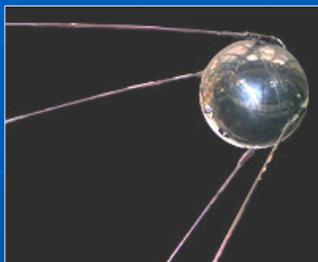
Рынок космических услуг в 2002 г

■ Телекоммуникации
■ Навигация
■ Другие



Динамика роста массы спутников

Масса



Спутники «Протон»
12000-17000 кг
1965-1968

«Интеграл»
4100 кг
2002

«Горизонт», «Экспресс»
2300-2600 кг
1980-1990-е

3-й советский ИСЗ
1327 кг
май 1958

2-й советский ИСЗ
508,3 кг
ноябрь 1957

1-й советский ИСЗ
83,6 кг
октябрь 1957

Explorer-1
8,3 кг
февраль 1958

Vanguard-1
1,5 кг
март 1958



Годы

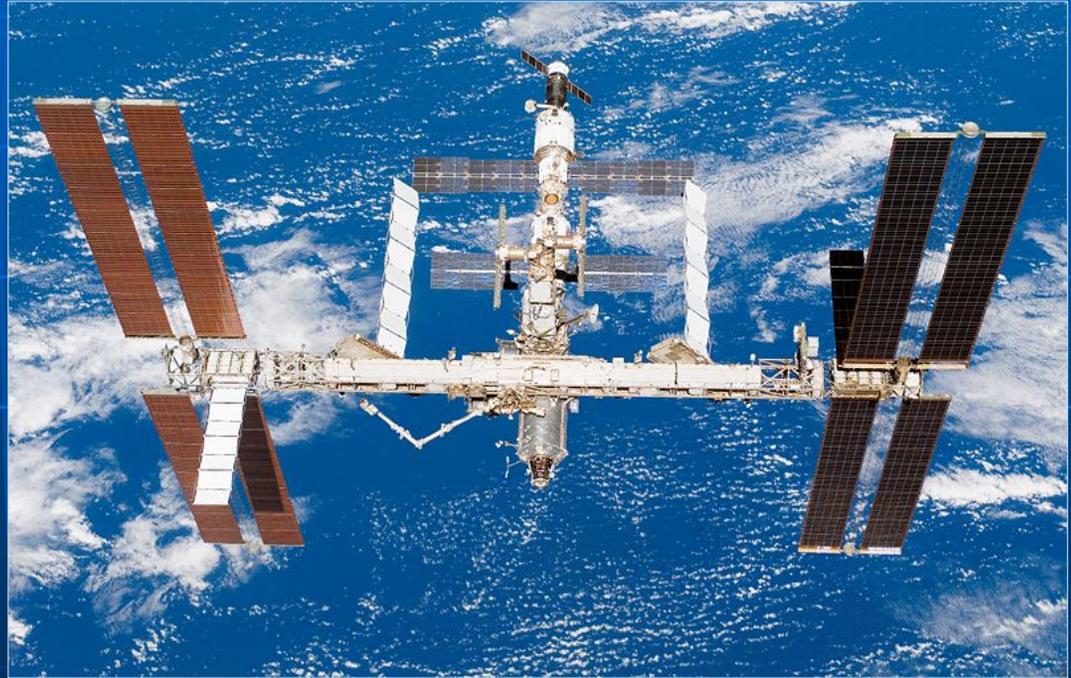
Орбитальные космические станции

Станция «МИР»



масса 140 т
размер ~ 35 м

Международная космическая станция



масса 250 т
размер ~ 70 м

Миниатюризация космических аппаратов

Масса



Миниспутники

500-100 кг



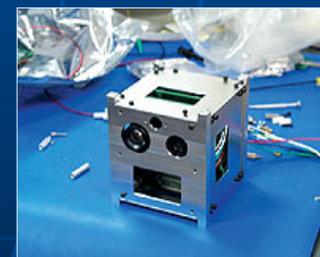
Микроспутники

100-10 кг



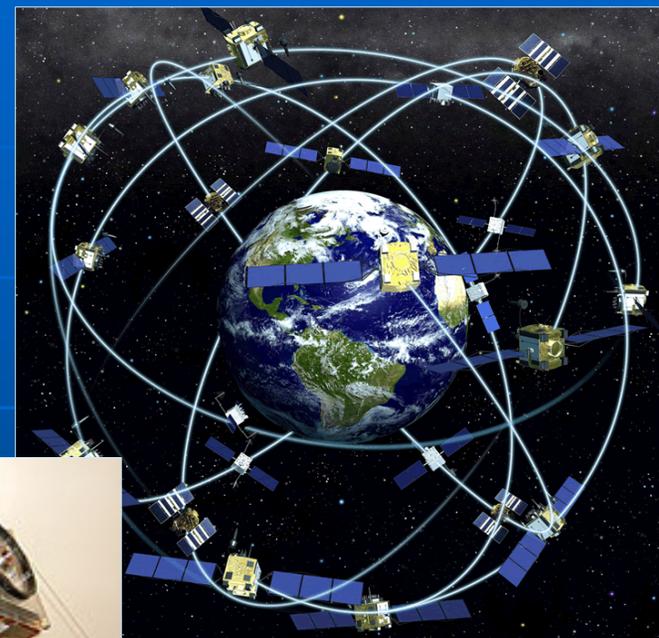
Наноспутники

10-1 кг



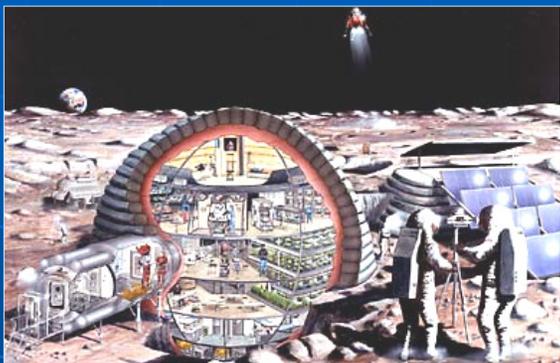
Пикоспутники

менее 1 кг

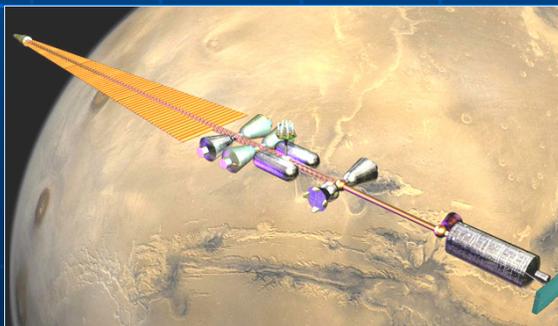


Крупнейшие космические проекты XXI века

- Строительство обитаемых баз на Луне



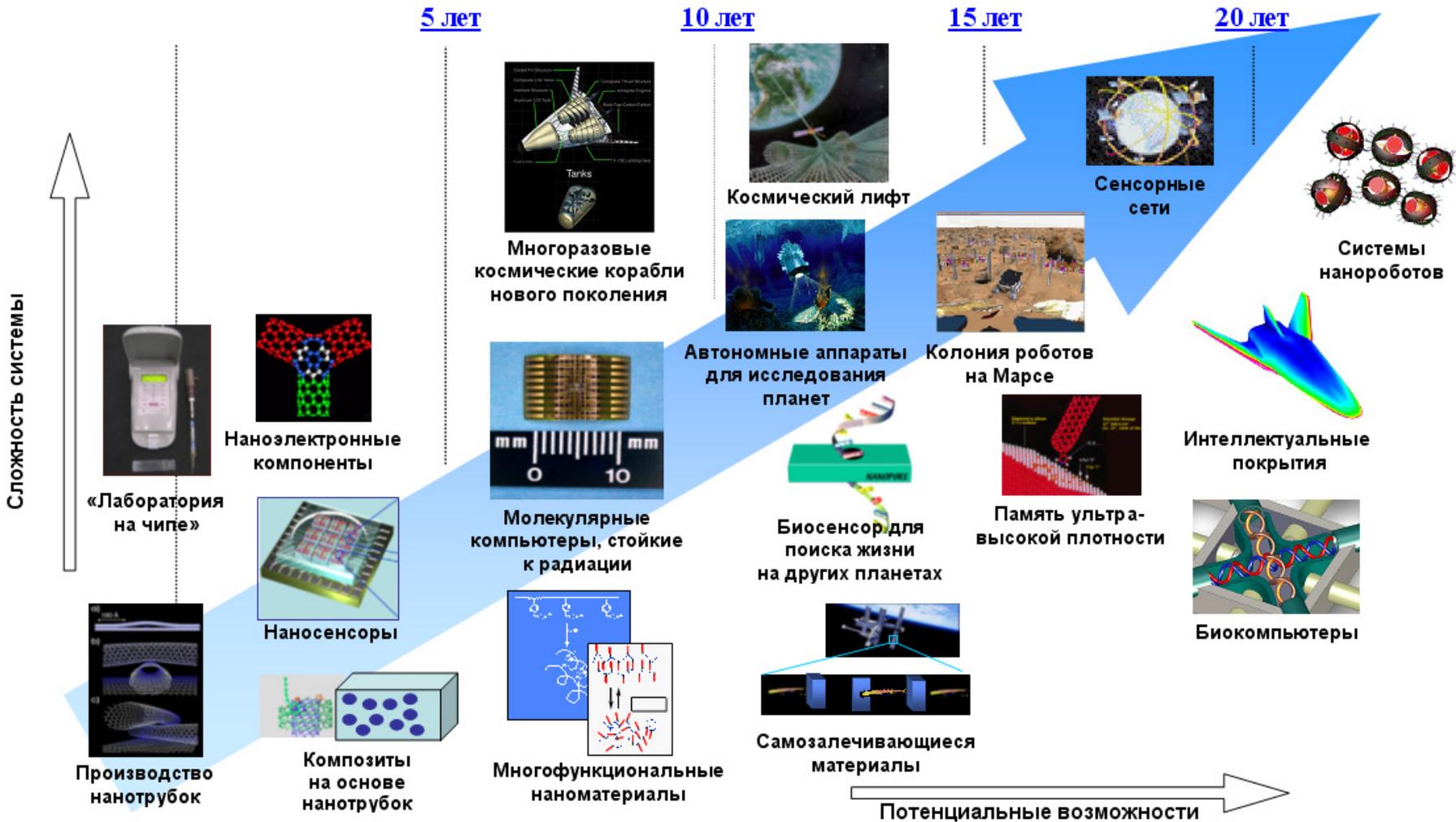
- Пилотируемый полет на Марс



- Полет автоматических космических аппаратов к Юпитеру с посадкой на его спутники: Калисто, Ганимед и Европа



ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОМАТЕРИАЛОВ



Высокопрочные материалы
(>10 ГПа)



Космические корабли многоразового использования
(снижение массы и шума на 20%)



Революционные концепции летательных аппаратов
(снижение массы на 30%, излучения – на 20%, рост дальности на 25%)



Автономные космические аппараты
(снижение массы на 40%)



