



Компоновка и расчет массово-инерционных характеристик

А. В. Попов

Москва, 2015



План лекции

1. Основы проектирования космической техники
2. Классификация космических аппаратов (КА)
3. Основные конструктивно-компоновочные схемы
4. Состав систем КА
5. Процесс компоновки КА
6. Особенности размещения элементов систем КА
7. Системы координат КА
8. Расчёт и измерение массово-инерционных характеристик
9. Способы обеспечения заданных по ТЗ массово-инерционных характеристик



Основы проектирования космической техники

- Особенности условий функционирования:
 - Сложность или невозможность обслуживания
 - Почти полное отсутствие атмосферы
 - Высокая интенсивность всего спектра ЭМИ
 - Невесомость
 - Работа в космической плазме
- Особенности способа доставки
- Сложность и высокая стоимость доставки грузов в космос
- Запуски единичны, космические аппараты - уникальны
- Для попутных запусков время подготовки ограничено



Классификация КА



Классификация КА

По конструкции

Надувные

Развёртываемые

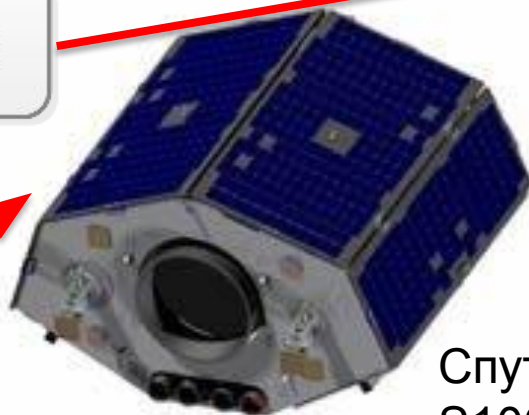
Компактные



Спутник «Маяк»



Спутник DEIMOS-2



Спутник SSSL
S100




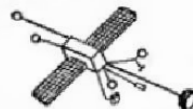








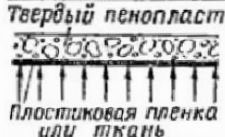



Классификация КА

По конструкции

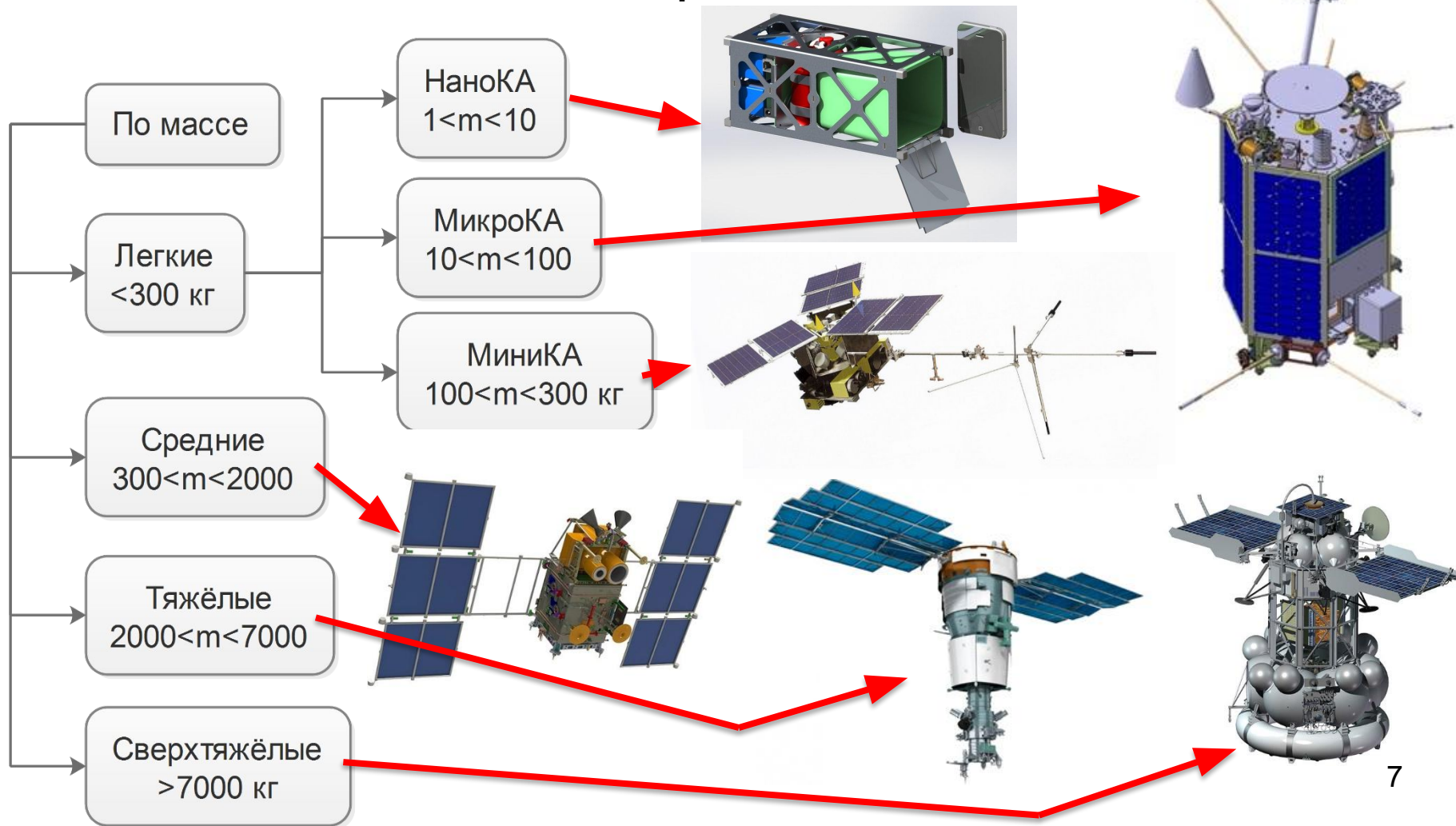
Надувные

Развёртываемые

Компактные

	Тип конструкции	Применение
Развёртываемые	Конструкция переменной геометрии из жестких элементов	 <p>Шарнир Телескопическое соединение</p> 
	Конструкция переменной геометрии с упругим восстановлением	 <p>Пружинящая сетка Пенопласт</p>  <p>Корпус ИСЗ Шлюз для перехода</p>
Надувные	Баллон с мягкой оболочкой	<p>Пластиковая пленка</p>   <p>Гибкое крыло</p>
	Воздушный мат	 <p>Ткань и наполнитель Поперечные растяжки</p>  <p>Элементы корпуса возвращаемого КА</p>
	Многослойная мембранная конструкция	<p>Растяжимая Пластика или тканевая отвердитель / пленка</p>   <p>Корпус ИСЗ („Зхо-2“)</p>
	Конструкция со вспениваемой оболочкой	<p>Твердый пенопласт</p>  <p>Пластиковая пленка или ткань</p>  <p>Концентратор солнечной энергии</p>
	Развёртываемая содовая конструкция	<p>Химический отвердитель</p>  <p>Ткань</p>  <p>Корпус развёртываемой космической станции</p>

