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

Л.С. Новиков

Современные проблемы космического материаловедения

XVI Межвузовская научная школа молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине»

24-25 ноября 2015

КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ:

1. Экспериментальное и теоретическое изучение процессов, протекающих в материалах и элементах оборудования космических аппаратов (КА) под действием факторов космического пространства (ФКП), разработка методов повышения стойкости материалов и бортовых систем КА к воздействию ФКП.

(Начало исследований: 1961 - 1962 гг.)

2. Выращивание бездефектных кристаллов и получение сверхчистых веществ в условиях невесомости.

ПРЕПЯТСТВИЕ - наличие микроускорений на КА:

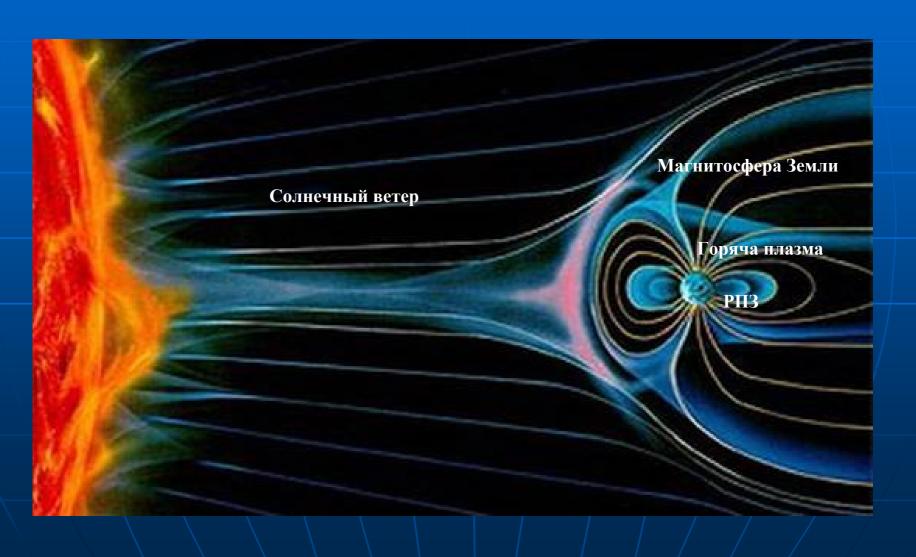
- $\sim 10^{-6} 10^{-5}$ g на автоматических КА;
- $\sim 10^{-3} 10^{-2}$ g на пилотируемых КА.

(Начало исследований: середина 1970-х гг.)

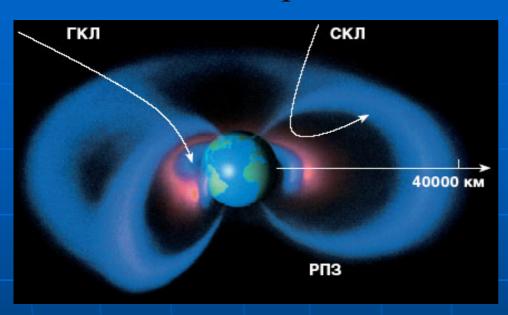
Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты

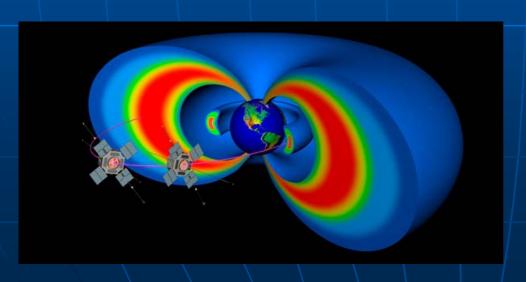


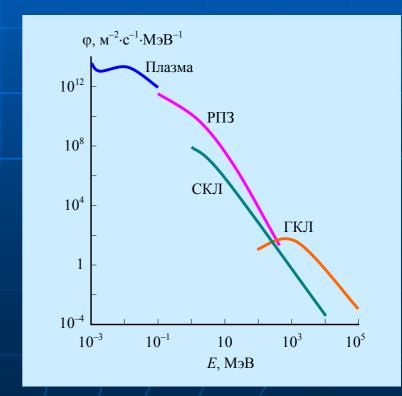
Солнечный ветер и формирование магнитосферы Земли



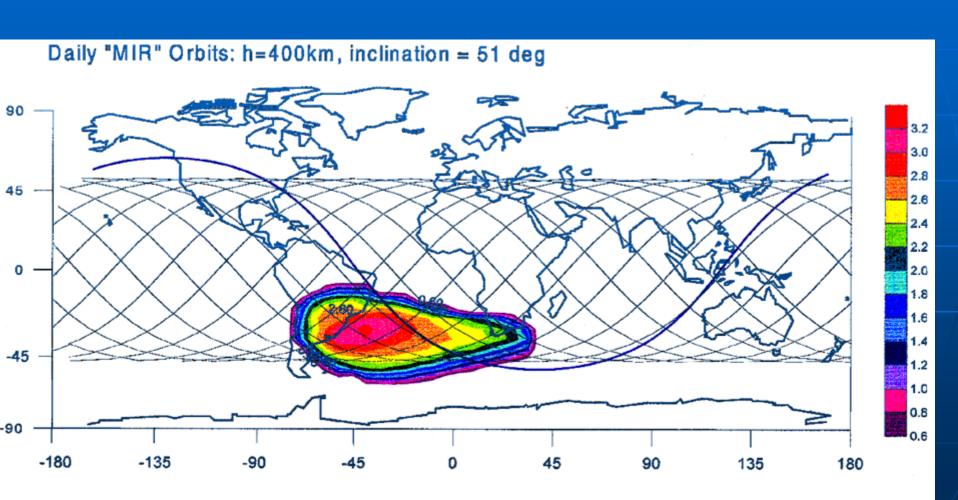
Локализация и обобщенный энергетический спектр потоков космической радиации







Южно-Атлантическая магнитная аномалия



Параметры потоков космической радиации

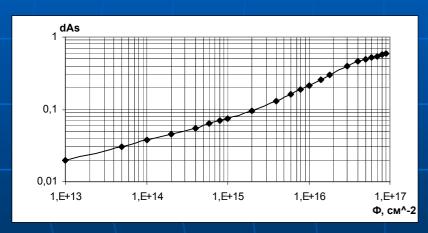
Вид корпускулярного излучения	Состав	Энергия частиц, МэВ	Плотность потока, м ^{-2.} с ⁻¹
Галактические космические лучи	протоны ядра гелия более тяжелые ядра	10 ² —10 ¹⁵ (для всех групп ядер)	1,5·10 ⁴ 1·10 ³ 1,2·10 ¹
Солнечные космические лучи	протоны	1-104	10 ⁷ –10 ⁸
Радиационные пояса Земли	протоны электроны	1–30 >30 0,1–1,0 >1,0	3.10^{11} 2.10^{8} 1.10^{12} 1.10^{10}
Горячая магнитосферная плазма	протоны электроны	10-3-10-1	$10^{11} - 10^{14}$

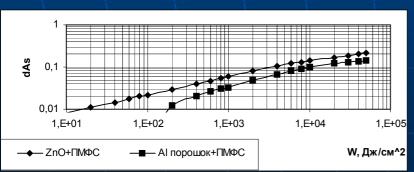
Радиационные воздействия на материалы

- 1.Эффекты полной поглощенной дозы D = dE/dm [Гр = Дж/кг]; 1 Гр = 100 рад (накопление радиационных структурных дефектов, ухудшение механических, электрических, оптических свойств материалов)
- 2. Эффекты мощности дозы dD/dt [Гр/с] (радиационная проводимость, люминесценция)
- 3. Эффекты от отдельных заряженных частиц одиночные сбои в элементах микроэлектроники

Воздействие космической радиации на терморегулирующие покрытия (ТРП) – 1961 г.

Основным параметром ТРП, изменяющимся под действием космической радиации является коэффициент поглощения солнечного излучения a_s . Толщина активной области большинства ТРП менее 100 мкм. Поэтому наибольшее воздействие на свойства ТРП оказывают протоны РПЗ и солнечное УФ-излечение.