Самовосстанавливающиеся аппараты для межпланетных полетов

Повышение уровня сложности и интеграции системы →

Материалы

- Волокна из однослойных нанотрубок
- Композиты на основе нанотрубок
- Терморегулирующие и теплозащитные покрытия
- Интеллектуальные материалы
- Материалы, имитирующие биосистемы

Электроника

- Электронные компоненты на основе нанотрубок
- Молекулярные системы хранения информации
- Отказоустойчивая электроника, стойкая к радиации
- «Нанoeлектронный мозг»
- Биовычислительные системы

Сенсоры

- Нанозонды в космосе
- Нанокomпоненты оборудования космических аппаратов
- Квантовые навигационные сенсоры
- Интегрированные наносенсорные системы
- Наноразмерные электромеханические системы

Микро / нано / пикоспутники

аппараты для межпланетных полетов
орбитальные аппараты
спускаемые аппараты

Нано-микро-макро интеграция

сенсоры
элементы электроники
аппаратура
системы обмена
информацией и управления

Наноматериалы

конструкционные
функциональные
интеллектуальные

**Применение
наноматериалов
и наноустройств
на современных и
перспективных
космических
аппаратах**

Наноробото- техника

переключающие и управляющие
устройства
наномеханизмы
молекулярные системы

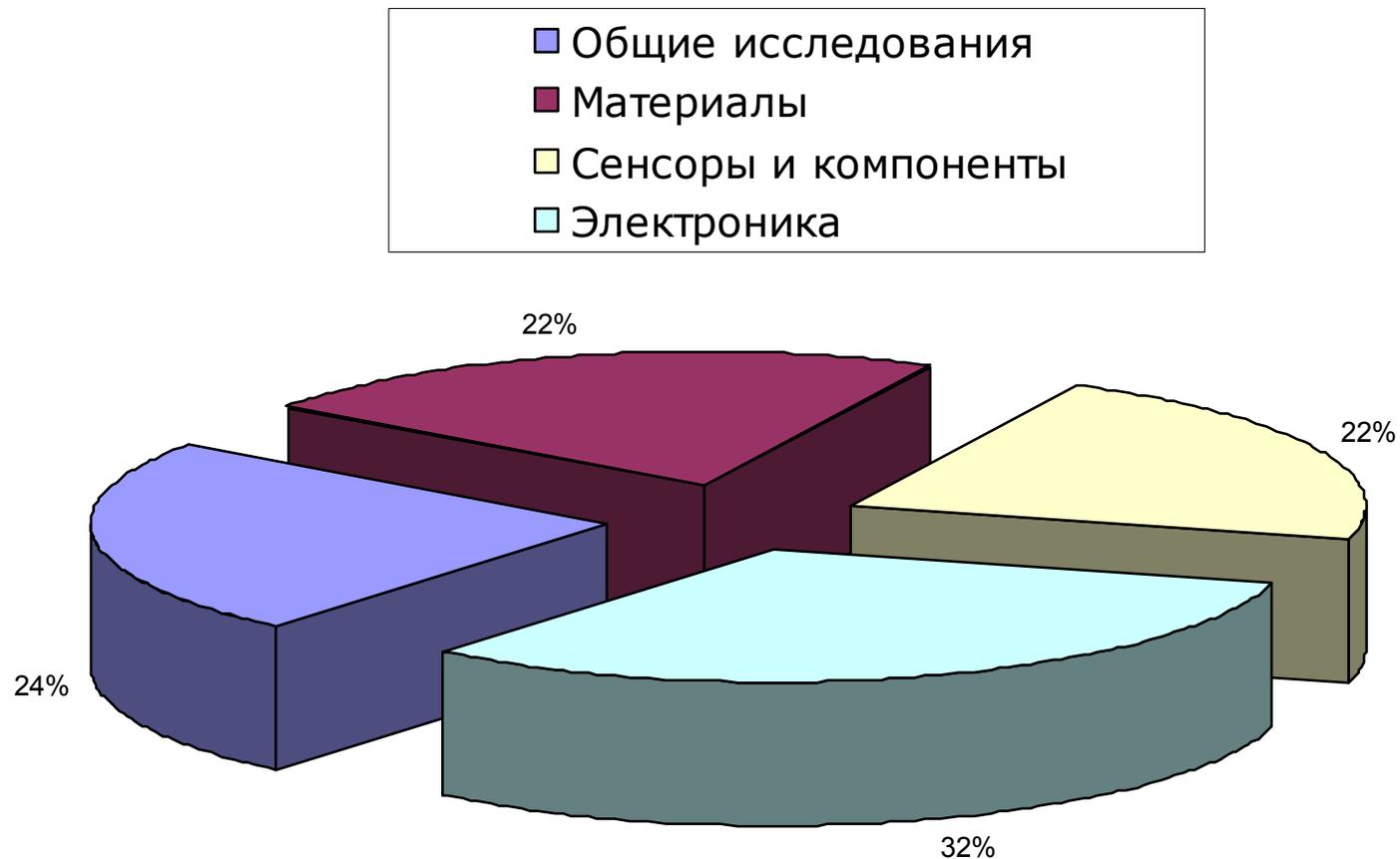
Наносенсоры и аппаратура

мониторинг и анализ окружающей
среды
контроль состояния
аппарата

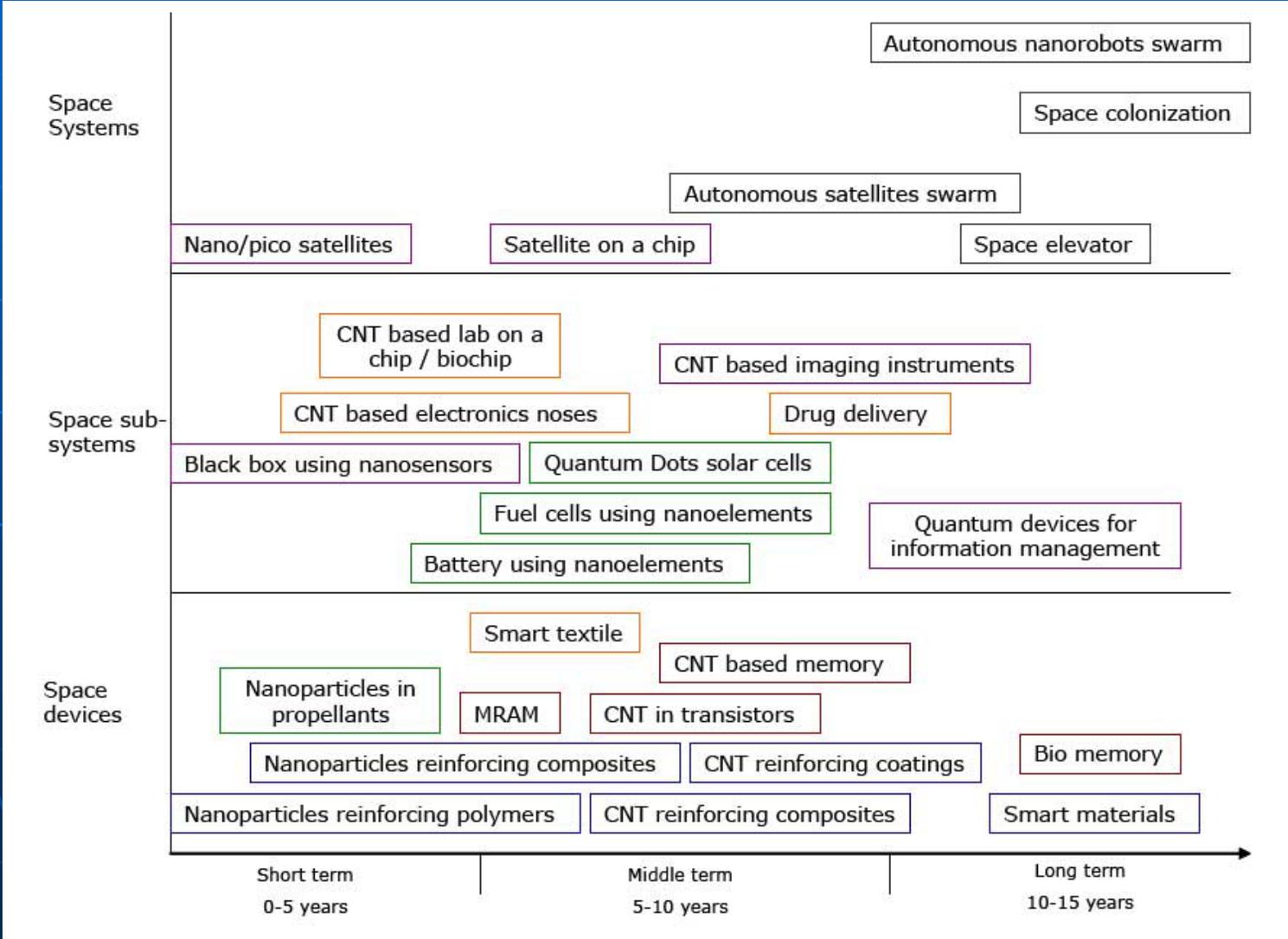
Системы контроля здоровья экипажа

персональный биомедицинский мониторинг
биомедицинские исследования
профилактические мероприятия
медицинские процедуры

Распределение финансирования работ NASA в области нанотехнологий в 2002 г.



Программа ESA развития космических технологий



Программы развития нанотехнологий в России

- 2007
Президентская инициатива «Стратегия развития nanoиндустрии»
«...Новые системы управления, легкие и прочные конструкционные материалы значительно увеличат надежность и снизят стоимость летательных аппаратов всех типов, прежде всего самолетов и космических кораблей»
- 2007
ФЦП «Развитие nanoиндустрии в Российской Федерации на 2008–2010 годы»
- 2008
«Программа развития nanoиндустрии в Российской Федерации до 2015 года»
- 2007-2008
Концепция «Программы развития в Российской Федерации системы образования в области нанотехнологий»
- «Федеральная космическая программа России на 2006–2015 годы»

Сроки выхода наноматериалов на рынок (прогноз)