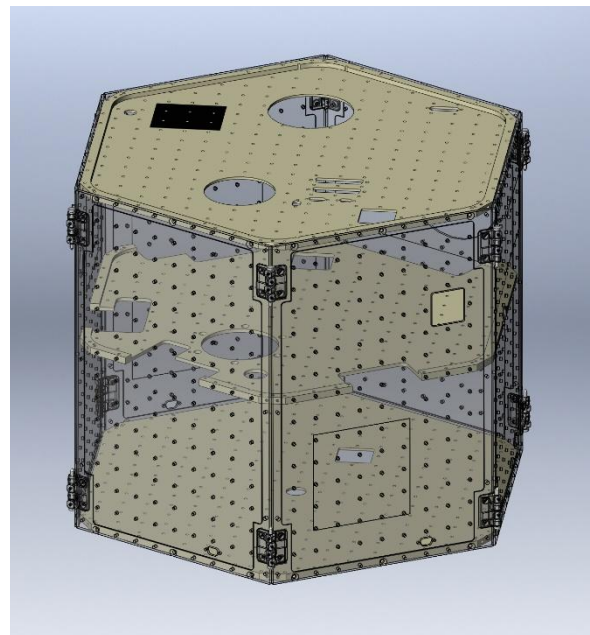
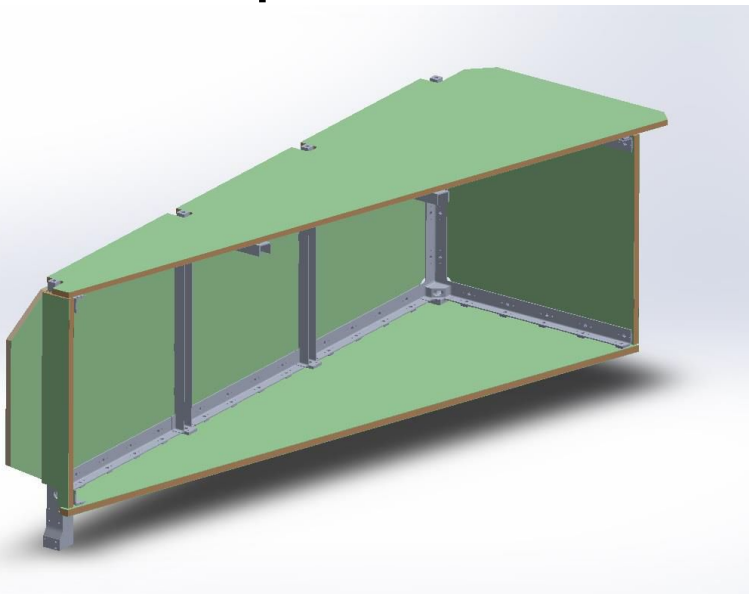
Классификация КА



Основные конструктивно-компоновочные схемы

КА

- Каркасная схема

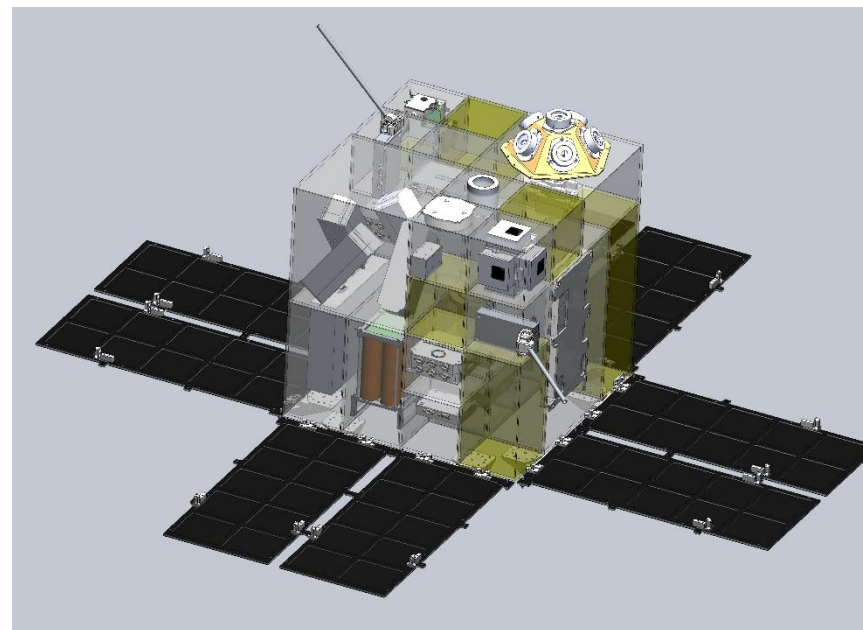


- Бескаркасная схема
- «Несущий корпус»

Основные конструктивно-компоновочные схемы

КА

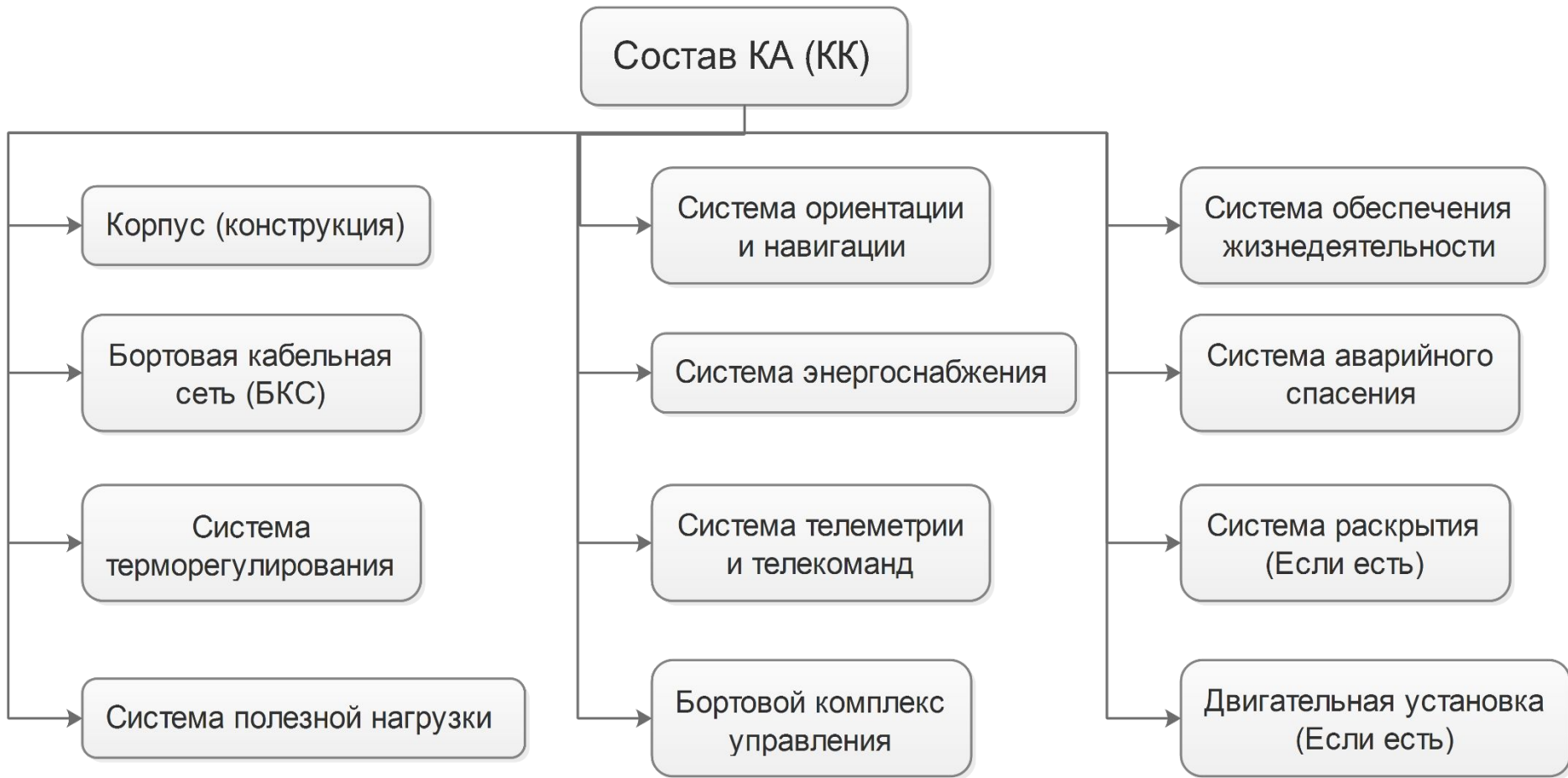
- Бескаркасная схема
 - «Несущая полезная нагрузка»



- Бескорпусная
блочно-модульная
схема



Состав систем КА





Процесс компоновки КА

Особенности:

1. Итерационный процесс, часто приходится радикально менять компоновку из-за проблем с размещением, новой информацией от разработчиков и расчётчиков
2. Необходимо знать особенности размещения приборов и систем, в первую очередь полезной нагрузки
3. Рекомендуется начинать с полезной нагрузки и её подсистем учитывая требования ТЗ и условия работы на первом этапе конструирования
4. Далее рекомендуется размещать наиболее тяжёлые и крупногабаритные элементы для обеспечения симметричности распределения масс на начальном этапе проектирования, а также элементы, требующие определённого размещения в силу функциональных особенностей (антенны, оптические датчики)
5. Размещение солнечных батарей, продумывание их размещения и необходимости их раскрытия (в пользу более надёжного «компактного» типа конструкции)