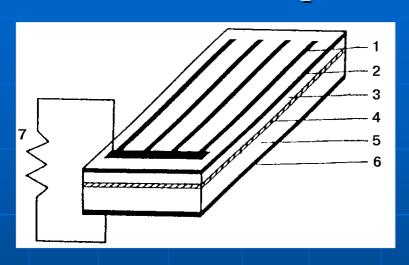




Изменение коэффициента \underline{a}_s покрытия ZnO + K_2SiO_3 в зависимости от флюенса протонов (E_p = 500 кэВ)

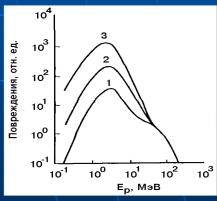
Оптическая деградация покрытия ZnO + полиметилфенилсилоксан (ПМФС) и покрытия Al порошок + ПМФС под действием УФ-излучения

Воздействие радиации на ФЭП СБ – 1964 г.

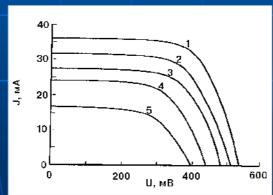


Структура ФЭП:

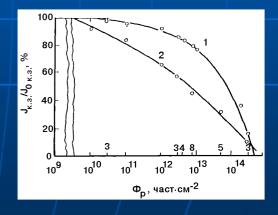
- 1 контакт к легированному слою;
- 2 просветляющее покрытие;
- 3 легированный слой; 4 область n-р перехода; 5 –область базы; 6 –контакт к базовой области; 7 сопротивление нагрузки



Повреждение ФЭП протонами РПЗ при разных толщинах защитного стекла, мм: 1 – 1,40; 2 – 0,70; 3 – 0,35



ВАХ ФЭП до и после облучения протонами с энергией 6,3 МэВ при разных значениях флюенса, м $^{-2}$: 1-0; $2-10^{14}$; $3-10^{15}$; $4-10^{16}$: $5-10^{17}$



Сравнение повреждения протонами с энергией 6,3 МэВ ФЭП из GaAs (1) и Si (2)

Единичные сбои в элементах микроэлектроники — важнейшая проблема радиационных воздействий

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 р-п переходов.

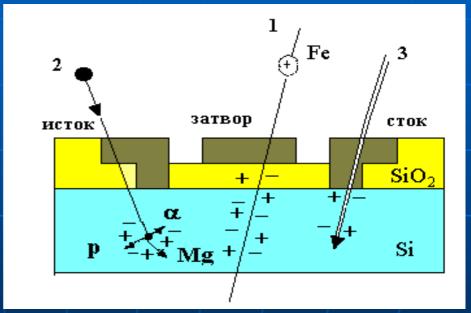
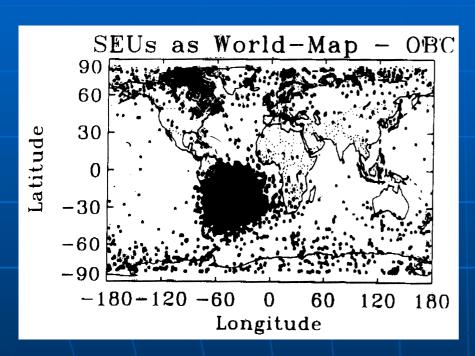
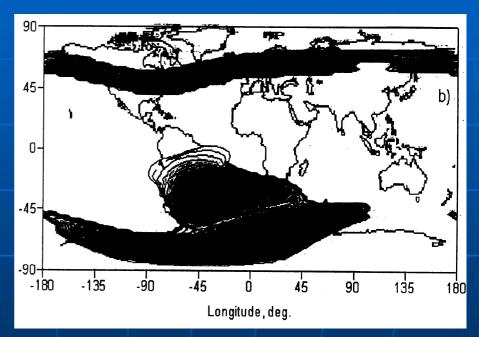


Схема эффектов от ОЯЧ в МОП-транзисторе: 1 – воздействие тяжелого ядра ГКЛ; 2 – ядерная реакция, вызываемая высокоэнергетическим протоном РПЗ; 3 – поток излучения при имитационных испытаниях

Локализация сбоев в работе электронного оборудования низкоорбитального КА



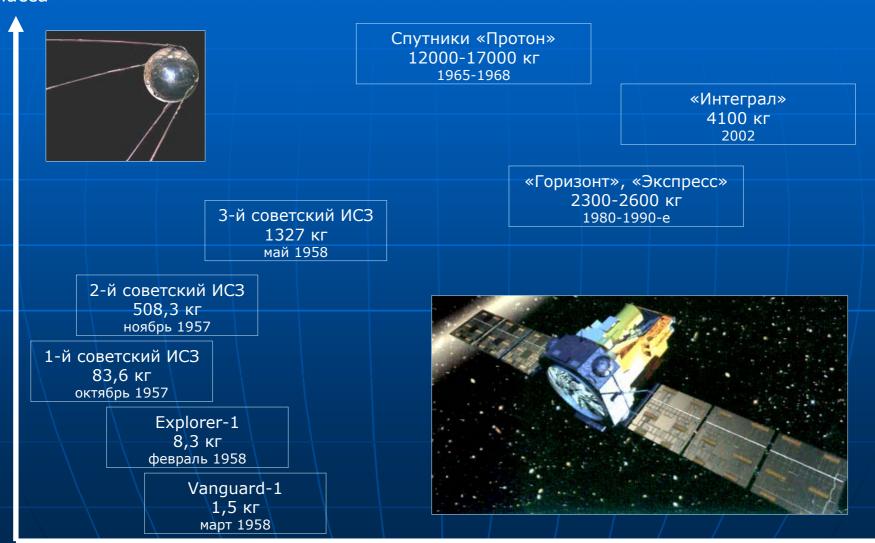
Локализация сбоев в области Южно-Атлантической магнитной аномалии и высокоширотных зонах проникновения частиц РПЗ



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

Динамика роста массы спутников

Macca



Годы

Орбитальные космические станции

Станция «МИР»

Международная космическая станция



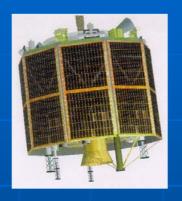


масса 140 т размер ~ 35 м

масса ~ 400 т размер ~ 100 м

Миниатюризация космических аппаратов

Macca



Миниспутники

500-100 кг



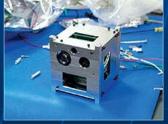
Микроспутники

100-10 кг



Наноспутники

10-1 кг



Пикоспутники

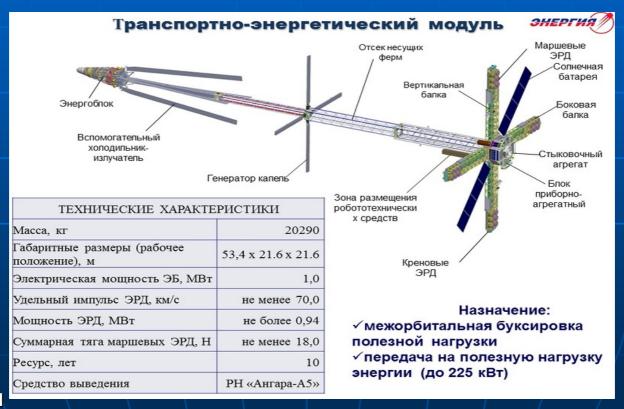
мен<u>ее 1 кг</u>

Возвращение ядерной энергетики в космос

История

в 1970 – 1988 гг. было запущено более 30 ИСЗ серии «Космос» с ЯЭУ мощностью 3 кВт. Большая их часть остается на орбитах захоронения высотой ~ 1000 км.