Программа NASA применения нанотехнологий при освоении планет Солнечной системы



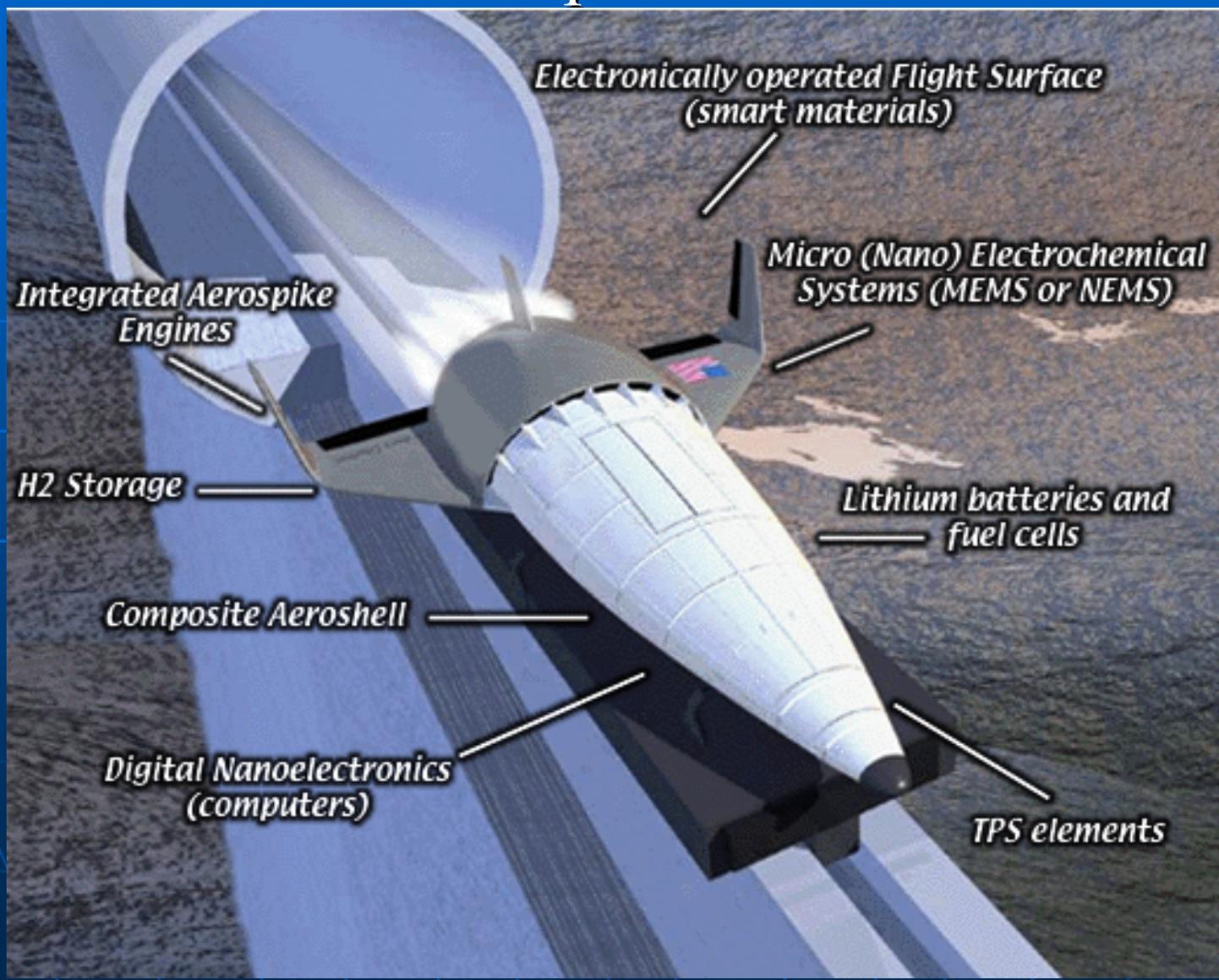
2005

2015

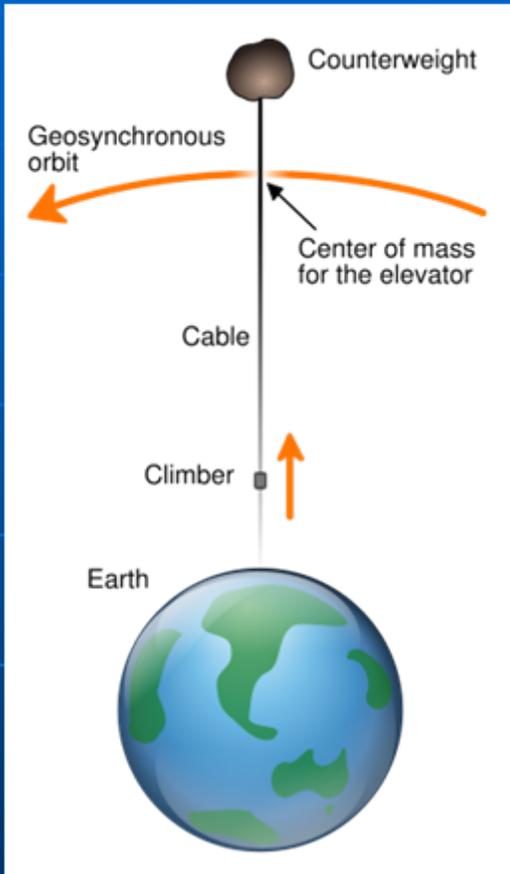
2025

2035

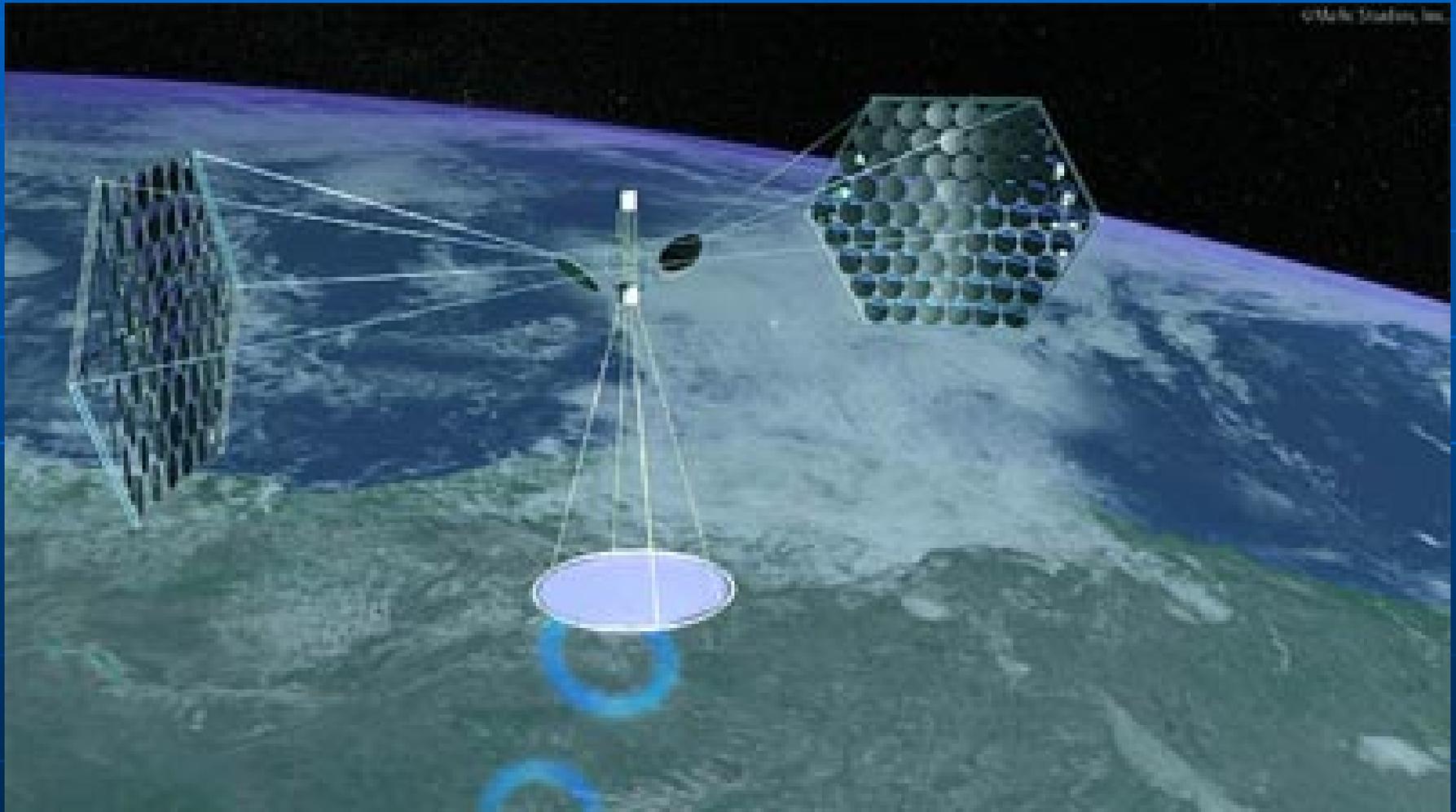
Перспективный транспортный космический корабль



Космический лифт



Солнечная космическая электростанция



Основные виды материалов космической техники

□ Конструкционные материалы:

металлы

сплавы

композиты, *нанокомпозиты* и *нано-нанокомпозиты*

керамики, *нанокерамики*

□ Функциональные материалы:

терморегулирующие и защитные покрытия

герметики

лакокрасочные материалы

пленки

оптические материалы

полупроводниковые материалы и т.д.

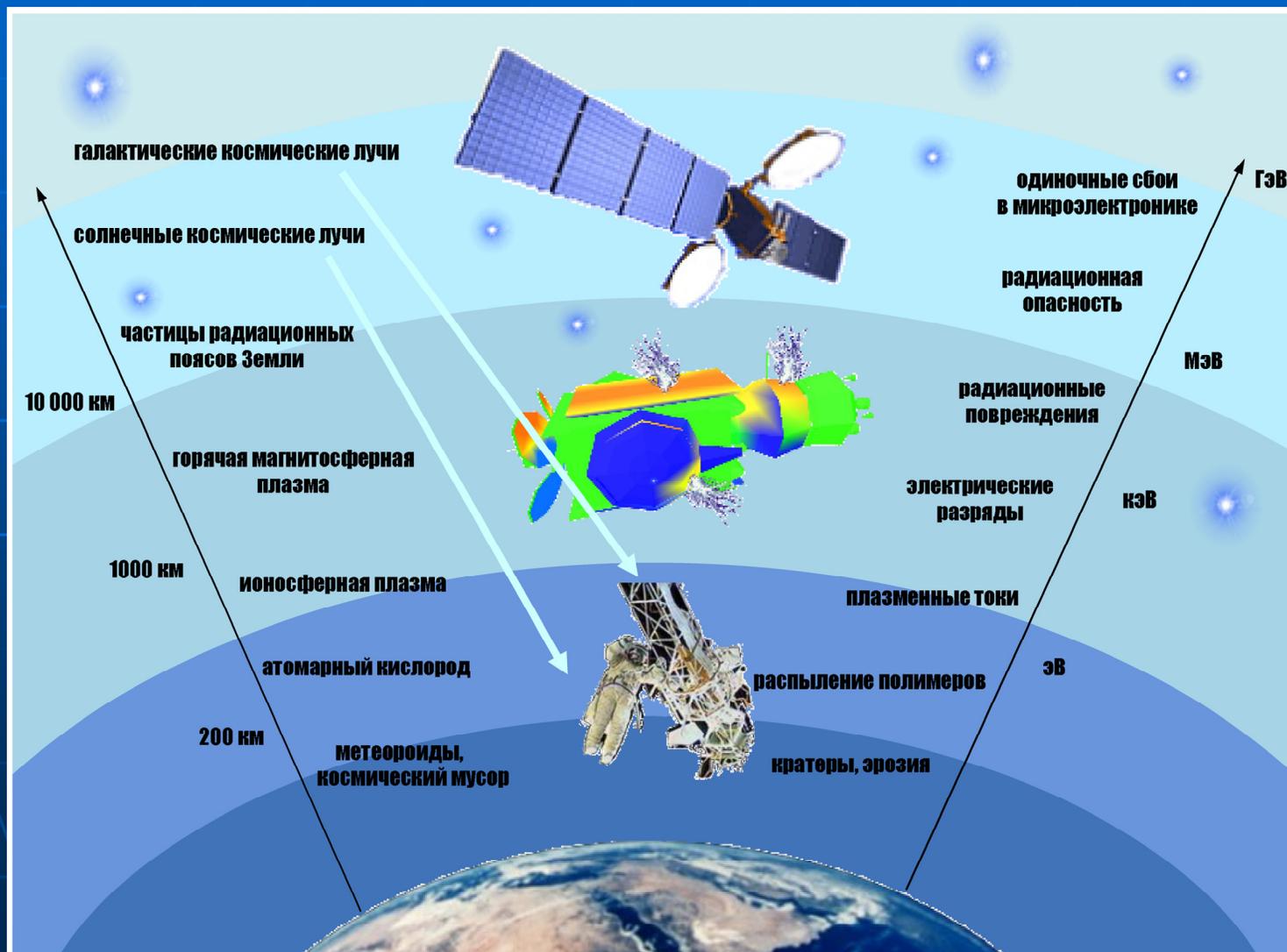
□ Интеллектуальные (smart) материалы:

специальные покрытия с изменяющимися свойствами

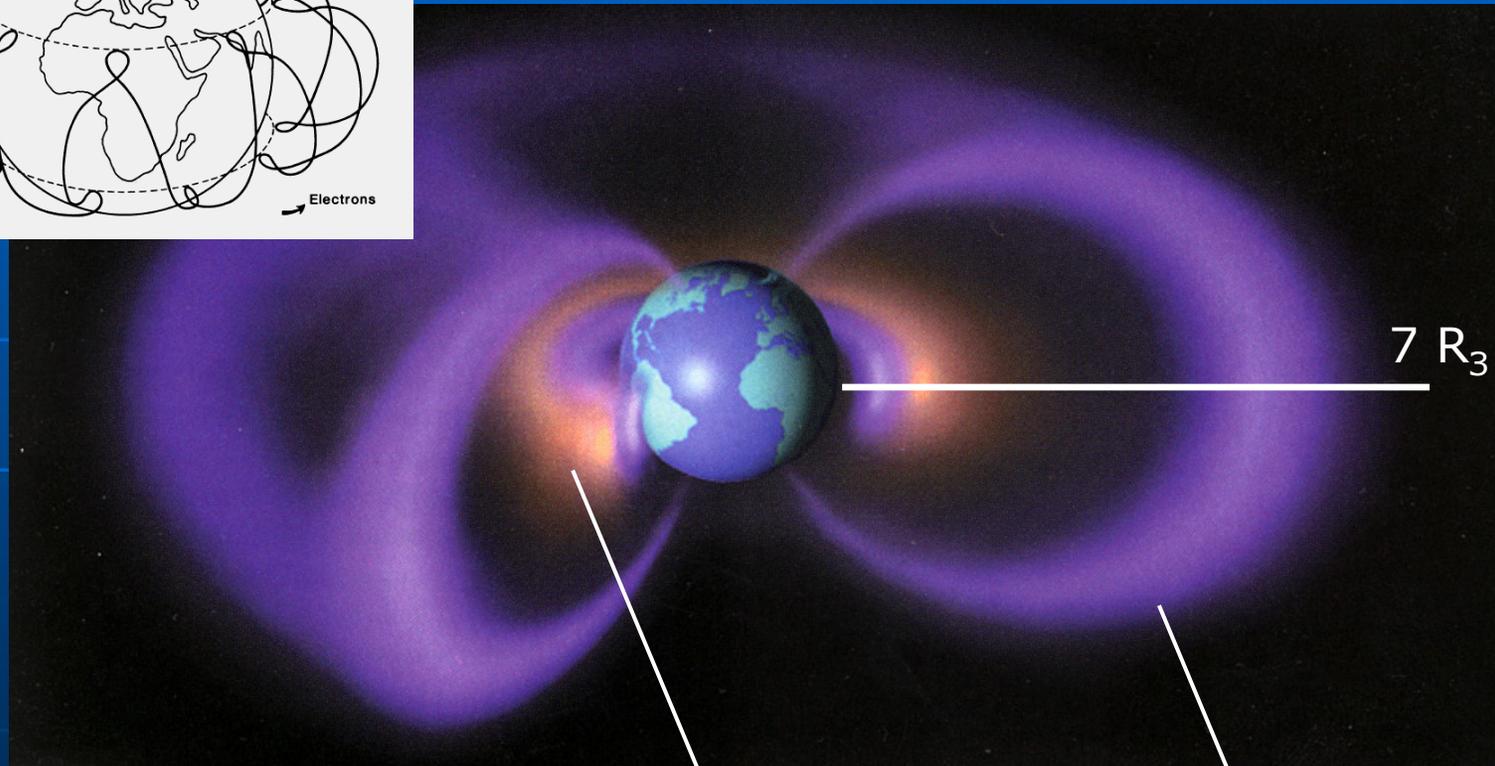
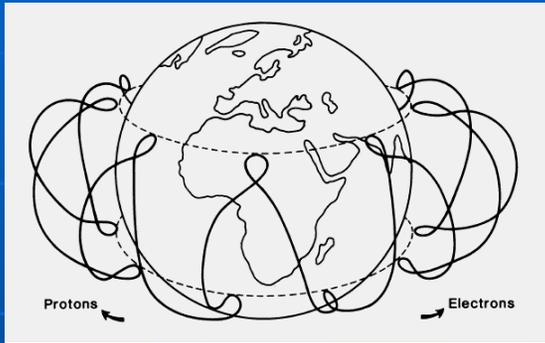
электротехнические и радиотехнические материалы

сплавы с памятью формы

Эффекты воздействия факторов космического пространства на КА

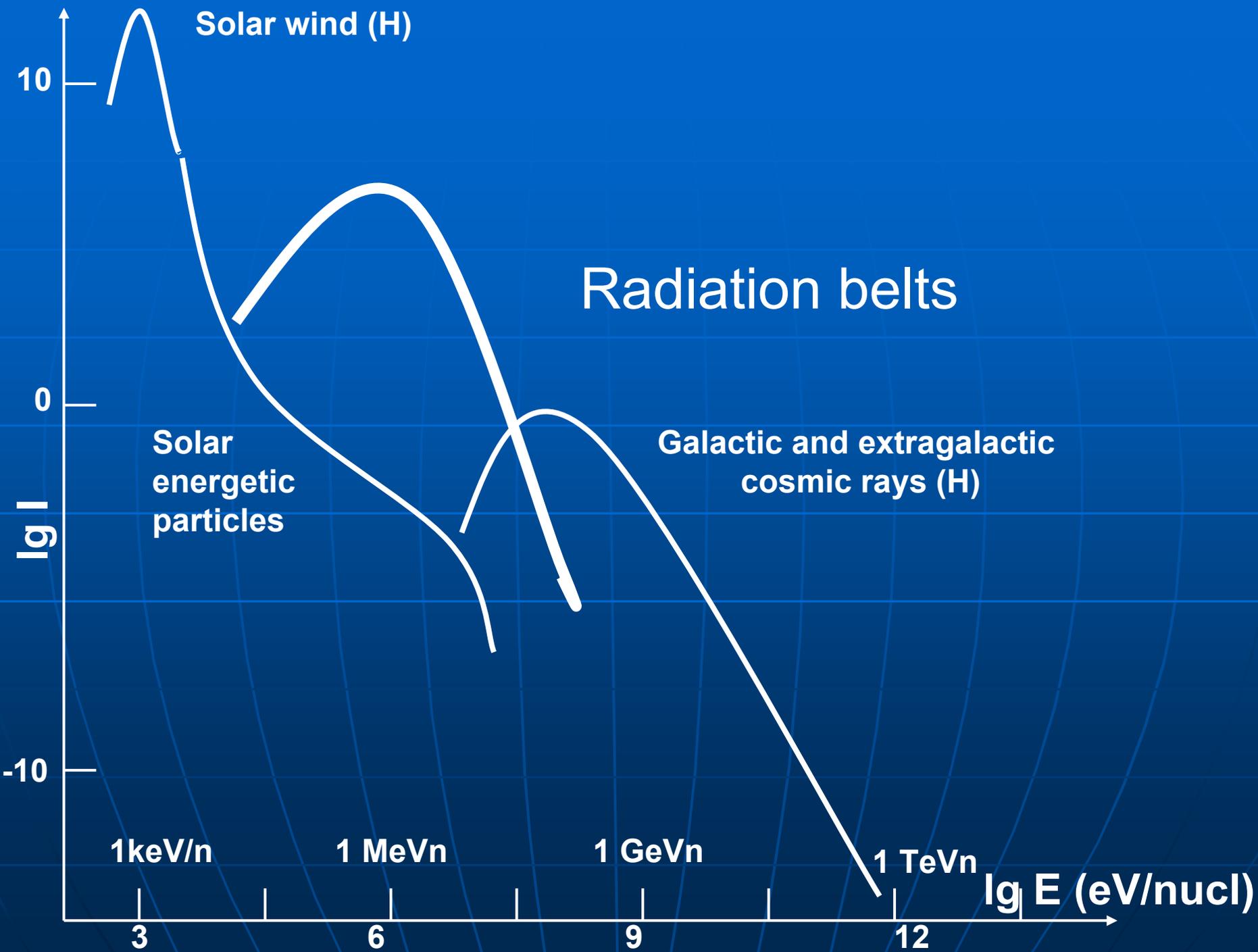


Радиационные пояса Земли



Внутренний пояс
(протоны)

Внешний пояс
(электроны)



Воздействие космической радиации

- Воздействие космической радиации на материалы и элементы оборудования является одной из главных причин возникновения отказов в работе бортовых систем КА. Радиационные условия в космическом пространстве определяются совокупностью потоков частиц и квантов, энергии которых лежат в диапазоне $\sim 10^3 - 10^{21}$ эВ.
- В результате радиационных воздействий в материалах и элементах оборудования КА возникают обратимые и необратимые эффекты. Такие эффекты принято разделять на два класса:
 - 1 – обусловленные суммарной поглощенной дозой космической радиации (в некоторых случаях следует рассматривать также эффекты, связанные с мощностью поглощенной дозы);
 - 2 – вызываемые попаданием в элементы оборудования одиночных заряженных частиц.
- Дозовые эффекты проявляются в постепенной деградации (ухудшении свойств) материалов, а эффекты, которые вызываются одиночными заряженными частицами, опасными прежде всего для элементной базы современной микроэлектроники, возникают непосредственно после воздействия.

Эффекты от отдельных ядерных частиц

Эффекты в ИС, вызываемые воздействием ОЯЧ (локальные радиационные эффекты) активно исследуются в течение последних 30 лет применительно к протонам и ионам космического происхождения.