Системное проектирование - формирование облика космического аппарата

Контракт № _____ Протокол №1
от _____ 2014 г.
Лист № ____

СОГЛАСОВАНО
Проектант: ИСЭ ИИ-301495

УТВЕРЖДЕНО
№ _____ 2014 г.
Генеральный директор ООО
«Супер-Микро»
А.В. Писков

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
НА СОСТАВНОУЮ ЧАСТЬ ПАУЧЕКОСЛАБОВАТВАДСКОЙ РАБОТЫ

«Обеспечение выполнения в проекте космической аппаратуры работы и выполнения ее функций на длительный период работы в условиях вакуума до 2030 года и в условиях физико-химической агрессивности космической среды и в соответствии со спецификацией привнесенной космической аппаратуры и в условиях выполнения ее функций в соответствии с требованиями космической аппаратуры»

Цифр СИИП - «Микро»

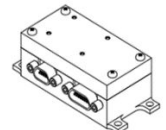
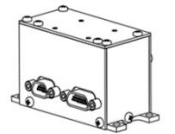
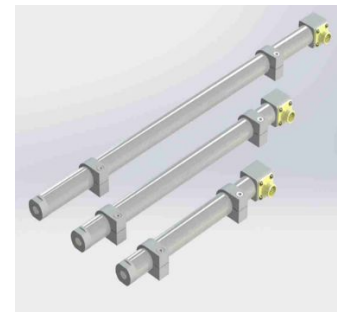
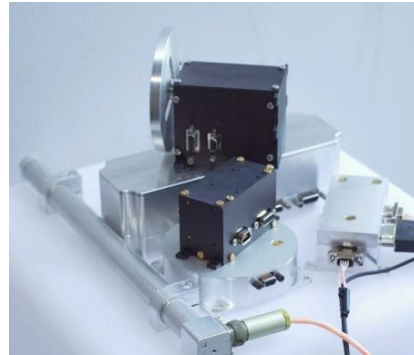
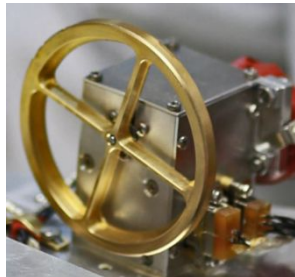
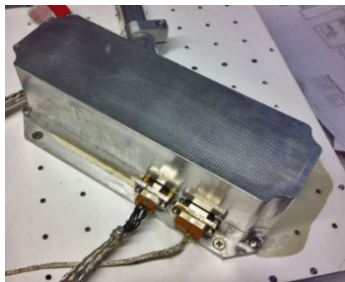
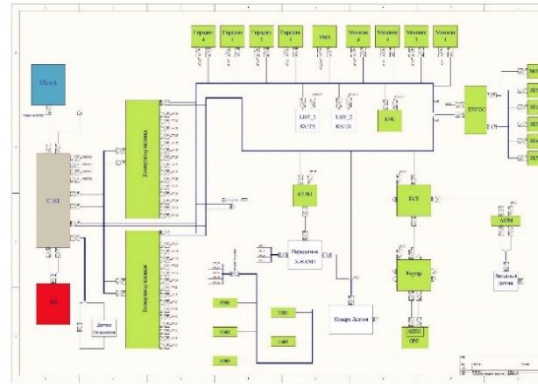
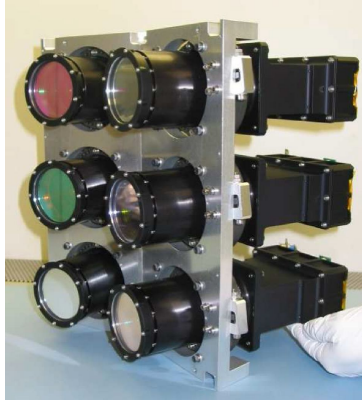
«Работа выполнена в соответствии с требованиями космической аппаратуры и в соответствии с требованиями проекта работы и выполнения ее функций на длительный период работы в условиях вакуума до 2030 года и в условиях физико-химической агрессивности космической среды и в соответствии со спецификацией привнесенной космической аппаратуры»

Цифр СИИП - «Микро» (Страница 2)

«Все входы и выходы (разъемы) и соединения выполнены в соответствии с требованиями проекта работы и выполнения ее функций на длительный период работы в условиях вакуума до 2030 года и в условиях физико-химической агрессивности космической среды и в соответствии со спецификацией привнесенной космической аппаратуры»

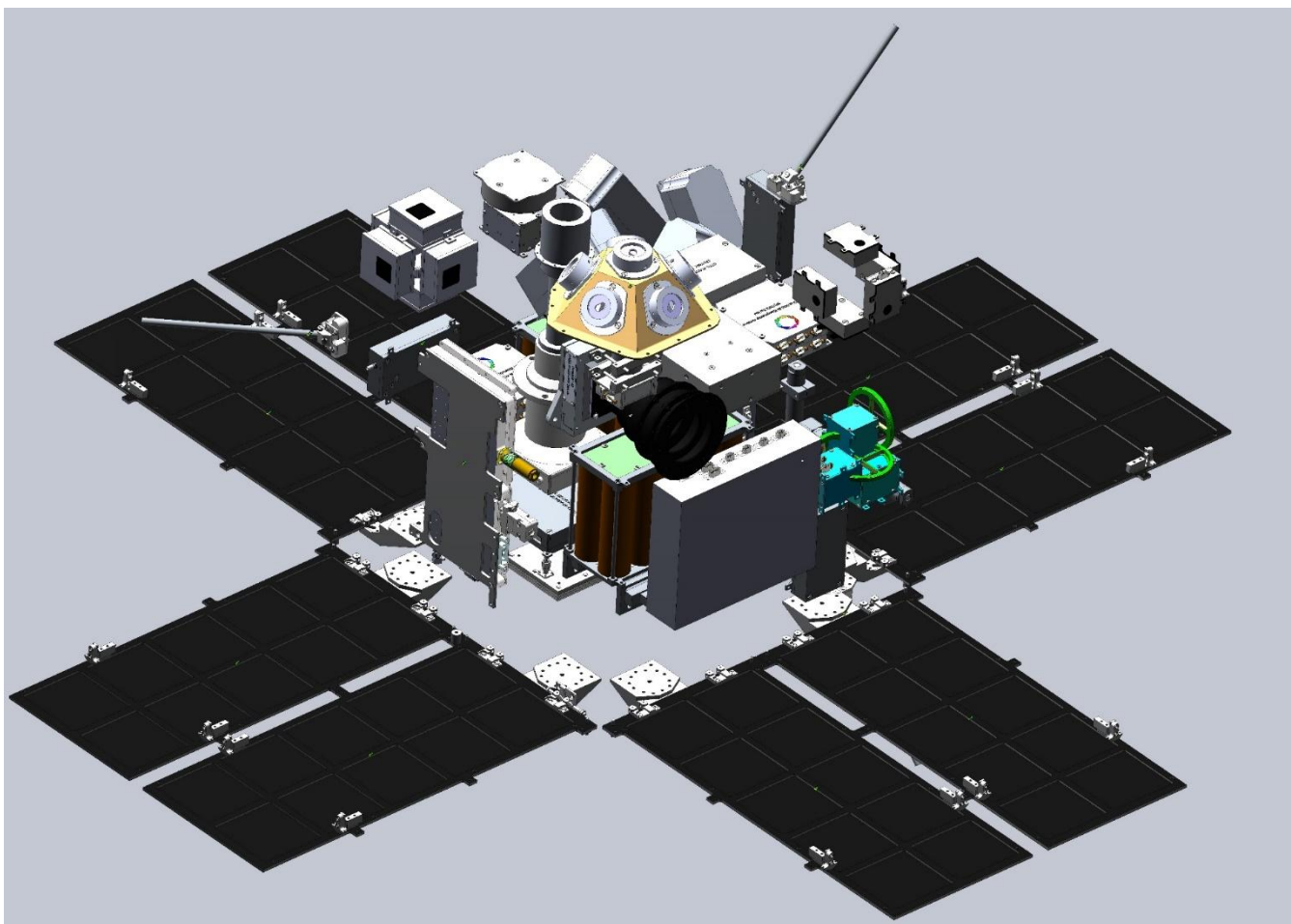
Цифр СИИП - «Микро» (Страница 2)