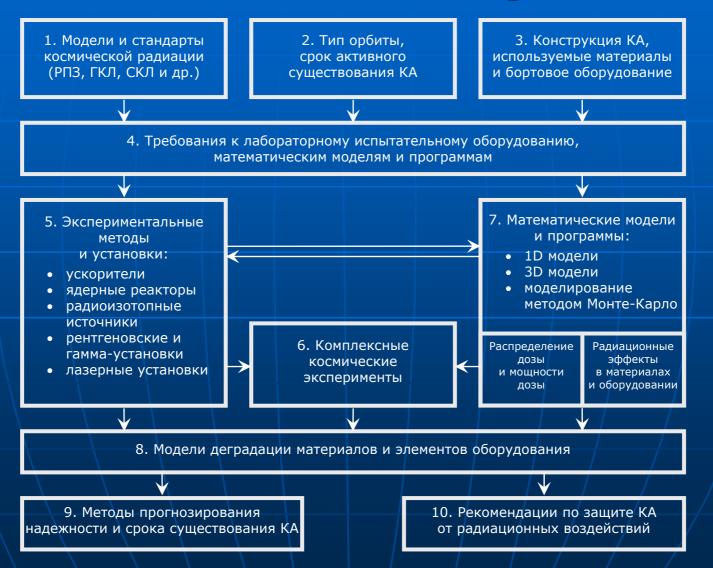
Аварии: «Комос-954», 1978 г., падение над Канадой «Комос-1402», 1983 г., падение в Индийский океан



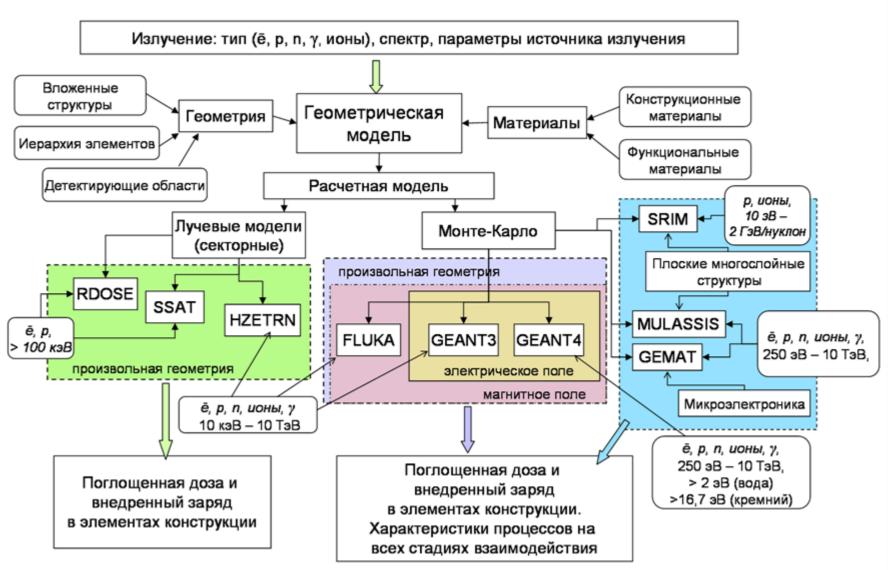
Проблемы

- воздействие нейтронов и γ-излучения на материалы и оборудование КА
- влияние ядерного реактора на окружающую космическую среду
- обеспечение работы жидкостных капельных холодильников

Схема организации исследований воздействия космической радиации



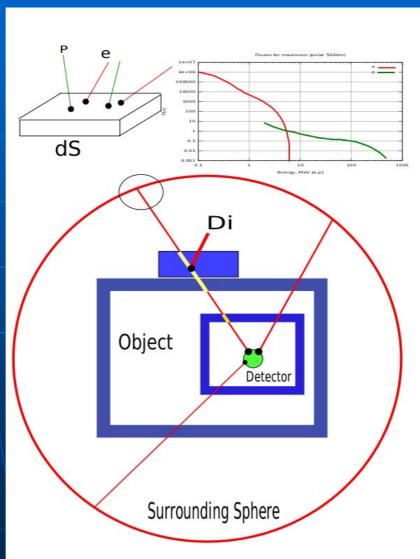
Обобщенная схема математического моделирования воздействия космической радиации на микроструктуры



Лучевая модель RDOSE НИИЯФ МГУ

Элементарная площадка на поверхности условной сферы, окружающей исследуемый объект

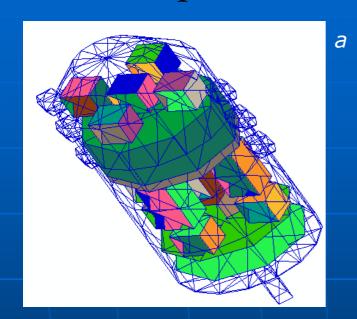
Исследуемый объект, состоящий из нескольких вложенных оболочек, помещен внутрь расчетной сферы

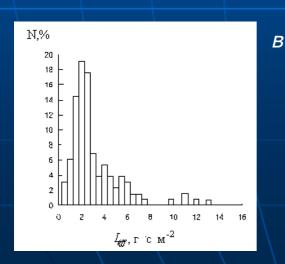


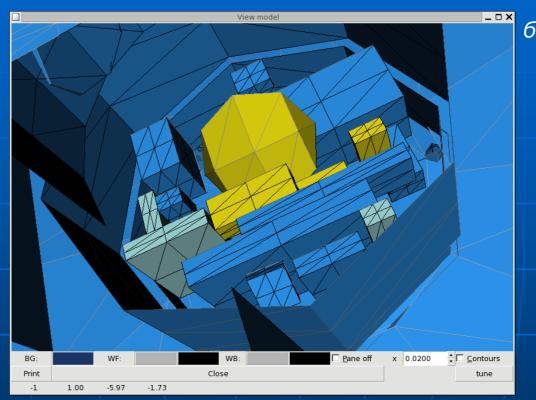
Энергетические спектры частиц космической радиации

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

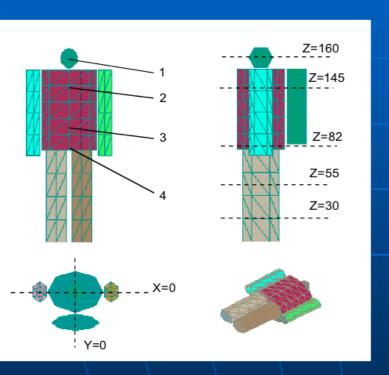


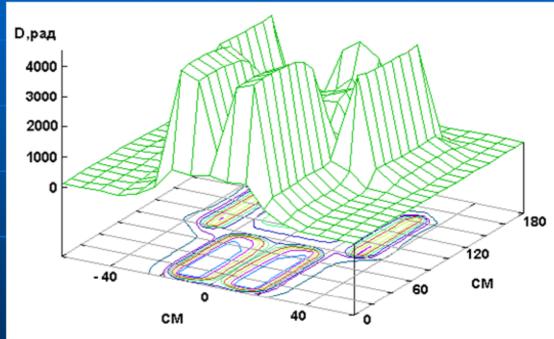




Расчетные модели с внутренними элементами конструкции фрагмента модуля МКС (a), приборного отсека научного КА (b) и распределение толщин эквивалентной защиты по лучам для точки внутри объекта (b): по оси абсцисс отложена толщина защиты ($r \cdot cm^{-2}$), по оси ординат – число лучей

Radiation dose distribution in lateral cross-section





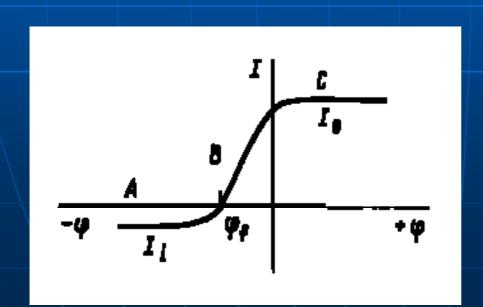
3D Model of astronauts in shielding scafander and radiation dose distribution in lateral cross-section

Накопление электрического заряда в диэлектриках: в объеме - электроны РПЗ (1-10 Мэв)



Проблема электризации космических аппаратов в магнитосферной плазме

«Многие десятки миллионов долларов и тысячи человеко-лет труда пришлось затратить на то, чтобы понять в деталях проблему, общее теоретическое описание которой было дано И. Ленгмюром еще в 1924 году.»



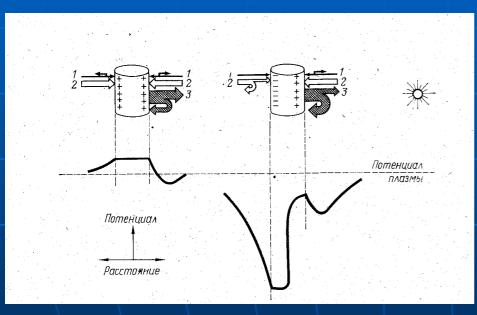
Г.Гарретт 1983 г.

$$I(\varphi) = I_e(\varphi) - I_i(\varphi)$$

$$\varphi_f = \frac{kT_e}{e} \ln(m_i / m_e)^{1/2}$$

Уравнение баланса токов на поверхности КА

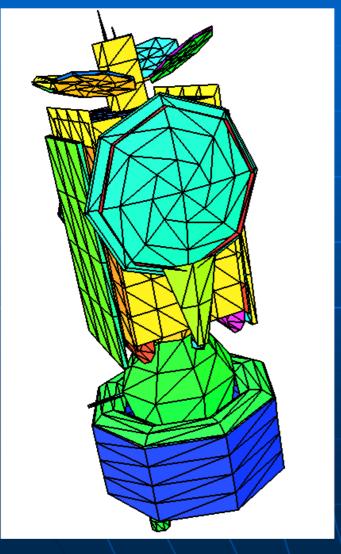
$$J = J_e - J_i - (\delta J_e + \eta J_e + \gamma J_i + J_{ph} + J_{cond})$$