Основные эффекты, вызываемые воздействием ОЯЧ:

- ❑ одиночные сбои (ОС) ячеек памяти;
- ❑ многократные сбои из-за образования одиночных сбоев в нескольких соседних ячейках памяти;
- ❑ импульсные сигналы на выходах аналоговых и цифровых ИС;
- ❑ тиристорный эффект в четырехслойной паразитной структуре;
- ❑ вторичный пробой p-n переходов.

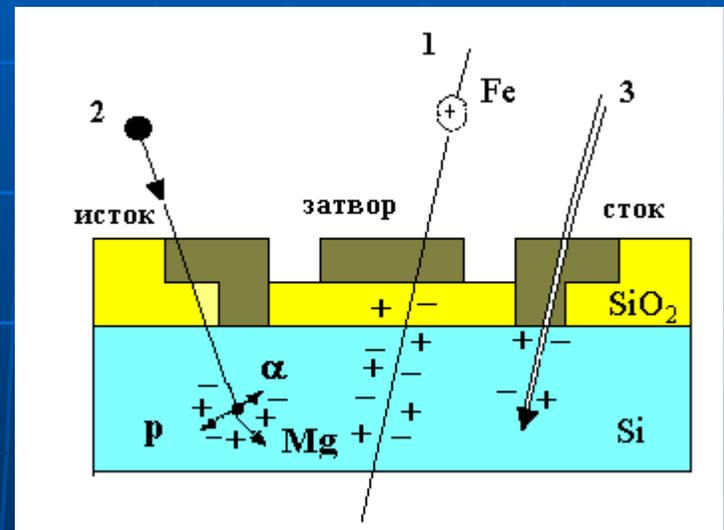
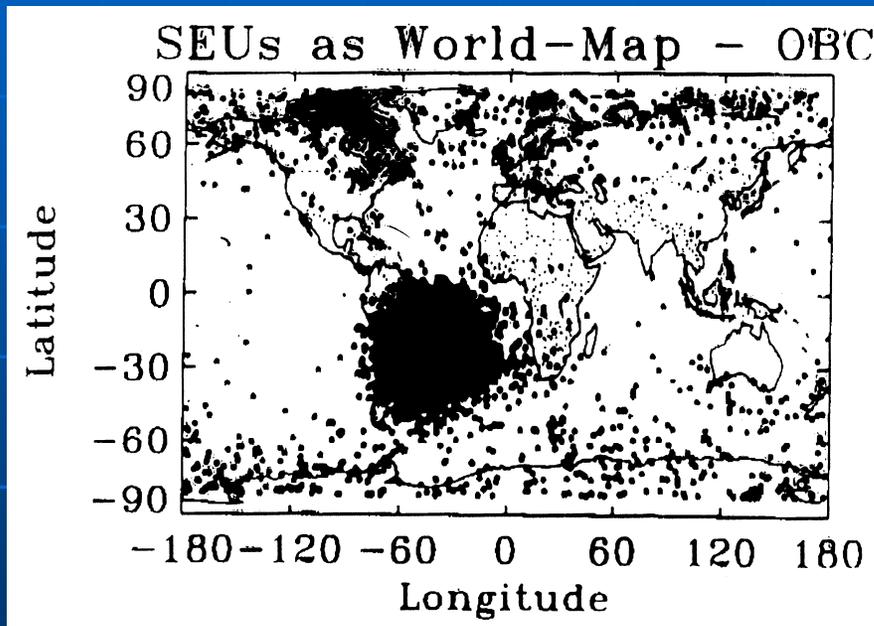
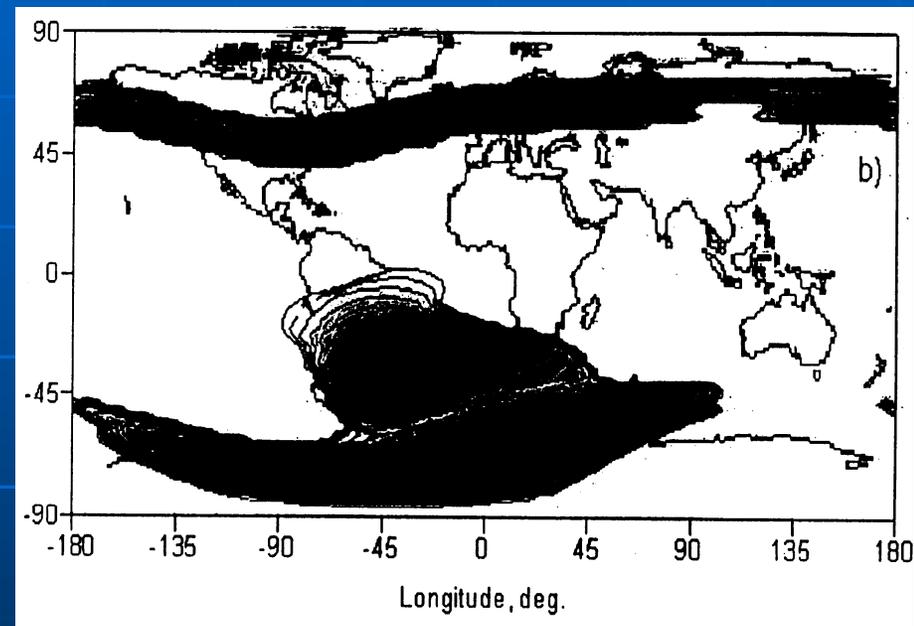


Схема эффектов от ОЯЧ в МОП-транзисторе:
1 – воздействие тяжелого ядра ГКЛ;
2 – ядерная реакция, вызываемая высокоэнергетическим протоном РПЗ;
3 – поток излучения при имитационных испытаниях

Локализация сбоев в работе электронного оборудования низкоорбитального КА



Локализация сбоев в области Южно-Атлантической магнитной аномалии и высокоширотных зонах проникновения частиц РПЗ



Пространственное распределение потока частиц РПЗ на высоте орбиты КА (700 км)

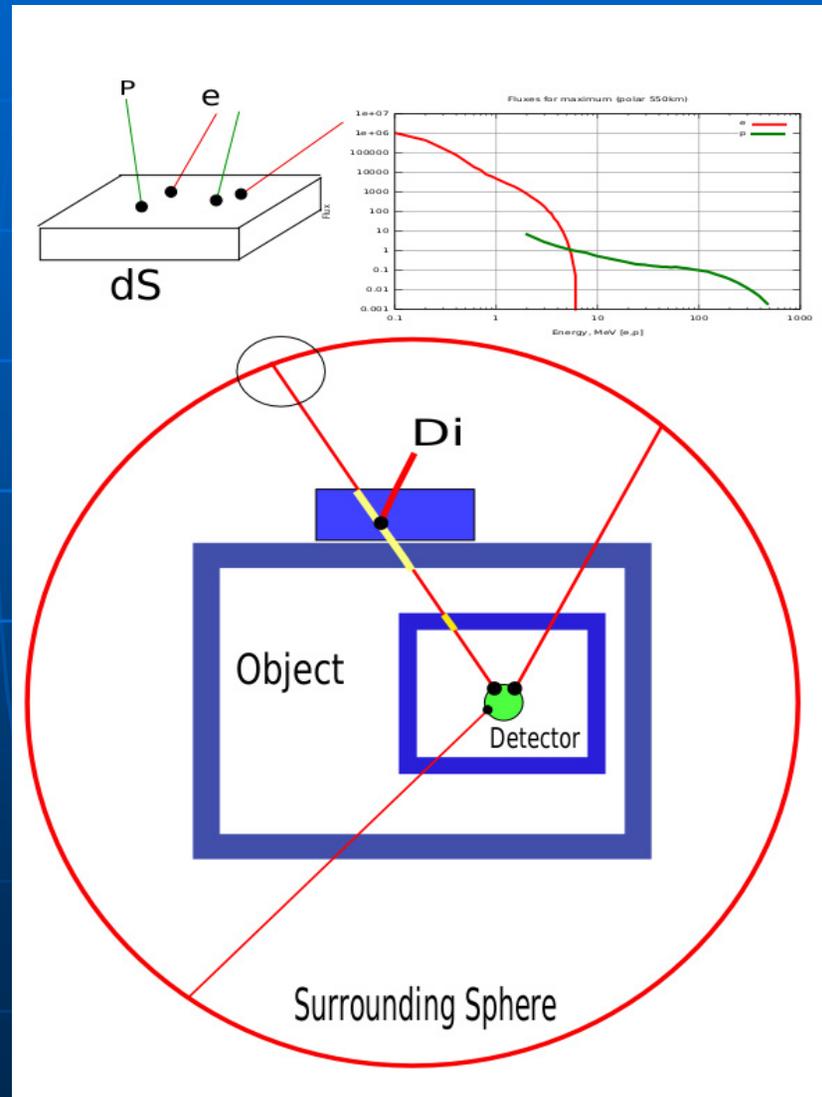
Схема организации исследований воздействия космической радиации



Инженерная модель расчета поглощенной дозы в элементах конструкции КА

Элементарная площадка на поверхности условной сферы, окружающей исследуемый объект

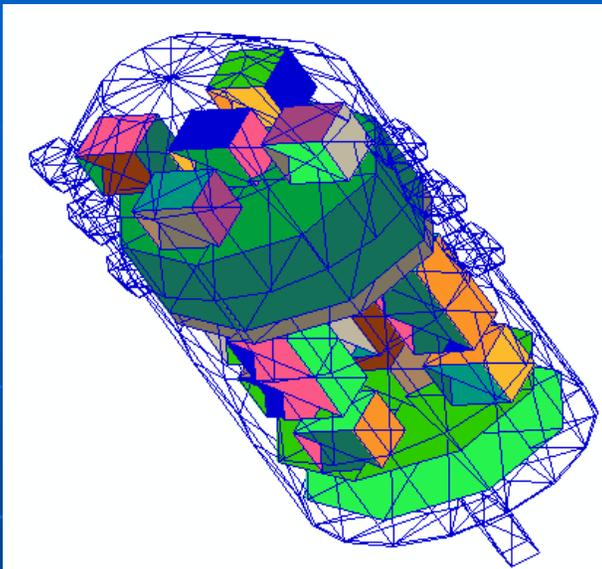
Исследуемый объект, состоящий из нескольких вложенных оболочек, помещенных внутри расчетной сферы