2014





Решение компоновочной задачи





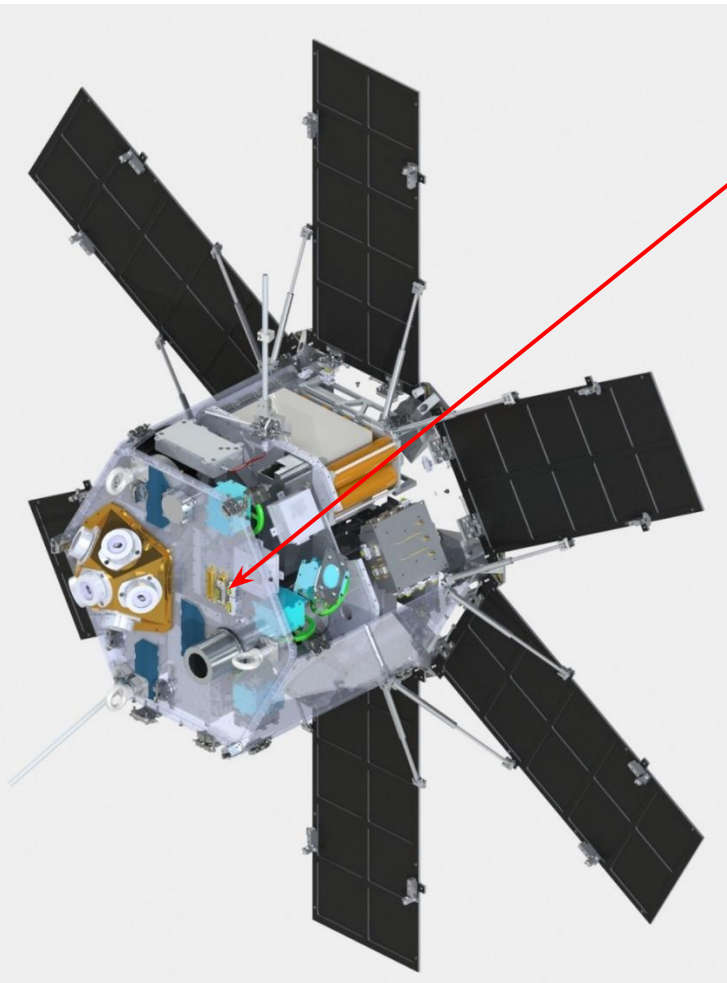
Особенности размещения элементов систем КА

Размещение из соображений:

- Функциональных особенностей/требований (антенны, солнечные и звёздные датчики)
- Условий тепловыделения (передатчики, маховики, элементы СЭП и ПН)
- Массо-габаритных особенностей (аккумуляторы, система энергопитания, ПН)
- Создания взаимных помех и наводок (магнитометры и ЭМ катушки, аккумуляторы, маховики, гиродины, электромеханические устройства, маховики и ДУС)
- Требования обеспечения условий работы ПН
- Минимизации потерь радиосигнала

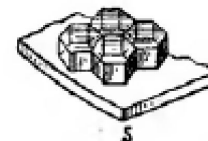
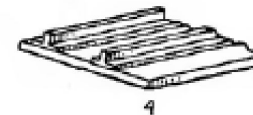
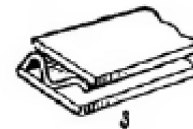


Конструкция и материалы



Несущая конструкция КА и солнечных батарей:

1. Простая стенка (монокок)
2. Вафельная
3. Слоистая
4. Усиленная стрингерами
5. Сотовая

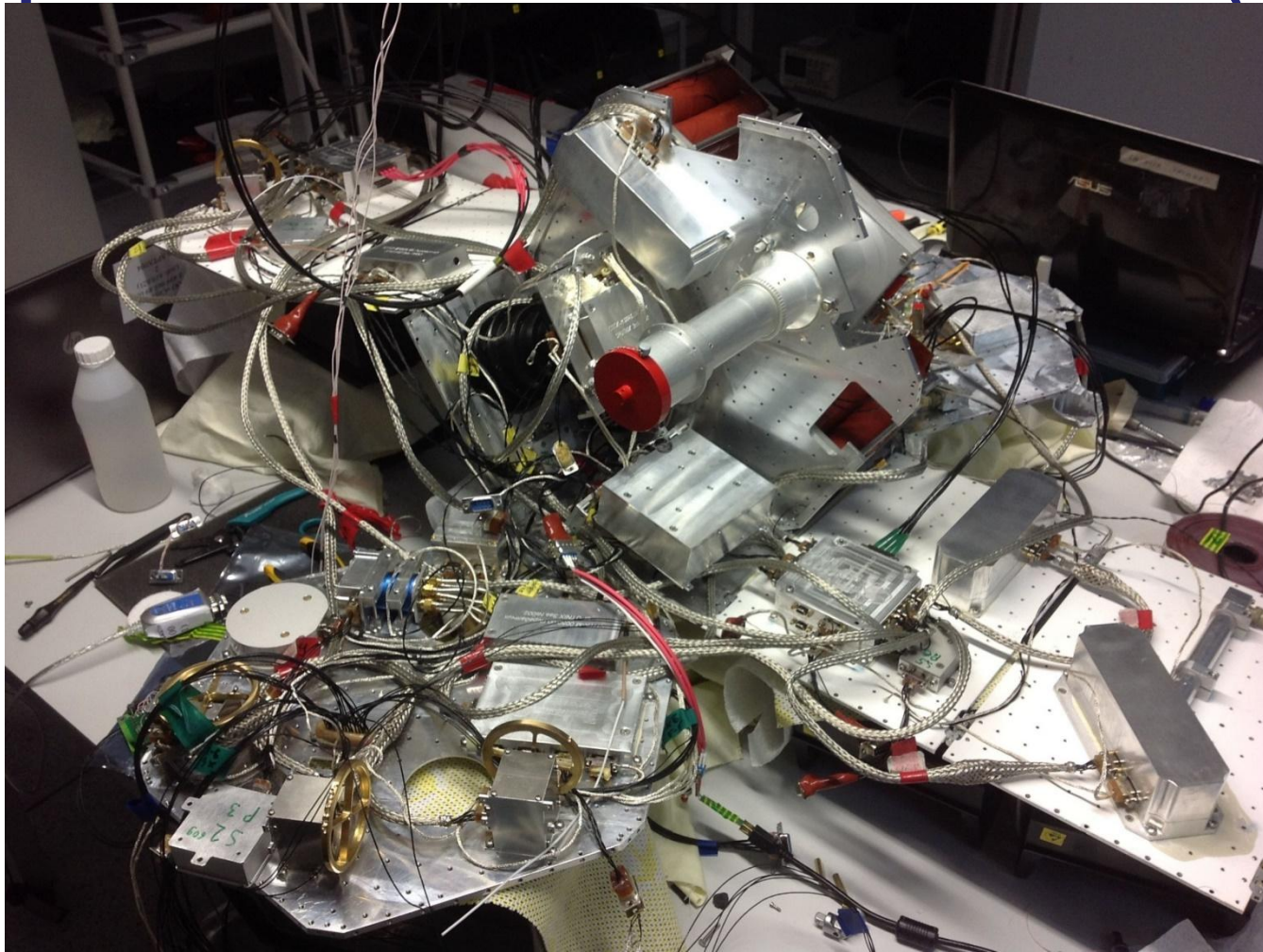


Требования к материалам:

- Должны выдерживать нагрузки выведения и температуры эксплуатации
- Должны быть стойки к вакууму и обладать минимальным газовыделением
- Должны быть стойки к радиации
- Обеспечивать специальные требования полезной нагрузки