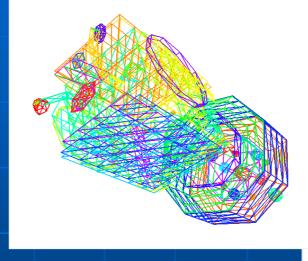


- J_e электронный ток плазмы
- lacksquare J_i ионный ток плазмы
- δ коэффициент истинной вторичной электронной эмиссии
- η коэффициент отражения электронов
- γ коэффициент вторичной ионноэлектронной эмиссии
- J_{cond} ток проводимости

Математическое моделирование электризации КА

 решение уравнения баланса токов для совокупности элементов (2000-5000) непроводящей поверхности

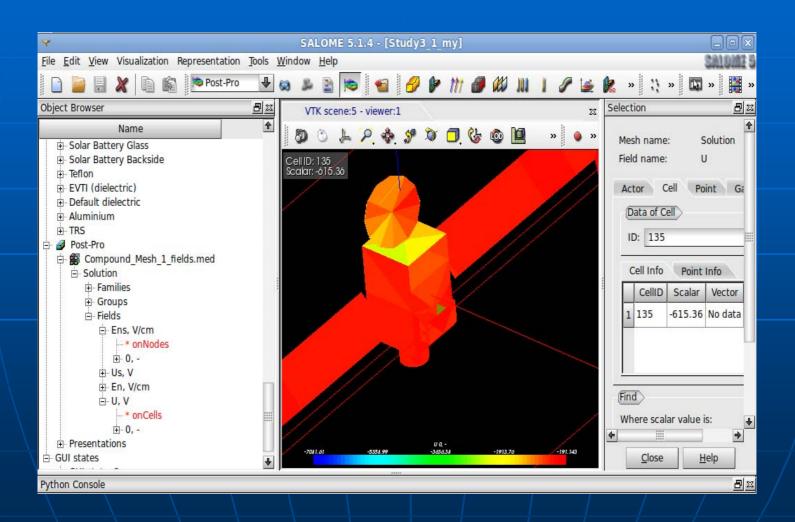






- Базовый набор элементов плоскость, цилиндр, сфера, конус...(~100)
- Параметрические координаты x = x(t, v), y = y(t, v), z = z(t, v)
- Поверхностная сетка
- Тип материала и свойства
- Трехмерное представление (GL,VRML)

Физико-математическая модель электризации КА COULOMB (НИИЯФ)

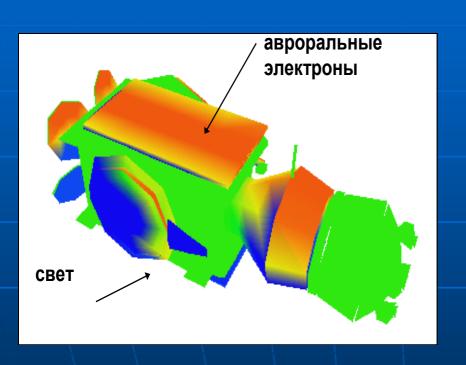


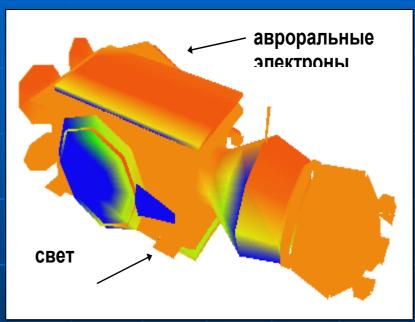
Spacecraft charging mathematical models included in ISO standards

- NASCAP-2K NASA, USA
- MUSCAT JAXA, Japan
- SPIS ESA, EU
- COULOMB-2 SINP MSU, Russia

Comparison of the reference models is actual

Пример расчета потенциала на поверхности низкоорбитального КА

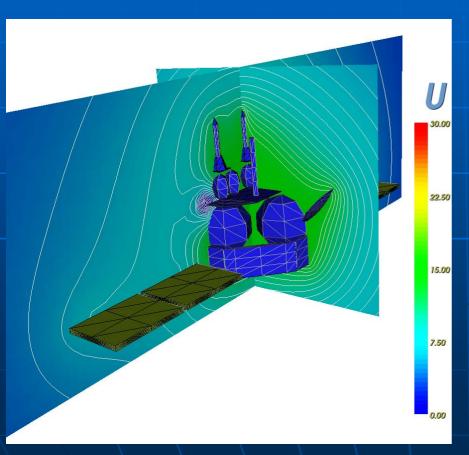


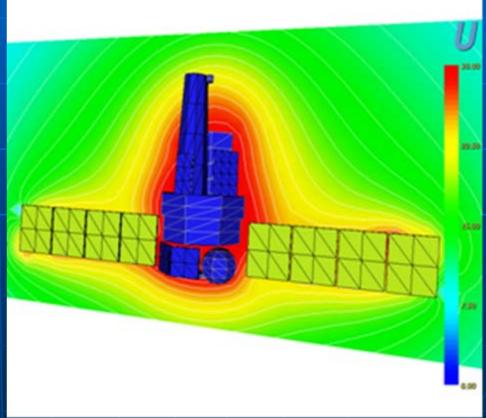


Распределения потенциала на поверхности КА при одновременном воздействии ионосферной плазмы, потока авроральных электронной и солнечного света при различных условиях.

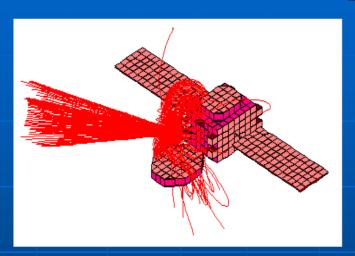
Величина потенциала показана цветовым кодом

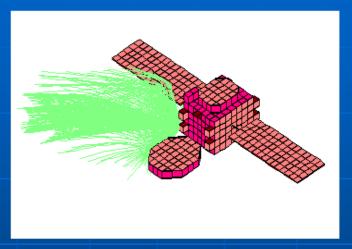
Распределение потенциала на поверхности и в окрестности высокоорбитального КА



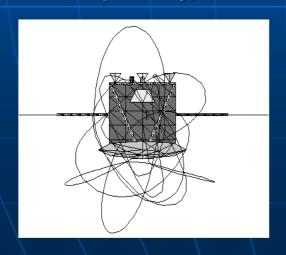


Траектории электронов и ионов в поле заряженного KA





Траектории положительных ионов (справа) и электронов (слева), выходящих из области сопла ЭРД



Траектории захваченных ионов в окрестности КА

Проблемы воздействия атомарного кислорода на материалы внешней поверхности КА

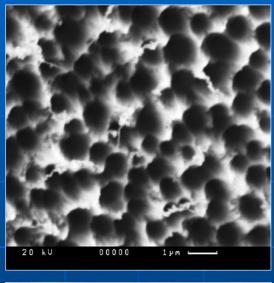




Струя плазмы, выходящая из ускорителя, фокусируется на поверхность исследуемого образца. Свечение струи зависит от состава и степени ионизации плазмы

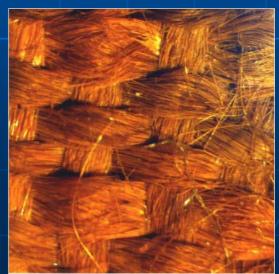
Исследуемый образец крепится на специальном держателе, обеспечивающем возможность его вращения в разных плоскостях и термостатирование

Структура материалов до и после воздействия атомарного кислорода





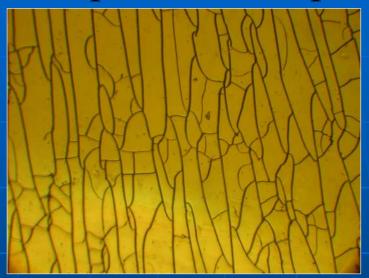




Характер повреждений тонкопленочного покрытия под действием атомарного кислорода

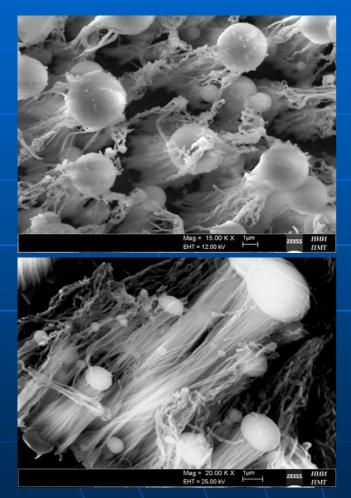
The oxygen plasma processing causes the substrate film etching under defect of protection and microcracks formation in silica layer. 200 micron field of vision