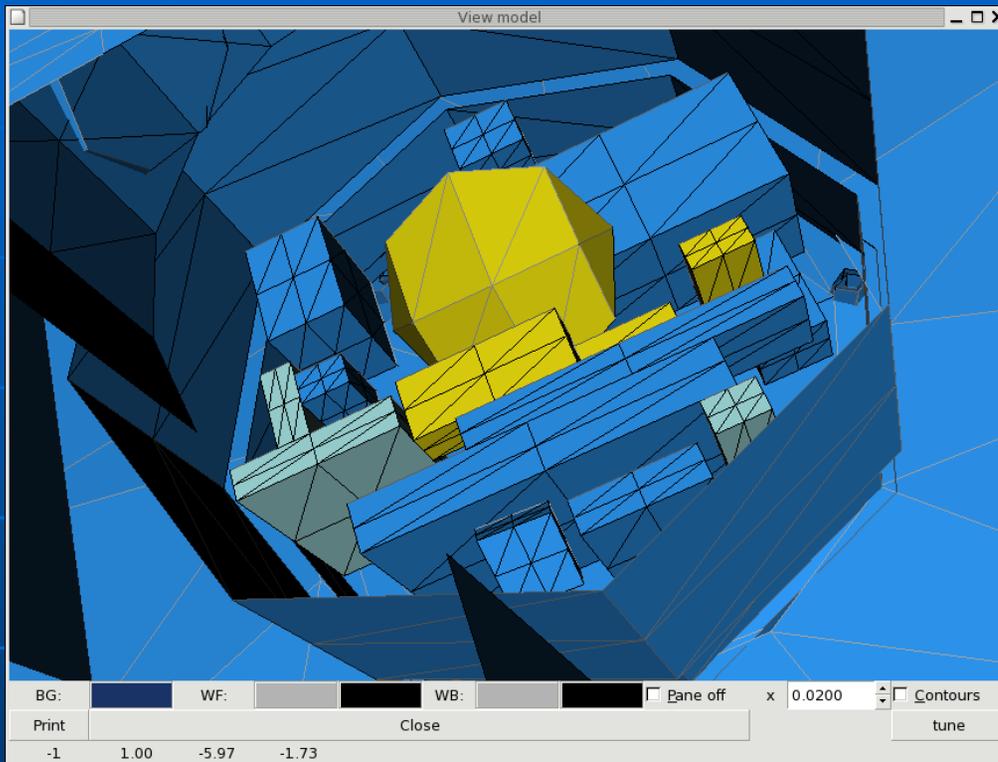
Энергетические спектры частиц космической радиации

Для детектора, находящегося в любой точке внутри объекта, определяется эквивалентная толщина защиты по совокупности лучей, направленных к элементарным площадкам на поверхности сферы

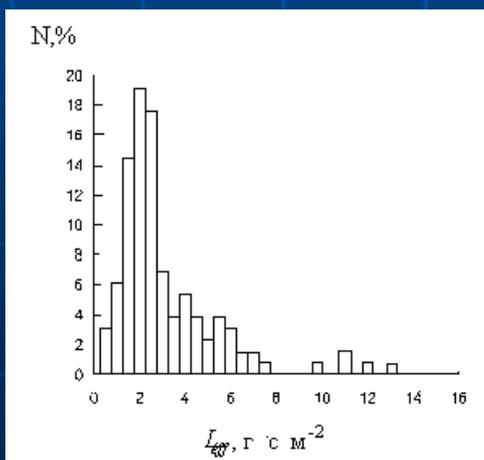
Геометрические модели космических объектов



а



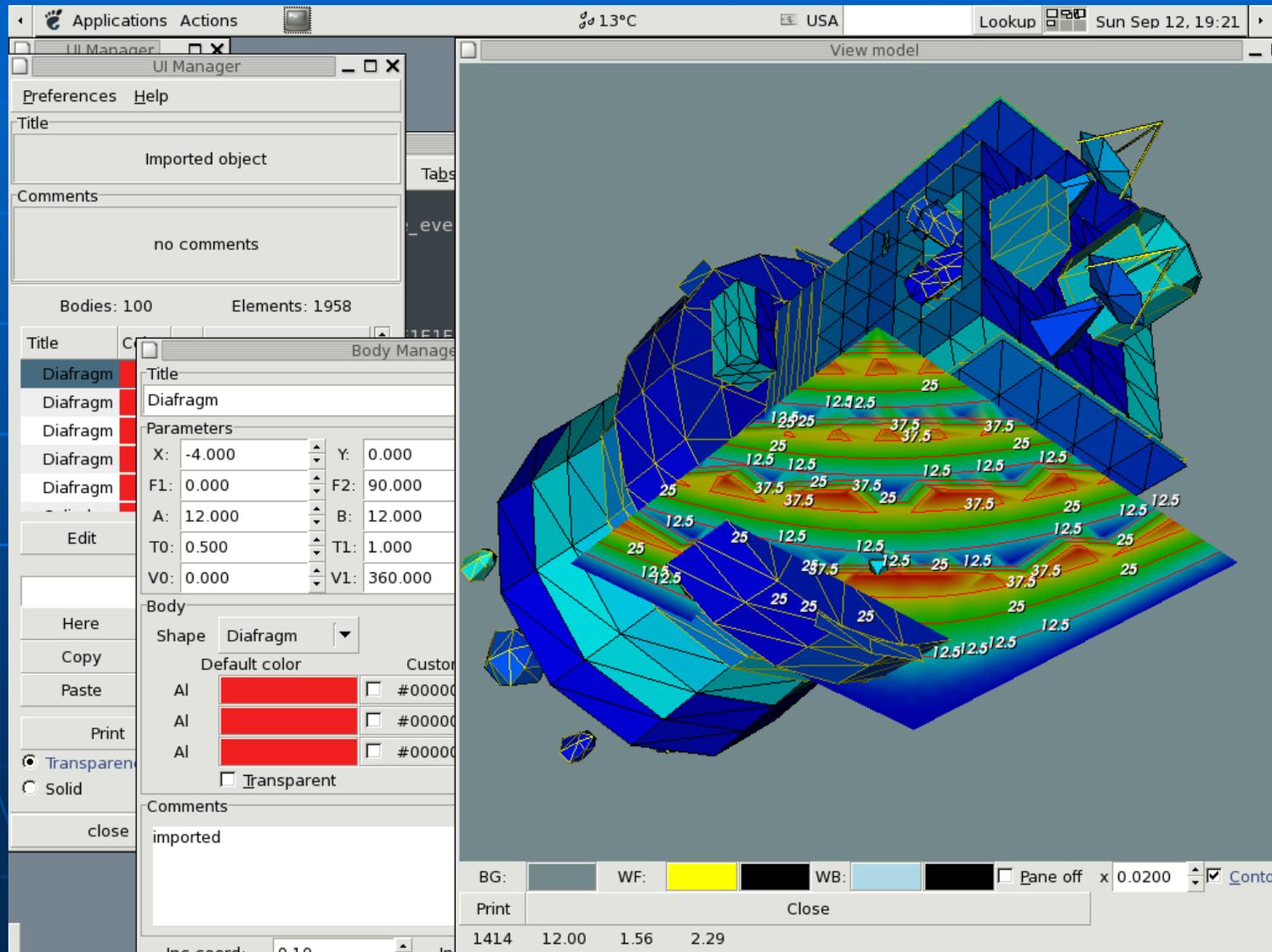
б



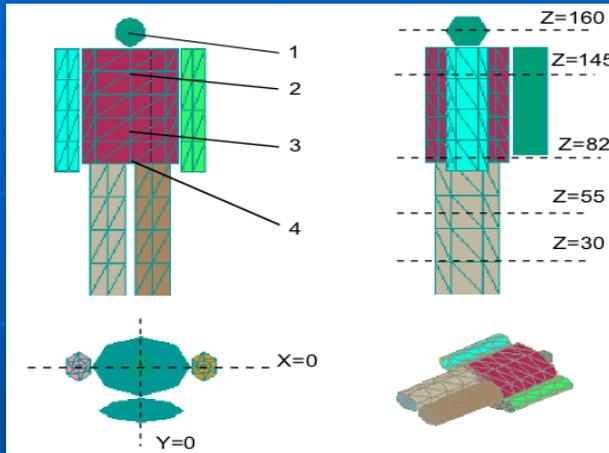
в

Расчетные модели с внутренними элементами конструкции фрагмента модуля МКС (а), приборного отсека научного КА (б) и распределение толщин эквивалентной защиты по лучам для точки внутри объекта (в): по оси абсцисс отложена толщина защиты (г·см⁻²), по оси ординат – число лучей

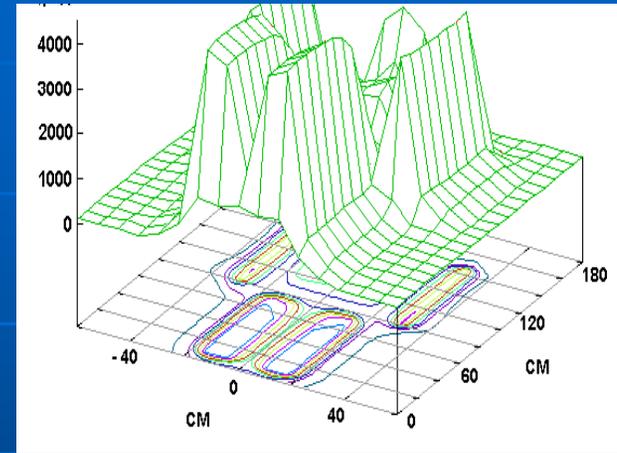
Графический интерфейс пользователя



Примеры результатов расчета пространственного распределения поглощенной дозы

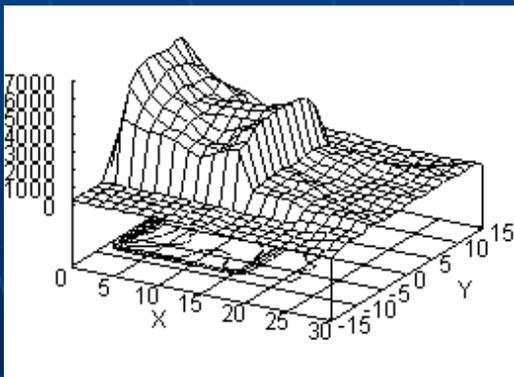


Доза, мрад/сут

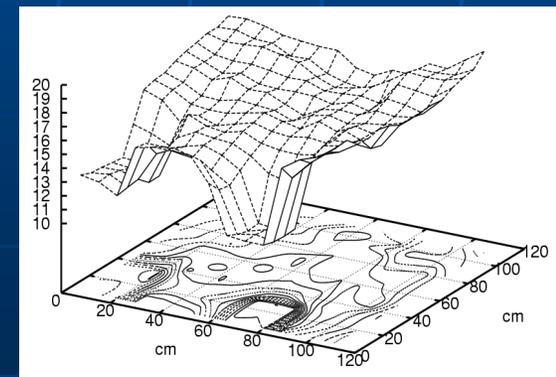


Расчетная модель космического скафандра и распределение поглощенной дозы внутри него