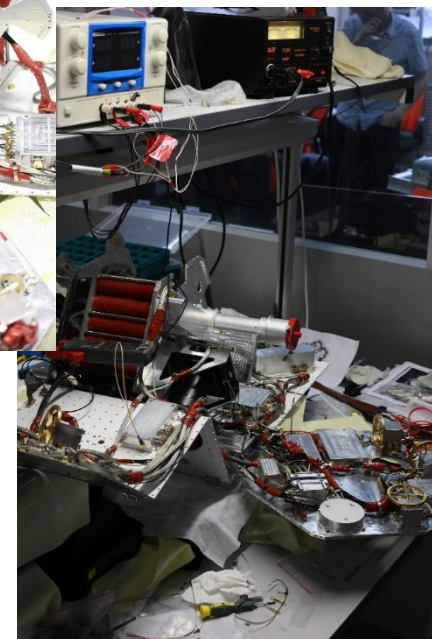
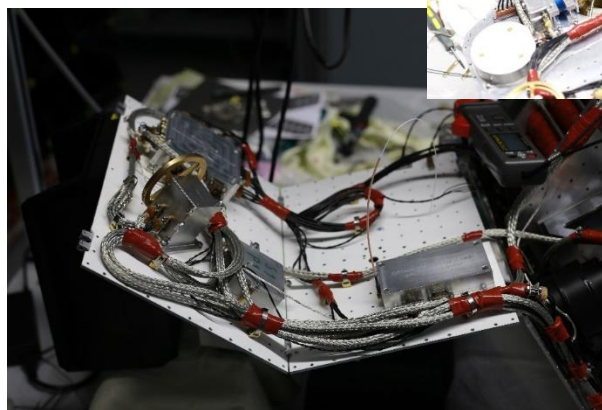


Бортовая кабельная сеть (БКС)





Бортовая кабельная сеть (БКС)





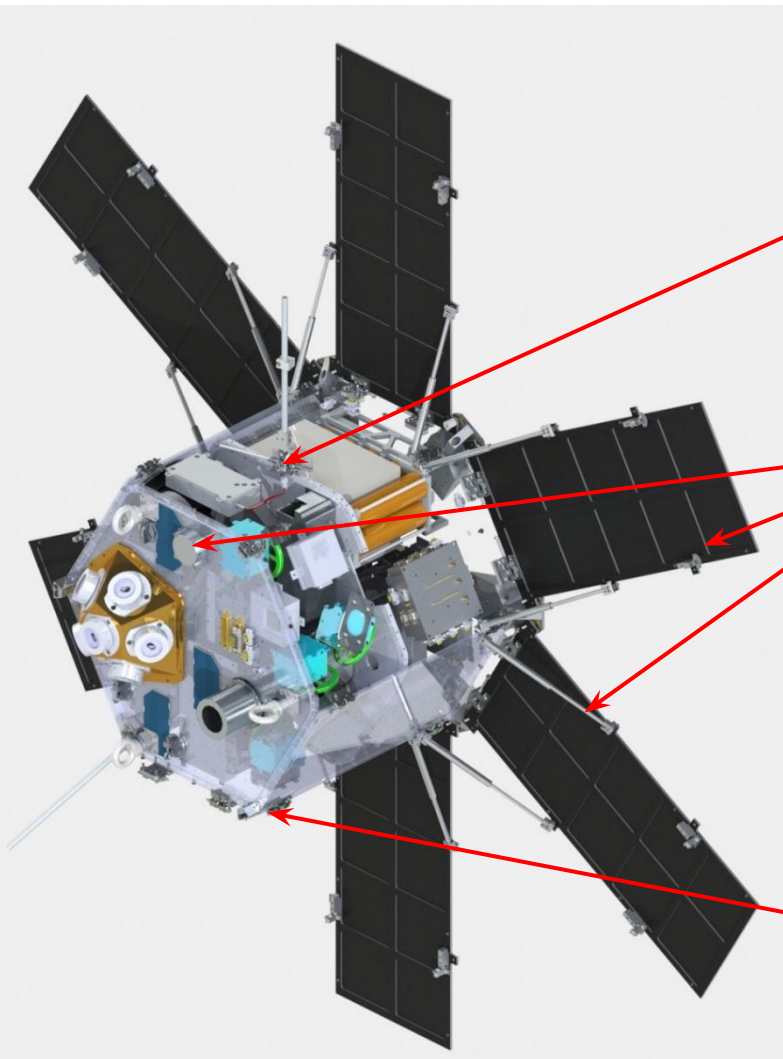
Система раскрытия для развёртываемых конструкций

Состав системы развёртывания:

1. Блокирующий элемент (замок)
 - Пирозамок
 - Электромеханические приводы
 - Разрушаемые конструкции (пережигание, перерезание)
 - Клапаны
2. Элемент, обеспечивающий раскрытие
 - Пассивный (упругие элементы, система тросов и блоков, газогенератор)
 - Активный (электропривод, реактивный двигатель)
3. Шарниры, конструкция, материалы, покрытия



Система развёртывания: пример



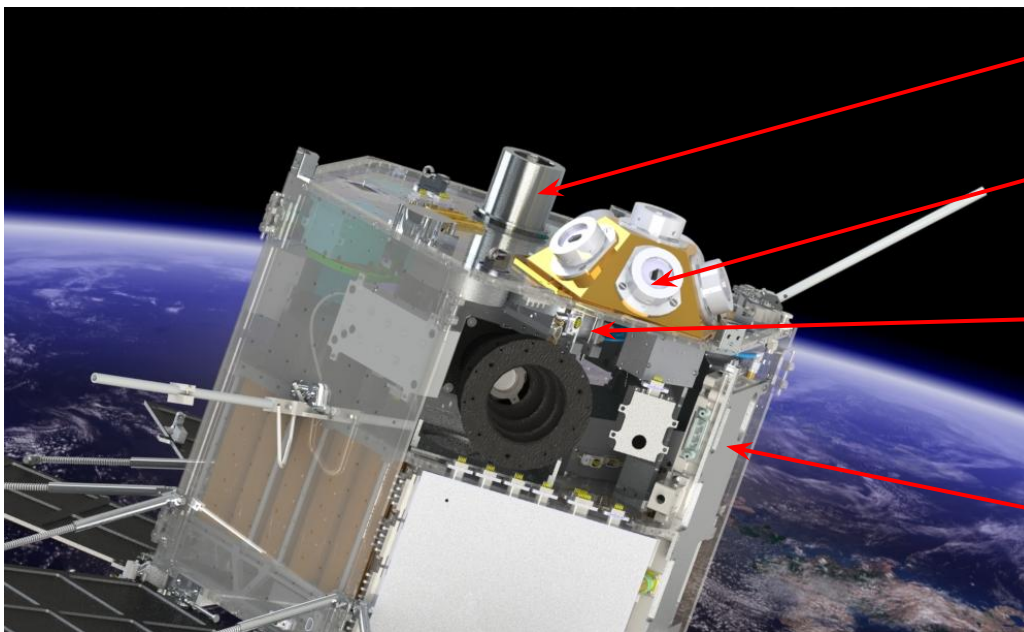
Раскрывающиеся антенны УКВ-диапазона
Пружина кручения
Открывается вместе с СБ

Система раскрытия СБ:
Пружины сжатия
Направляющие для нити на СБ и на корпусе
Катушка для сворачивания остатков нити

Система блокировки –
пережигаемая в 3-х точках нить
из СВМПЭ.