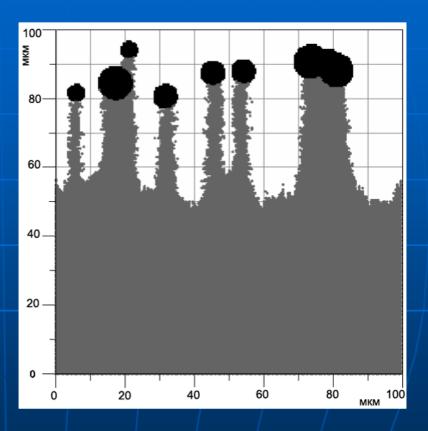




Структура поверхности полиимерного композита с микроразмерными частицами наполнителя после воздействия атомарного кислорода

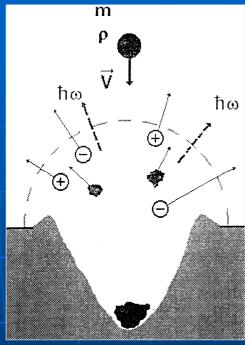


Эксперимент



Моделирование методом Монте-Карло

Исследование воздейстия метеорных частиц и частиц космического мусора на материалы



Формирование кратера, выброс плазмы и электромагнитное излучение из зоны удара

Глубина кратера – H Диаметр частицы – d Плотность материала частицы - $r_{\rm q}$

$$\frac{H}{d} = k \rho_q^{\alpha} v^{\beta}$$

$$k = 0,3-0,6;$$

$$\alpha = 1/3 - 1/2;$$

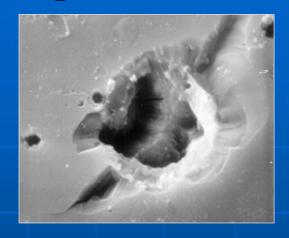
$$\beta \cong 2/3.$$



Кратер в металлическом образце от удара космической частицы

Кратеры в хрупких материалах





Удары частиц Ті (d \sim 0,5-1,5 мкм; v \sim 4-6 км/с) по пластинам Ge



Кратер в стекле от удара частицы Al c v~8 км/с

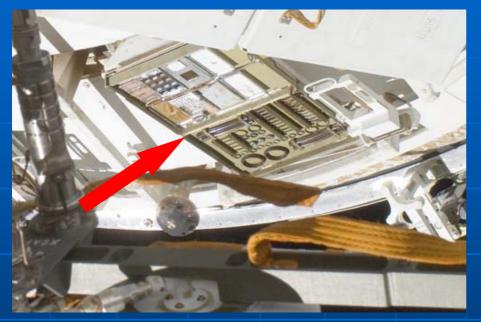
$$D_p = 0.1 d
ho_q^{-2/3}
ho_M^{-1/2} v^{2/3}$$
 $D_c = (2-5) D_p, \; d$ – диаметр частицы,

Глубина кратера

$$H = 0.6 d \left(\frac{\rho_{\scriptscriptstyle H}}{\rho_{\scriptscriptstyle M}}\right)^{1/2} v^{2/3}$$

Эксперимент КОМПЛАСТ – 12 лет на орбите







Komplast Panel #2 on FGB surface.

Komplast Panel #10 on FGB surface.

The panels were opened in the Ar chamber at SINP, Moscow State University in July 12, 2011

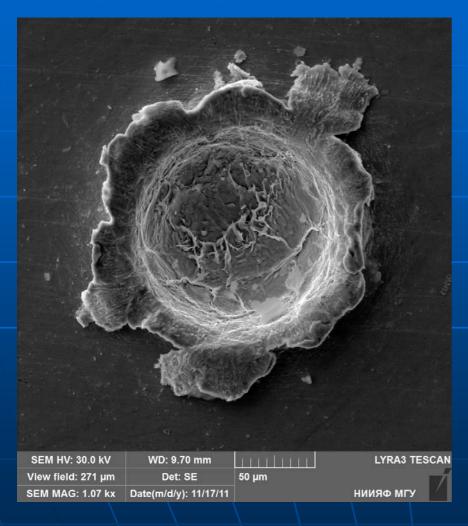


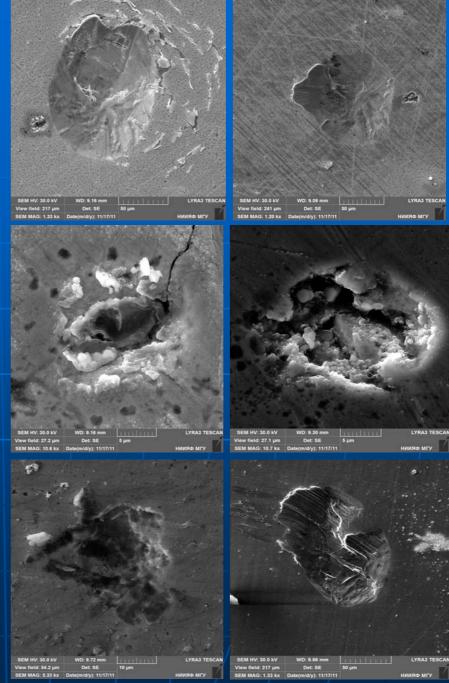


The view of the Panel #2 and panel #10 through the window.

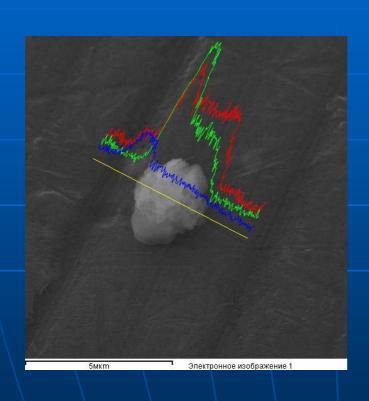
After the initial examination, the material samples have been subjected to detailed research.