Доза, мрад/сут



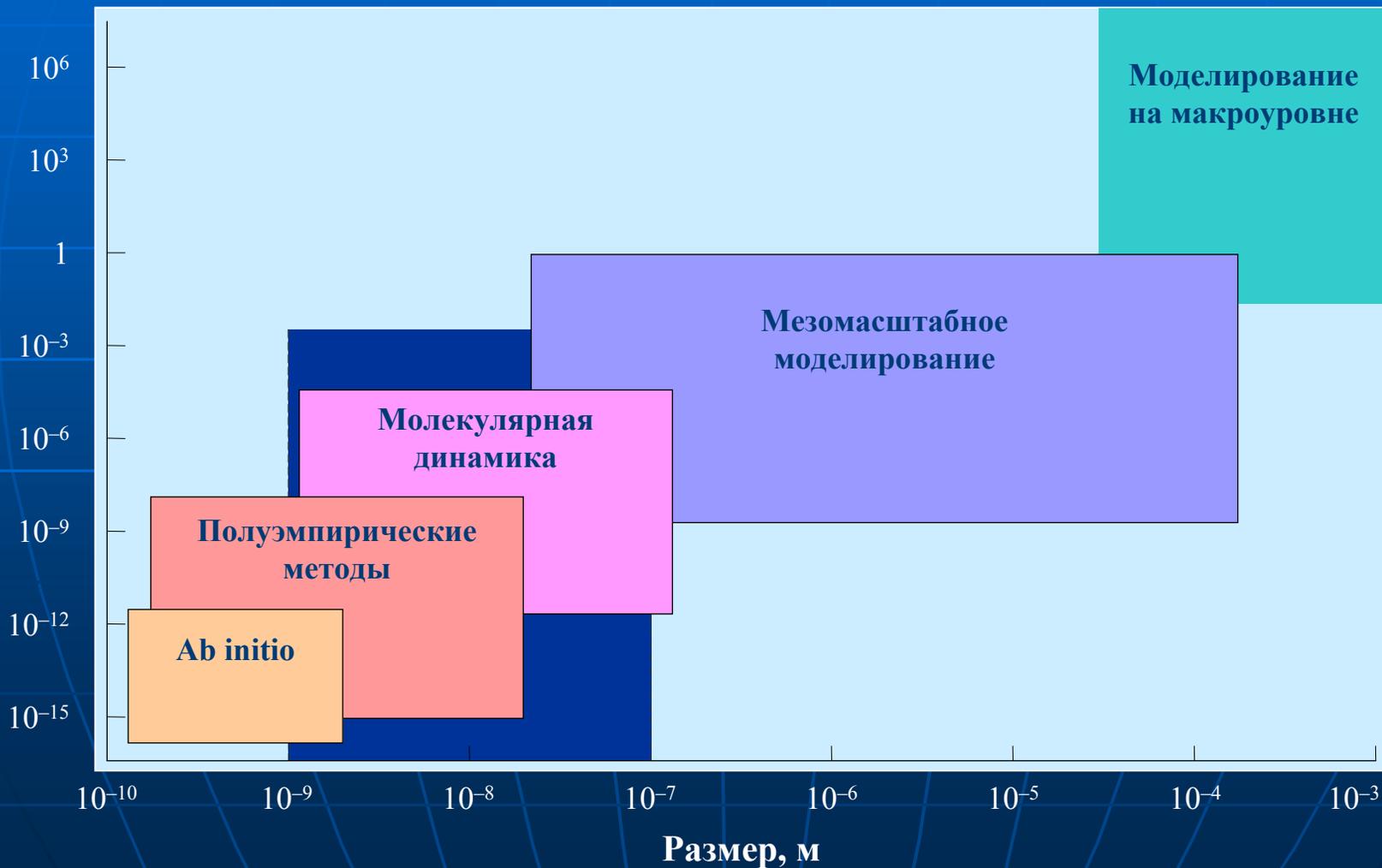
Доза, мрад/сут



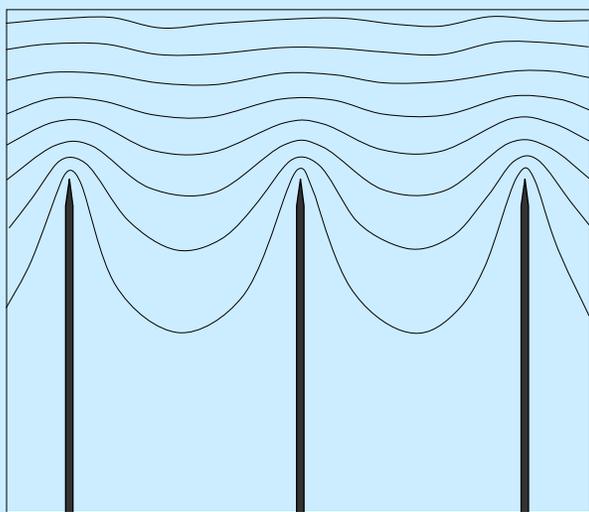
Распределение поглощенной дозы внутри фрагментов КА;
в нижней части рисунков показаны изолинии дозы в горизонтальных сечениях

Многомасштабное моделирование

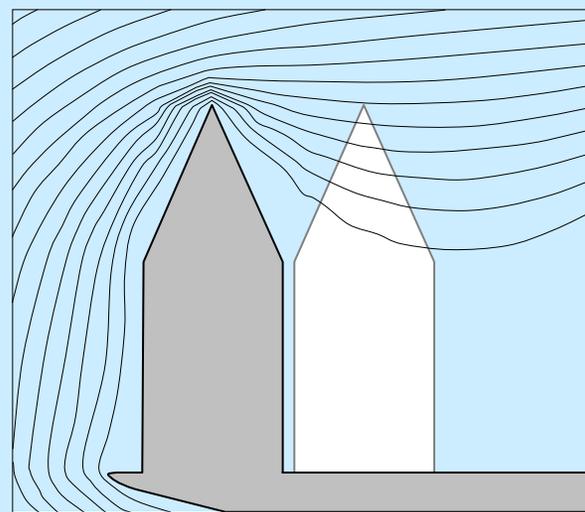
Время, с



Расчет электрических полей



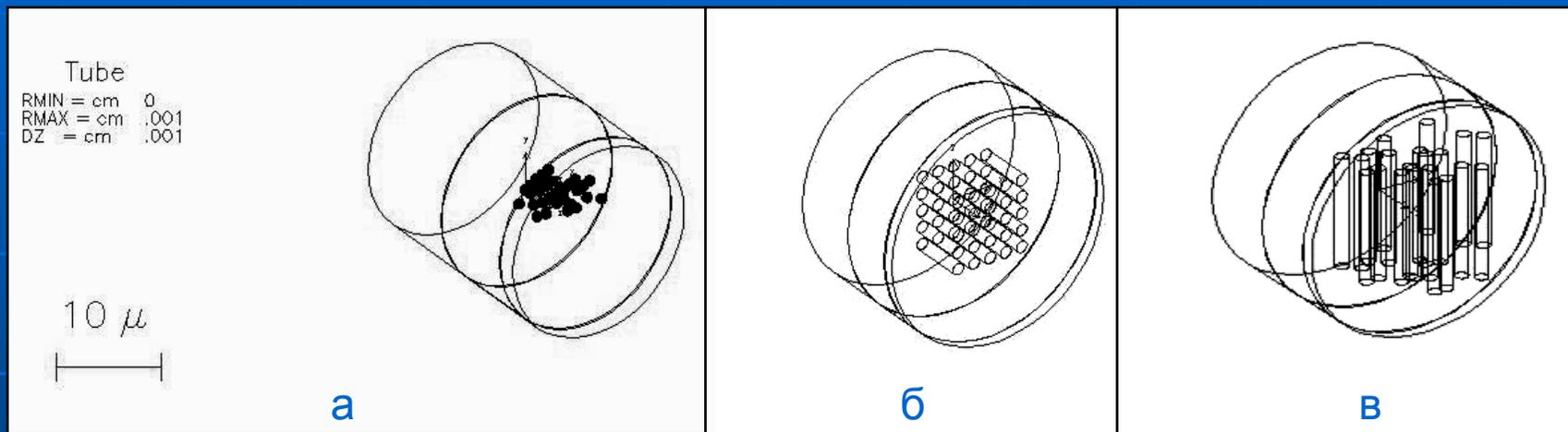
а



б

а – структура электрического поля вблизи УНТ;
б – результаты расчета структуры поля для элементов конструкции КА

Моделирование наноструктур GEANT 3



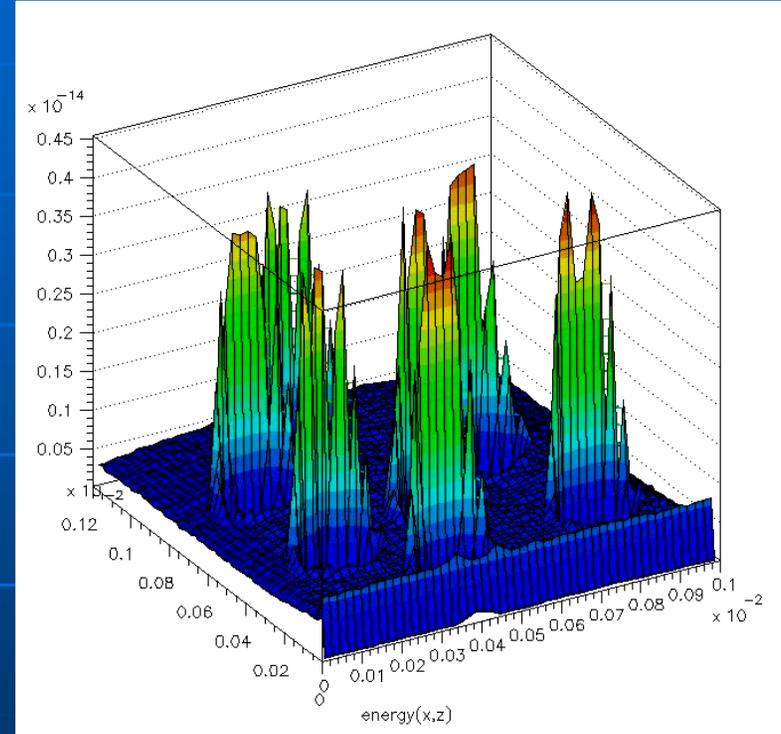
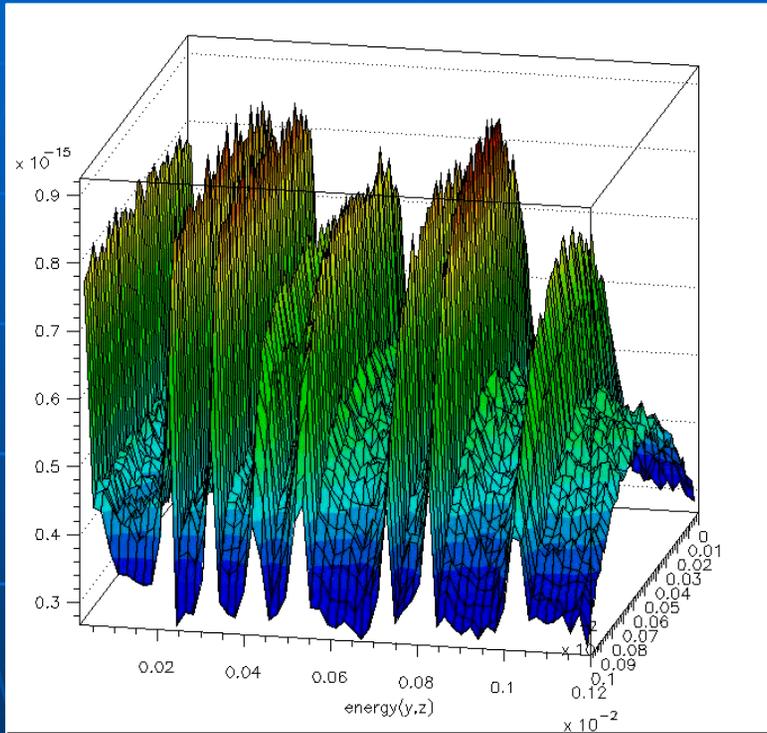
Модель кремниевого цилиндра:

а - с внедренными углеродными шариками;

б - с внедренными углеродными стержнями, ориентированными перпендикулярно поверхности кремния;

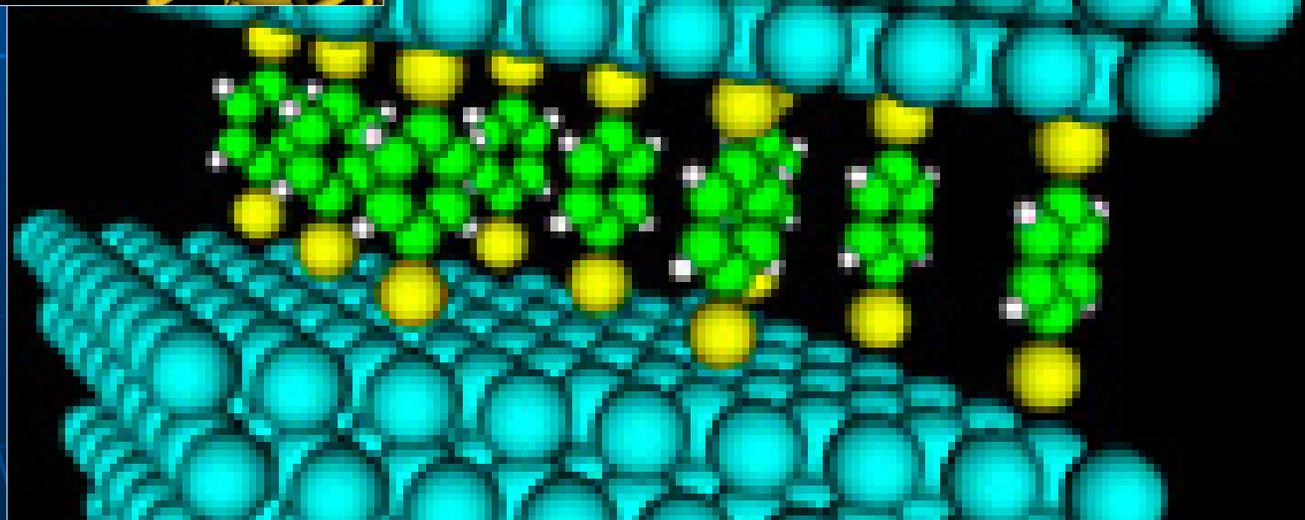
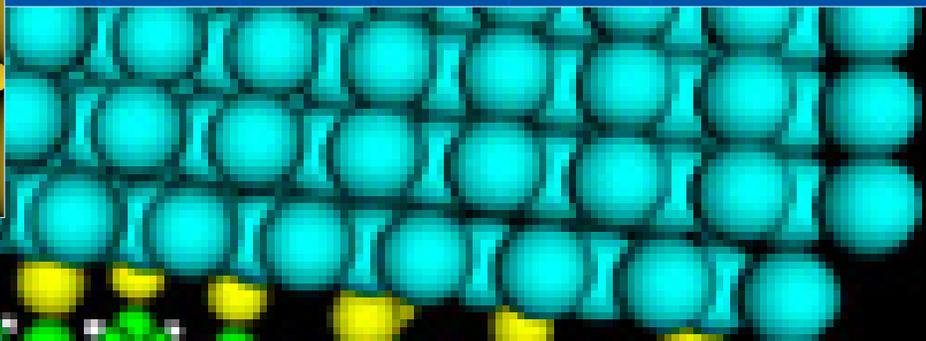
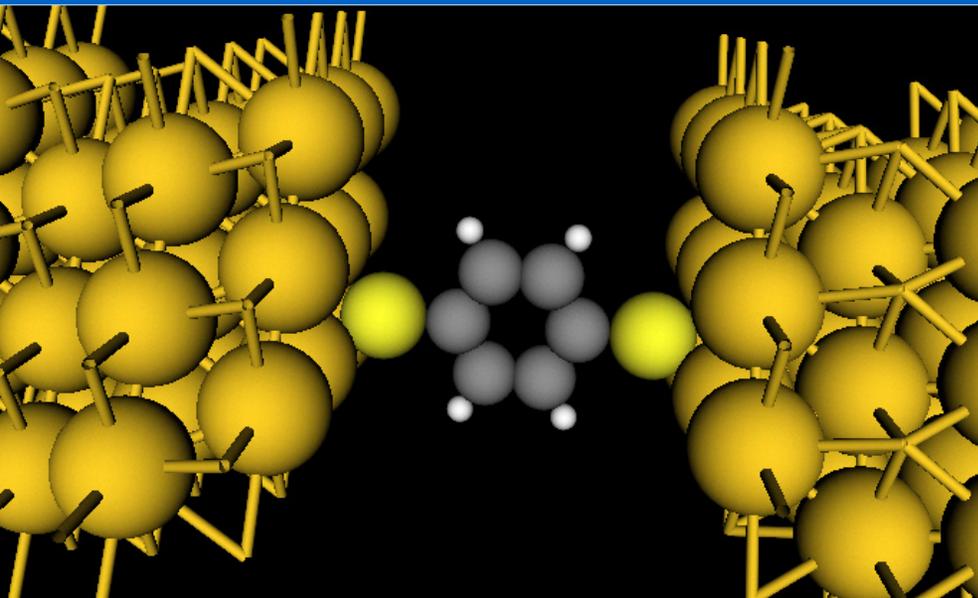
в - с внедренными углеродными стержнями, ориентированными параллельно поверхности кремния

Результаты расчетов

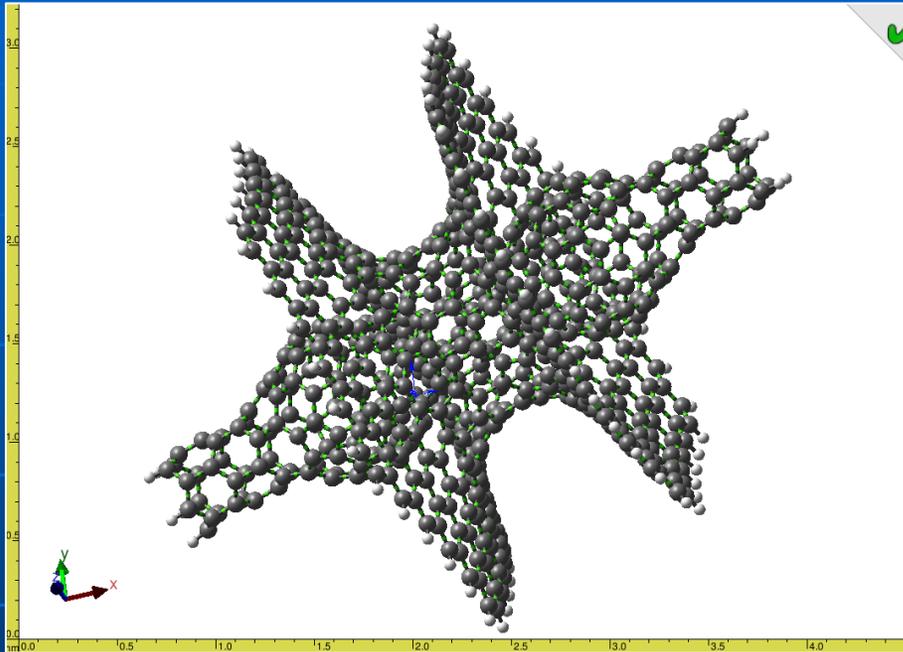


Распределение переданной частицами энергии по плоскостям, перпендикулярным поверхности основного объема (для модели с углеродными стержнями, перпендикулярными поверхности основного объема)

Наноструктуры, построенные с помощью программы Virtual NanoLab



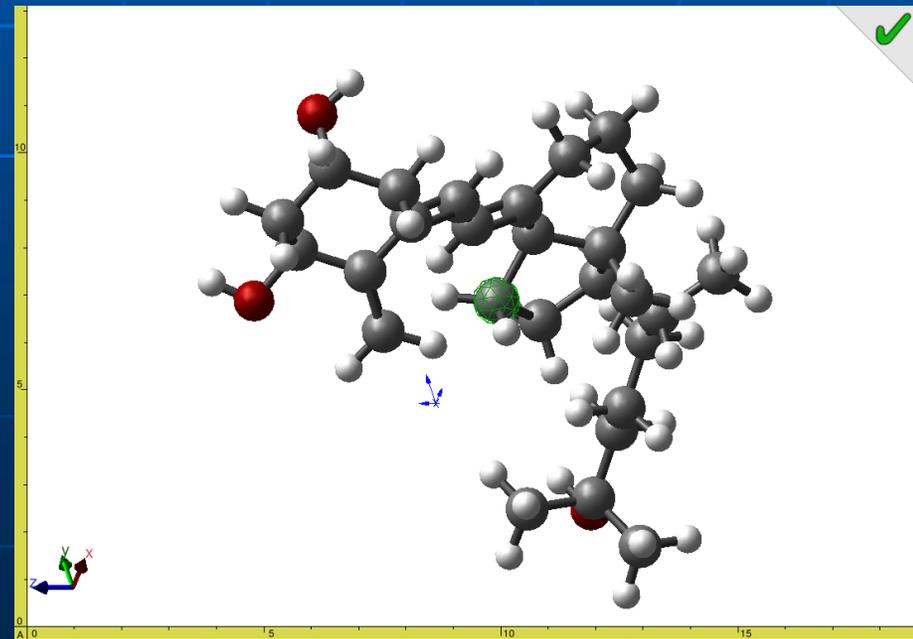
NanoEngineer



элемент

наномеханизма

сложная органическая
молекула



Ближайшие и перспективные задачи изучения воздействия космической среды на наноструктуры

- Определить реальную номенклатуру наноматериалов и наноэлементов для применения в космической технике
- Проанализировать особенности физических механизмов воздействия космической среды на наноматериалы КА
- Исследовать специфику протекания процессов, инициируемых воздействием космической радиации: зависимость от энергии и вида заряженных частиц, энергетических и пространственных распределений потока, плотности потока, флюенса
- Разработать новые физические понятия, термины и определения применительно к «нанодозиметрии»
- Выбрать оптимальные методы математического моделирования воздействия космической среды на наноразмерные структуры
- Определить параметры пучков для проведения лабораторных исследований: вид частиц, энергия, плотность потока и т.д.
- Изучить специфику комплексного воздействия факторов космического пространства, разработать методологию комплексных испытаний
- Создать имитационные стенды и испытательные установки нового поколения

Спасибо
за внимание!