Полезная нагрузка и целевая аппаратура



Камера ДЗЗ

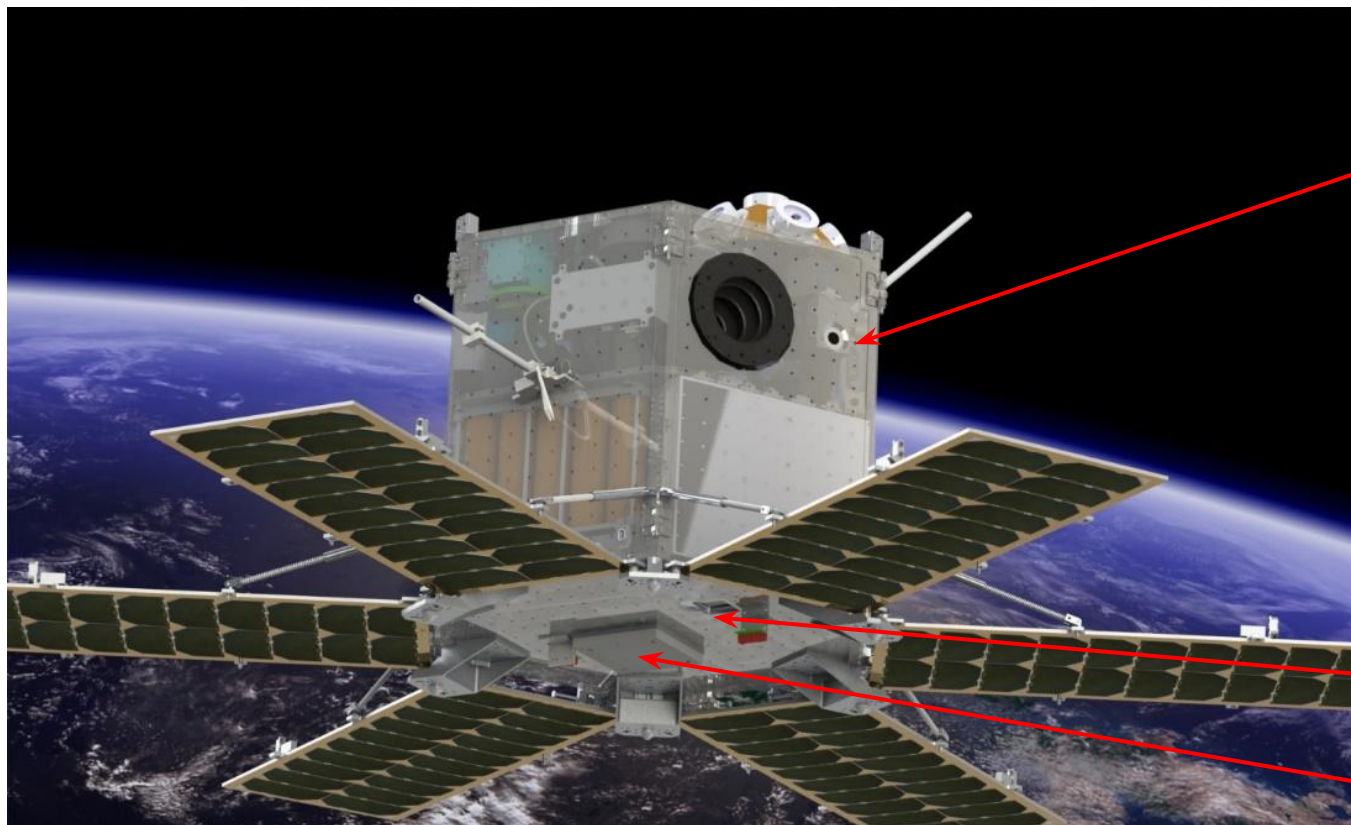
Переключаемая антенна X-диапазона

Антенный переключатель

Передатчик X-диапазона



Система ориентации, стабилизации и навигации



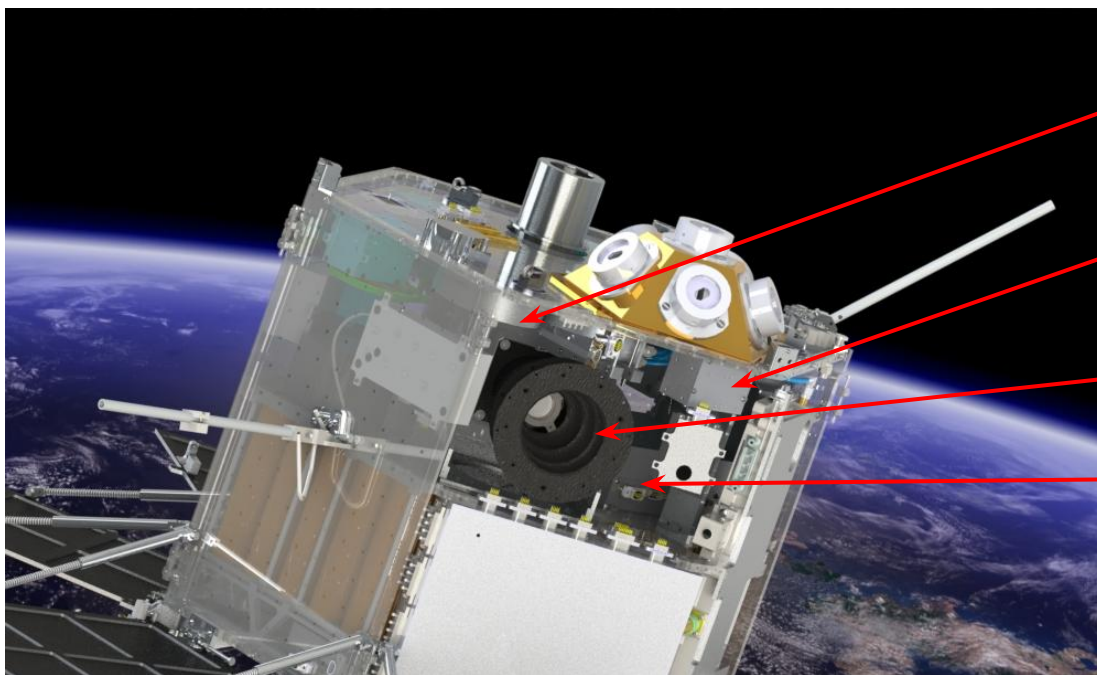
Солнечные датчики
SPUTNIX

Солнечные датчики
DSS-3

GPS



Система ориентации, стабилизации и навигации



Магнитометр

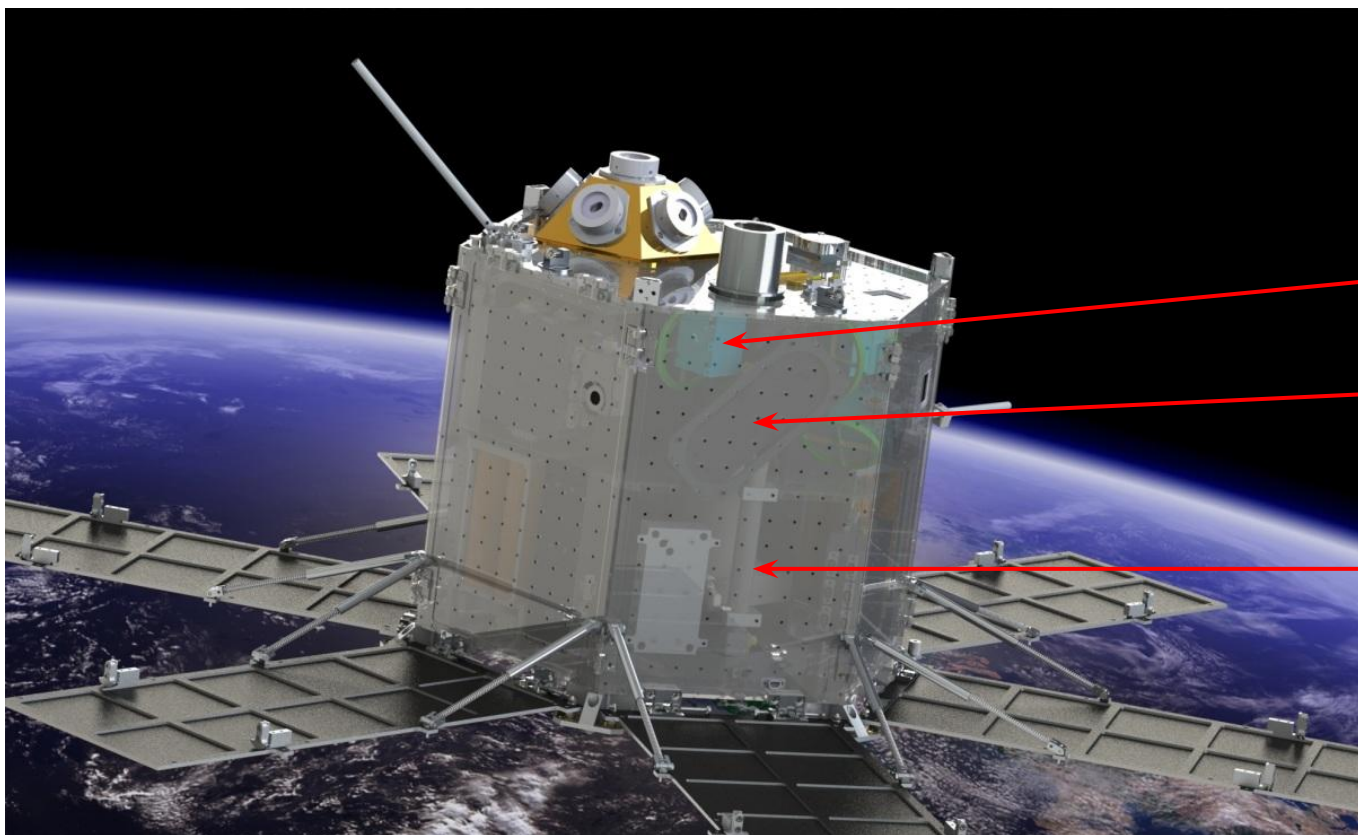
VMS (ДУС+магнитометр)