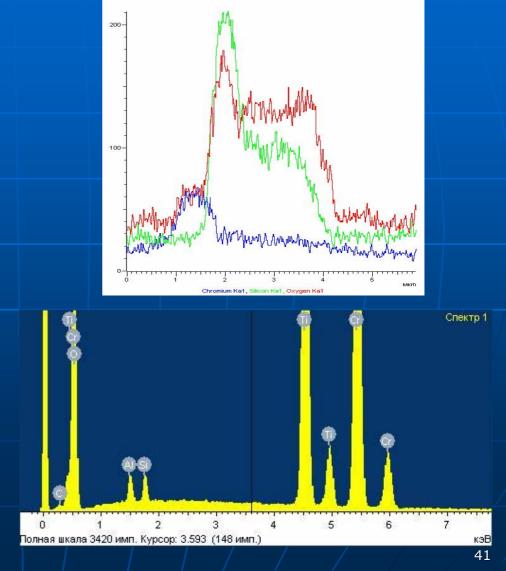
Cuprum surface



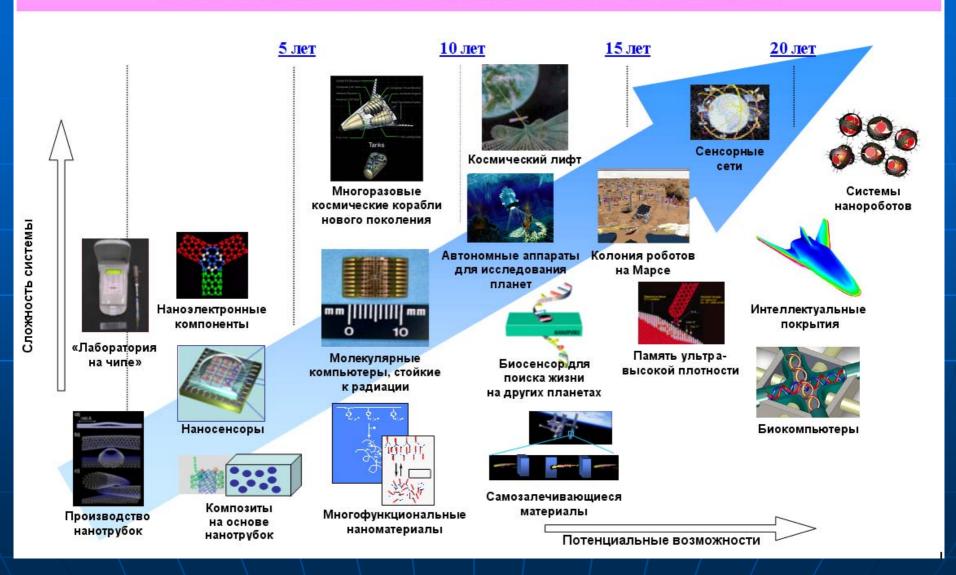


X-ray spectrum of the particle on aluminum surface



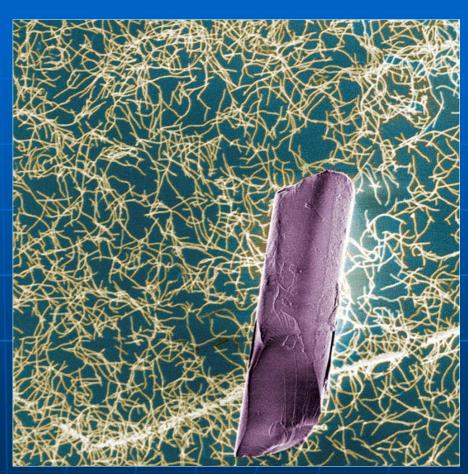


ПРОГНОЗ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКИХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

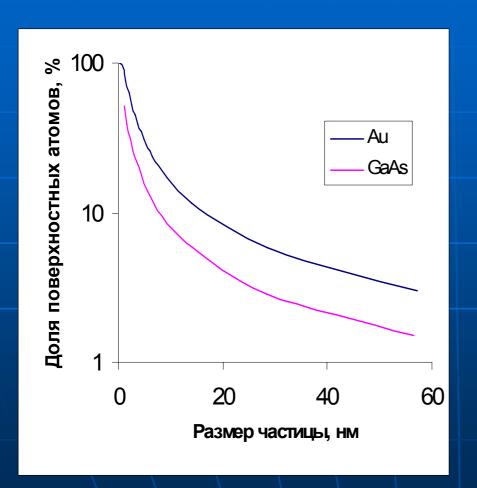


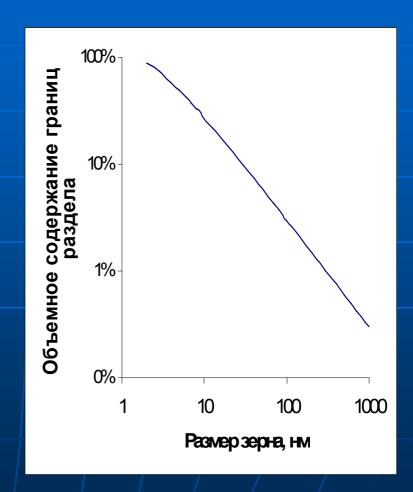
 Наноструктурные элементы (нанобъекты) – материальные объекты различной конфигурации: частицы (зерна), волокна, трубки, пленки и др., хотя бы один линейный размер которых лежит в диапазоне 1 – 100 нм, т.е. 10-9 – 10⁻⁷ M.



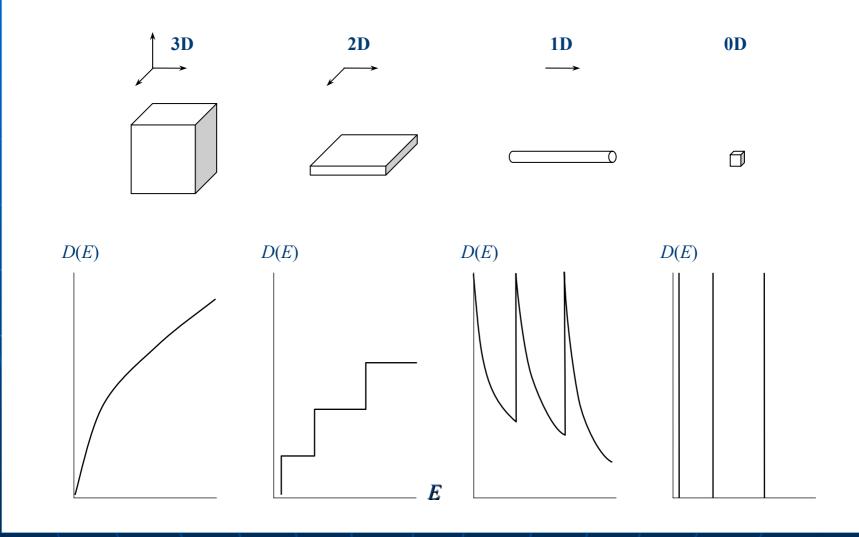


Роль размера частиц

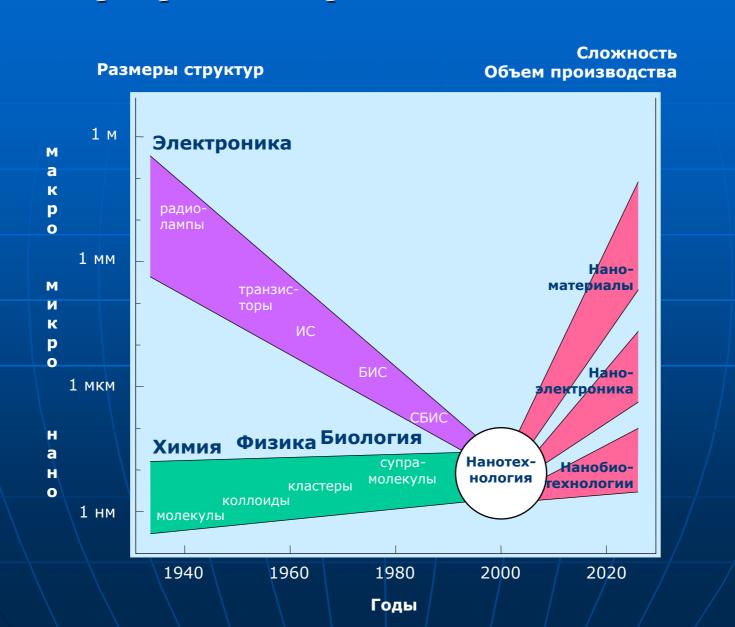




Роль квантовомеханических эффектов



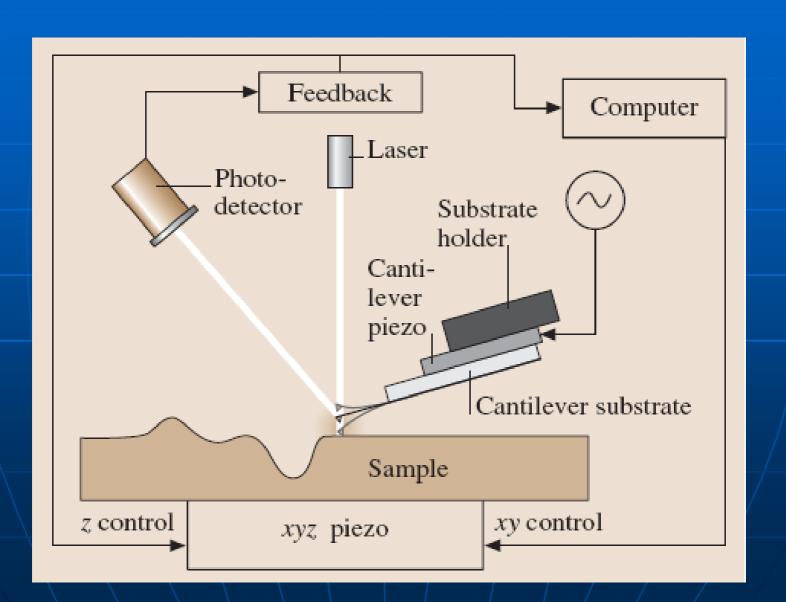
Формирование и развитие нанотехнологий



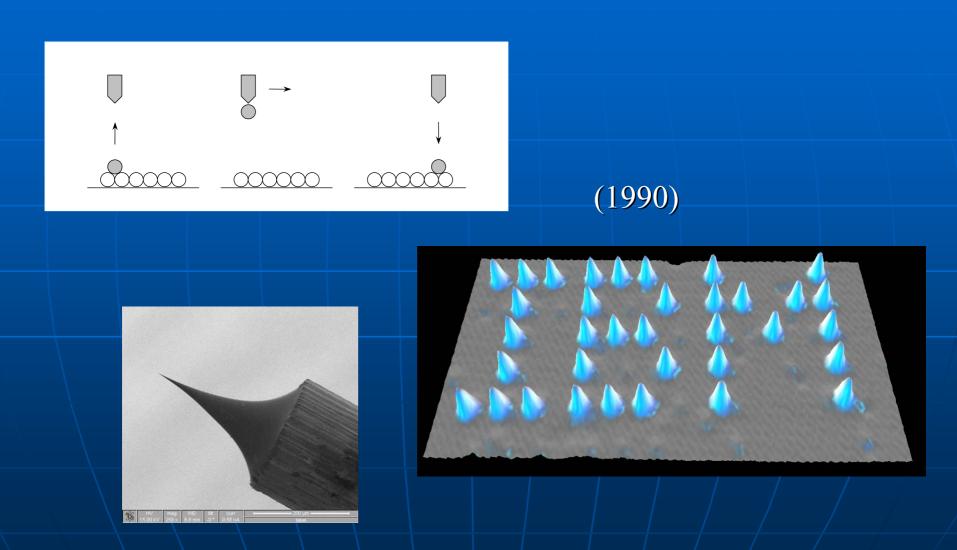
Важные даты в формировании нанотехнологии