Звездный датчик

БУСОС



Система ориентации, стабилизации и навигации



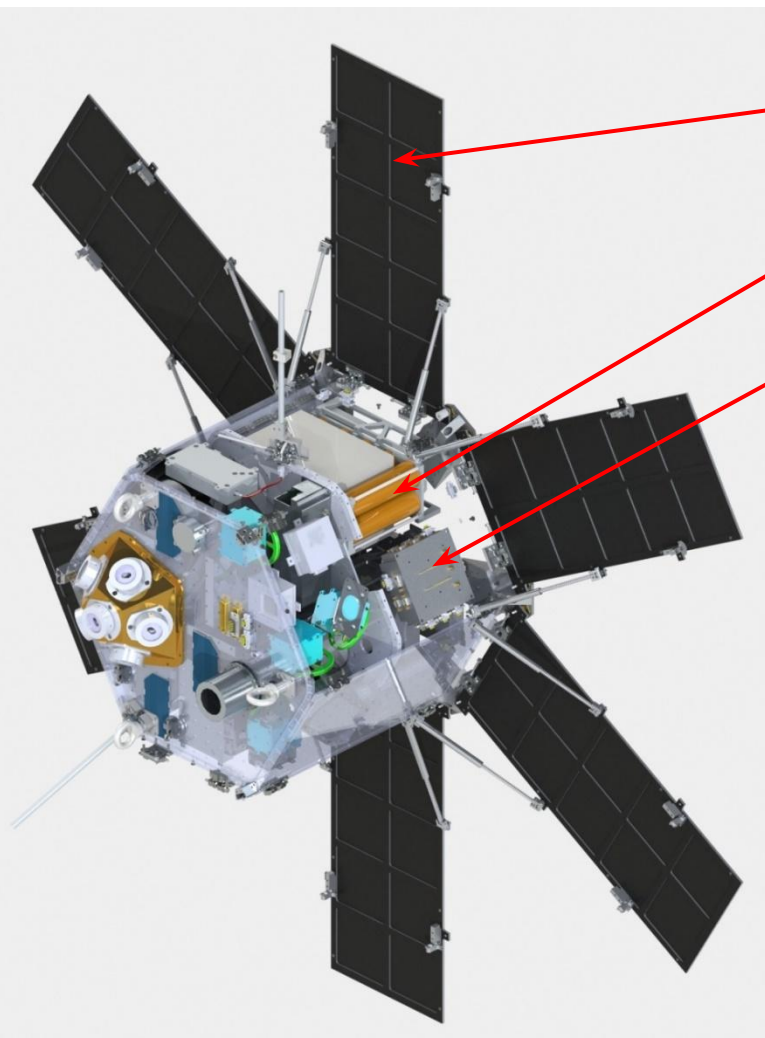
Двигатели-
маховики

Гиродины

Электромагнит
ные катушки



Система энергоснабжения



Солнечные батареи

LiFePO₄ аккумуляторные батареи

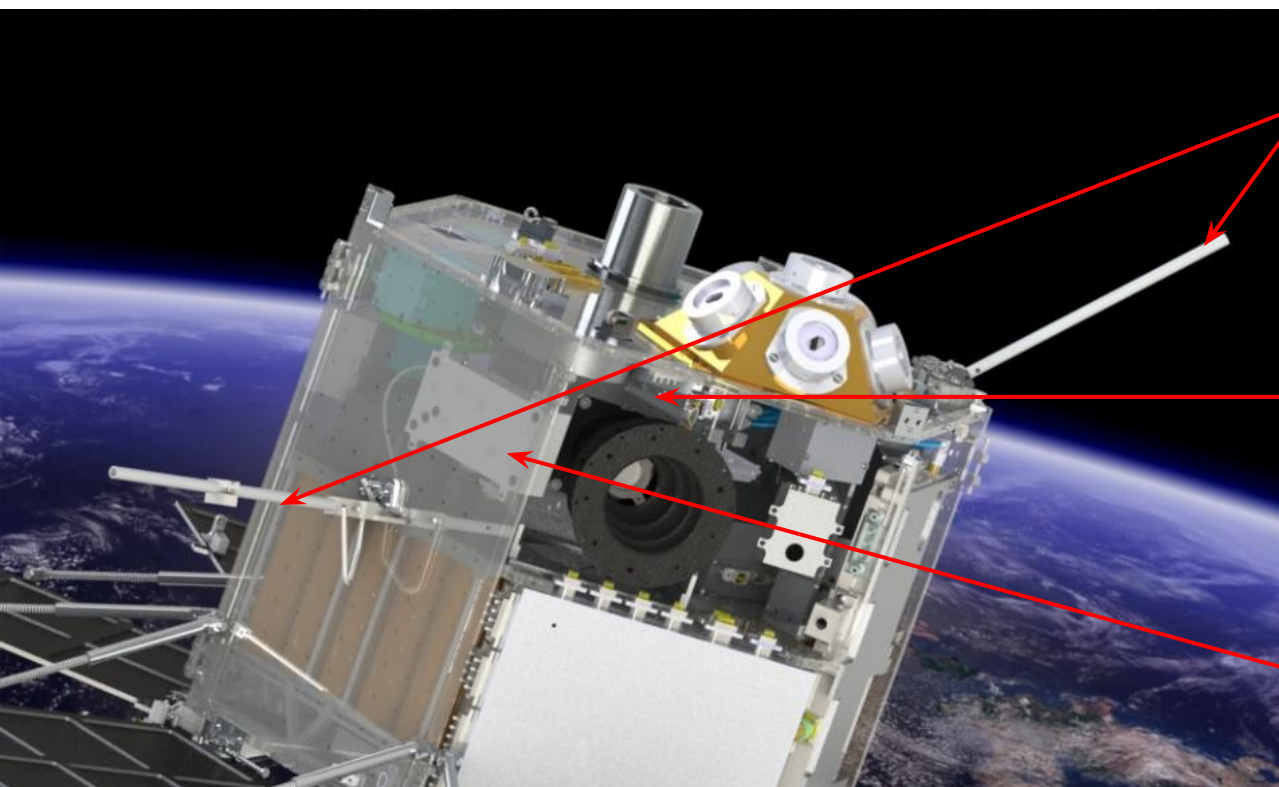
Коммутаторы питания

Блок управления СЭП





Система телеметрии и телекоманд



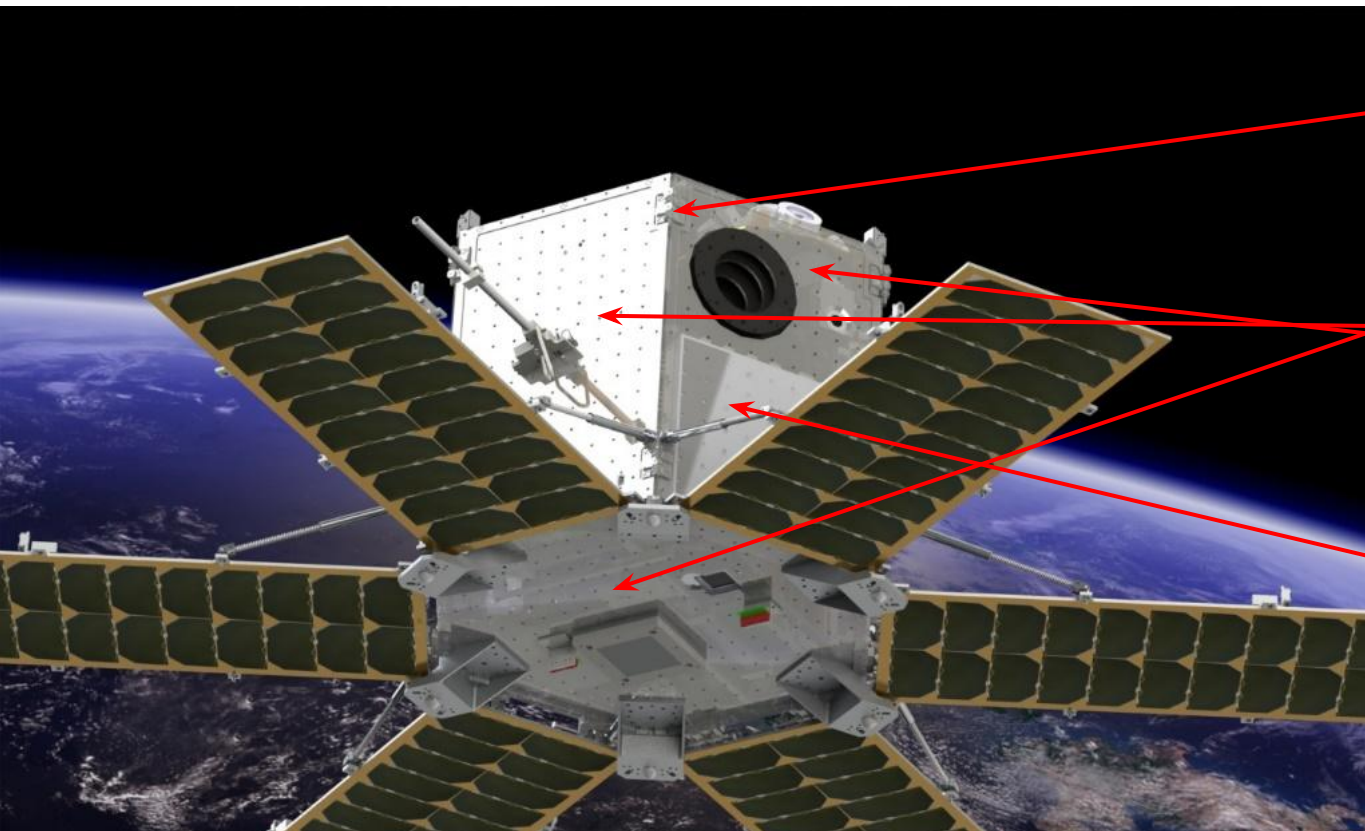
Антенны УКВ
диапазона

БКУ (бортовой
комплекс управления)

Приемо-передатчики
УКВ диапазона



Система пассивного терморегулирования



Тепловые мосты

Оптическая эмаль на отдельных поверхностях

Теплопроводящий клей



Системы координат КА

Название	Связь с...	Положение центра	Ось OX	Ось OZ (полюс)	Использование
Небесная	Инерциальное пространство	Земля или КА	Весеннее равноденствие	Небесный полюс	Анализ орбит, Межпланетные полеты, Астрономия
Гринвичская	Земля	ЦМ Земли	Гринвичский меридиан	Земной полюс	Положение на Земле, анализ орбит
Объекто-центрическая	КА	ЦМ КА	Ось КА в направлении скорости		Ориентация КА