- 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

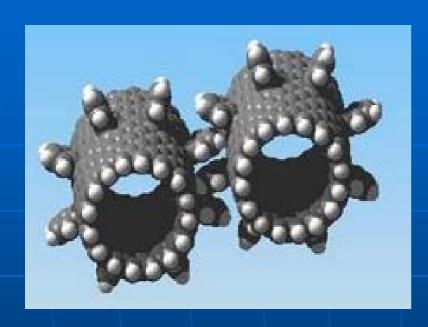
Схема атомно-силового микроскопа (1986)

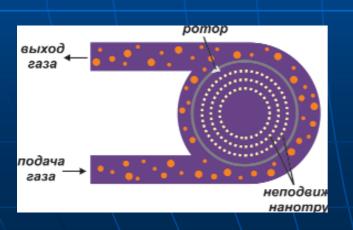


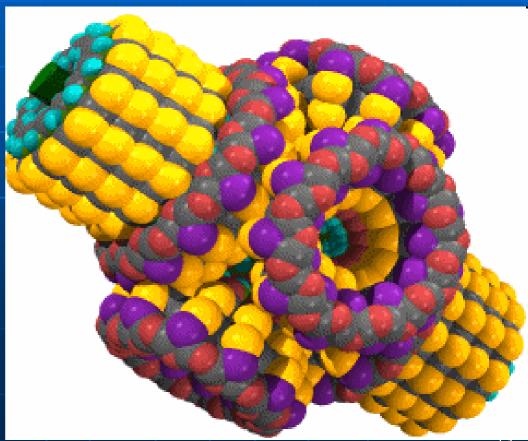
Перемещение атомов с помощью зонда



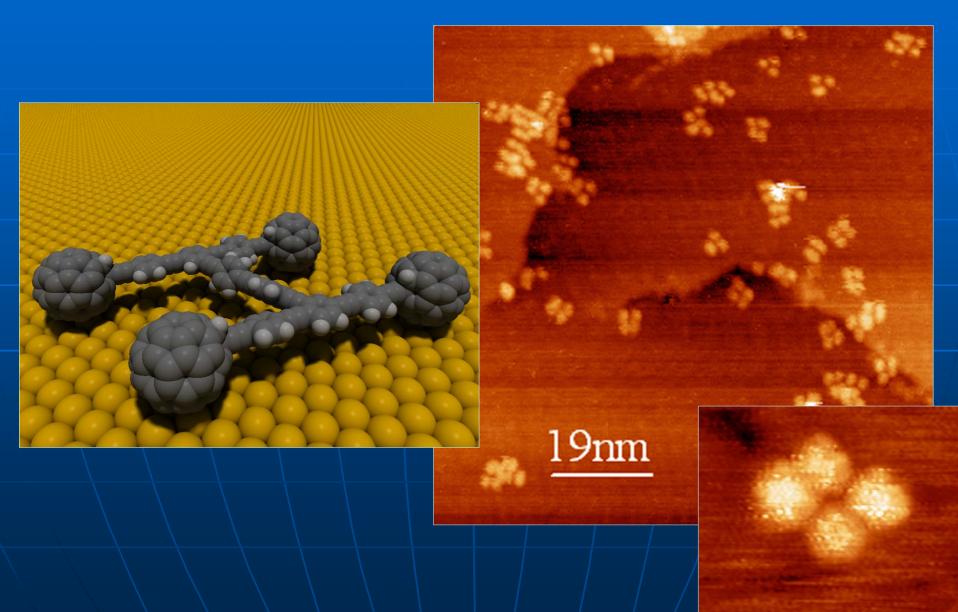
Элементы НЭМС



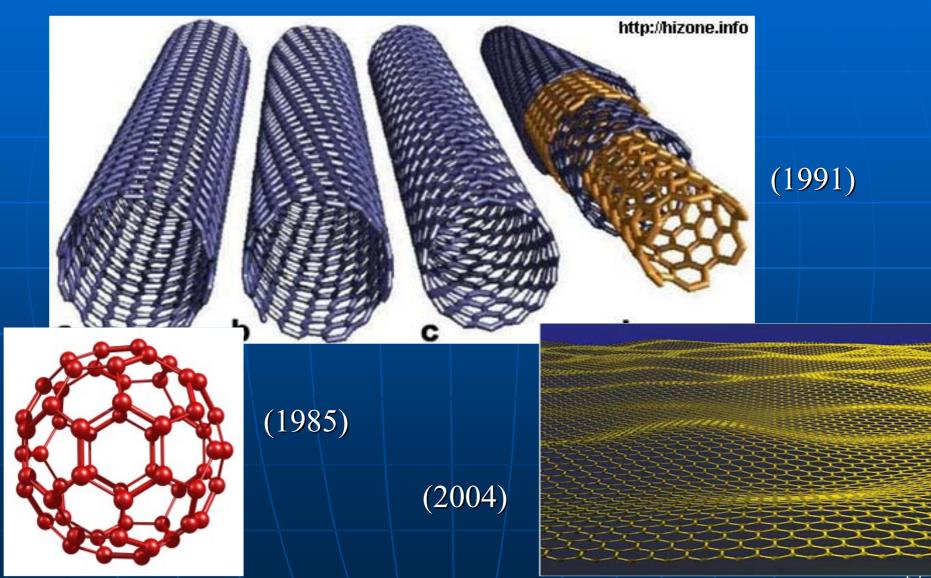




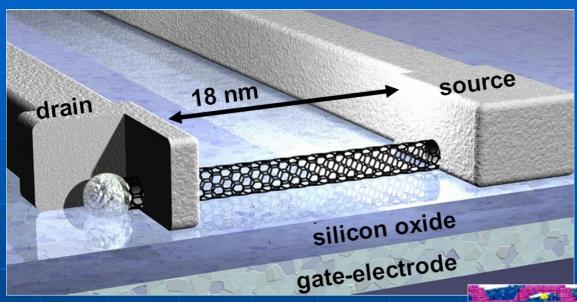
Наноавтомобиль

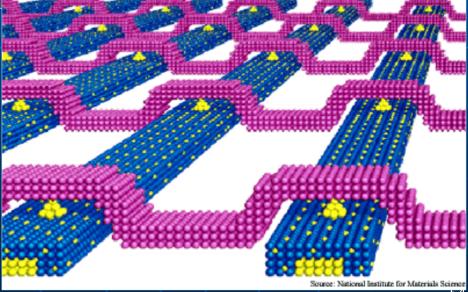


Углеродные наноструктуры



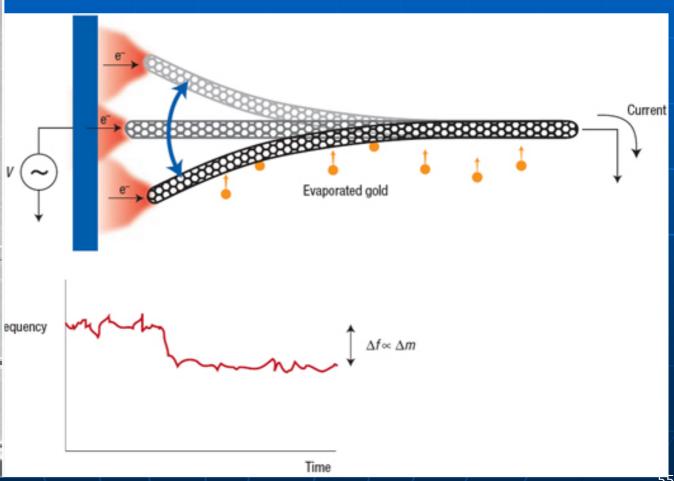
Элементы наноэлектроники



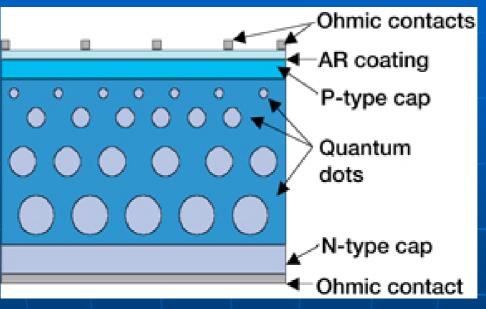


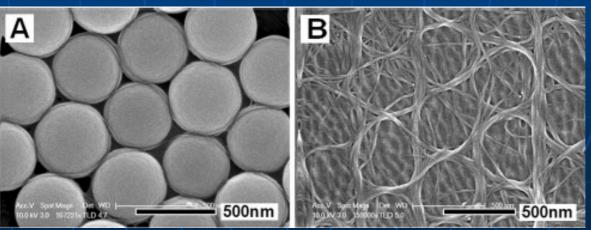
a 0.5 µm

Наносенсоры

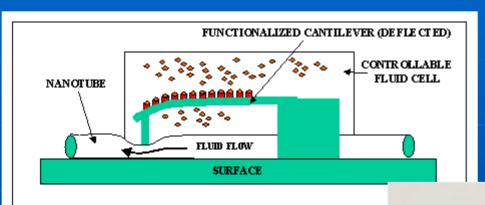


ФЭП на квантовых точках и проводящая сетка из УНТ





«Лаборатория-на-чипе»



"IN-LINE" VAL VE DESIGN



Перспективный транспортный космический корабль



Космический лифт



Крупнейшие космические проекты XXI века

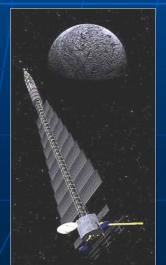
 Строительство обитаемых баз на Луне



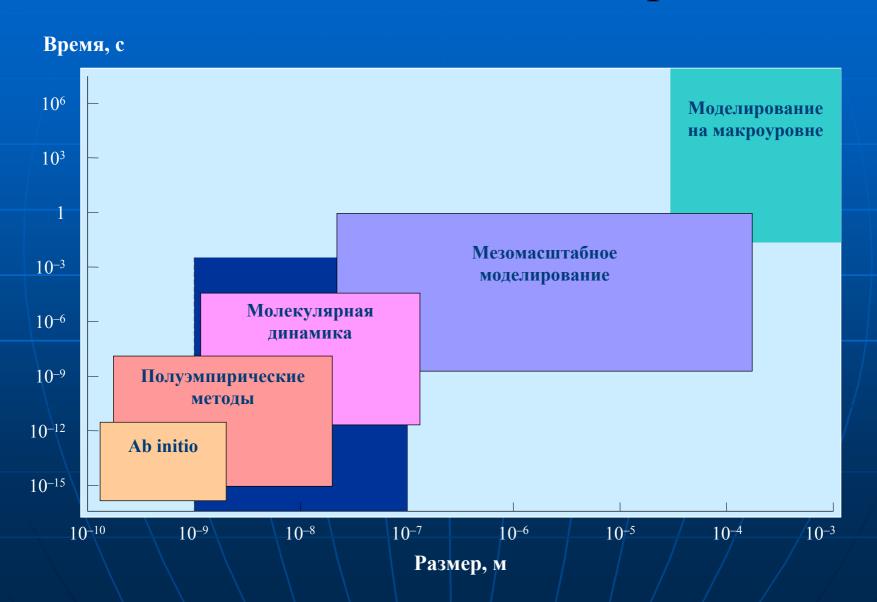
Пилотируемый полет на Марс



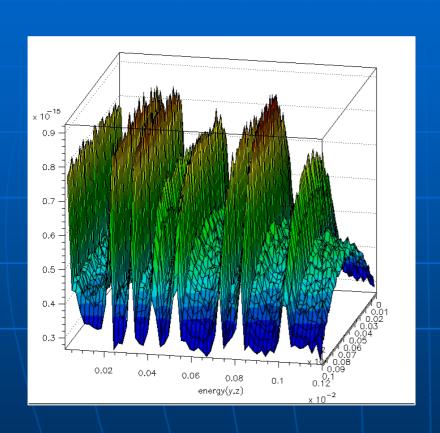
 Полет автоматических космических аппаратов к Юпитеру с посадкой на его спутники: Калисто, Ганимед и Европа

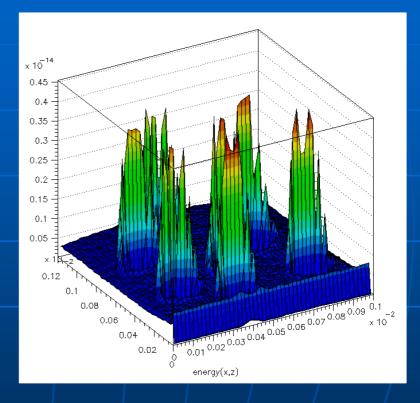


Многомасштабное моделирование



Результаты расчетов

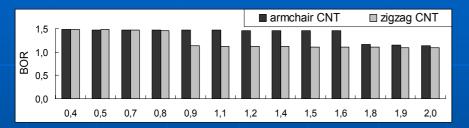


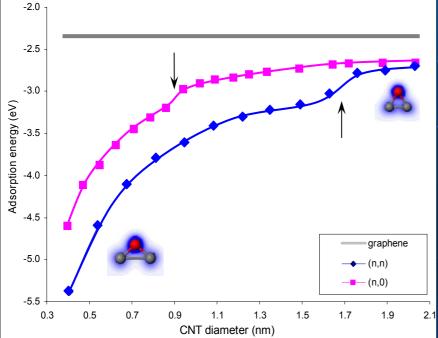


 Распределение переданной частицами энергии по плоскостям, перпендикулярным поверхности основного объема (для модели с углеродными стержнями, перпендикулярными поверхности

O atom adsorption on CNT surface

The structural damage of CNTs due to O atom adsorption weakens with increasing CNT diameter





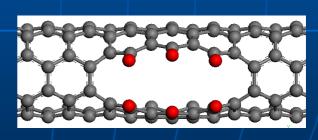
0.3 0.5 0.7 0.9 1.1 1.3 1.5 1.7 1.9 2.1

CNT diameter (nm)

Bond opening ratio vs. CNT diameter (top) and adsorption energy vs. diameter or armchair and zigzag CNTs (bottom)





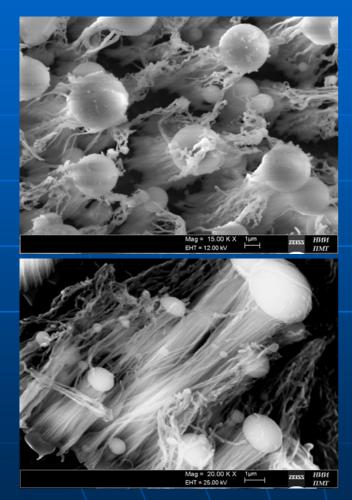


CNT unzipping process

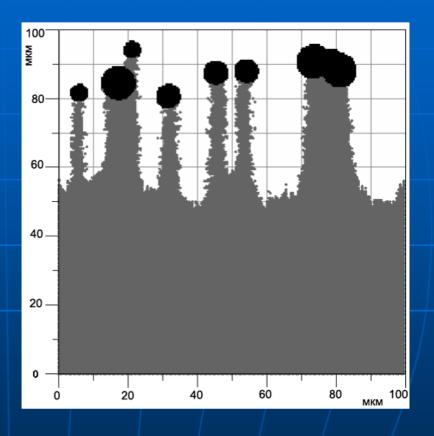
Kosynkin D.V., Higginbotham A.L., Sinitskii A., et al. Nature. 2009, 458, 872 Rangel N.L., Sotelo J.C., Seminario J.M. Journal of Chemical Physics. 2009. 131. 031105

Voronina E.N., Novikov L.S. RSC Adv., 2013, 3 (35), 15362

Структура поверхности полиимерного композита с микро и наноразмерными частицами наполнителя после воздействия атомарного кислорода



Эксперимент



Моделирование методом Монте-Карло

Спасибо за внимание!