Эклиптическая	Инерциальное пространство	Солнце	Весеннее равноденствие	Полюс эклиптики	Межпланетные полеты



Системы координат, используемые в космической технике

Для описания движения КА используются различные системы координат (СК), каждая из которых определяется двумя параметрами:

- положением начала координат;
 - ориентацией осей координат относительно центра.
-
- Все системы координат можно разделить на два класса:
 - Инерциальные (движутся с постоянной скоростью и не вращаются);
 - Неинерциальные (движутся с ускорением).



Абсолютная и относительная геоцентрические (гринвичская) СК

Начало обеих СК расположено в центре Земли.

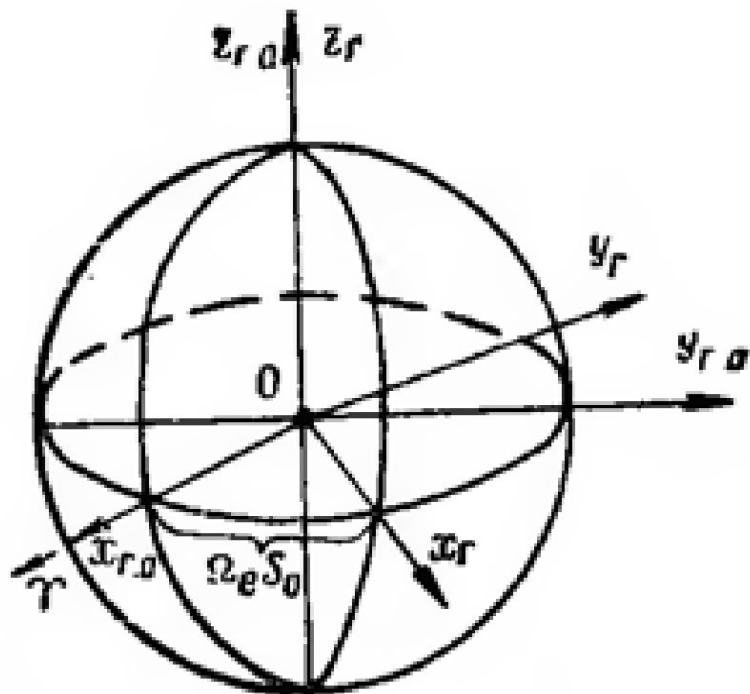
Две оси базиса (X и Y) расположены в плоскости экватора.

Ось $X_{г.а.}$ абсолютной СК направлена в точку весеннего равноденствия.

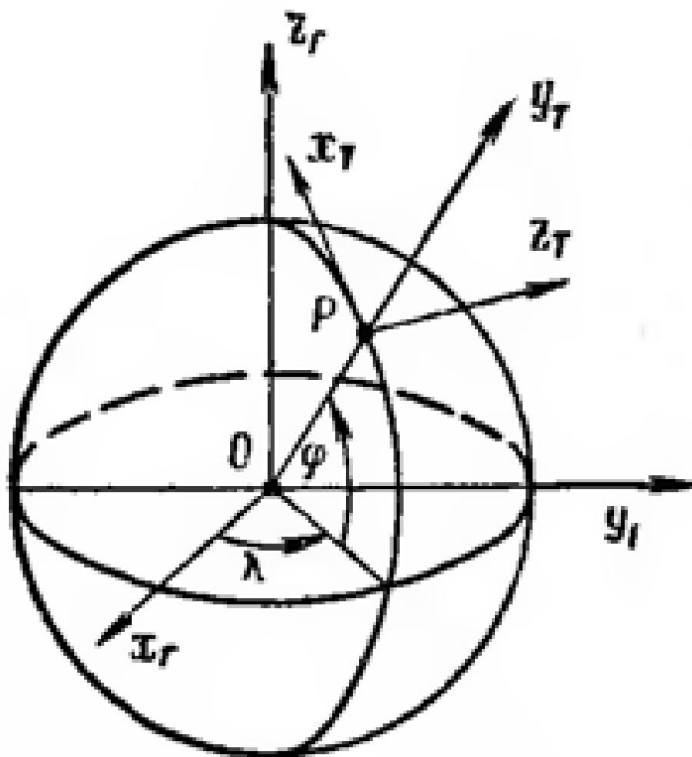
Система перемещается вместе с Землёй относительно солнца, но направление осей относительно звёзд остаётся неизменным.

Ось $X_{г.}$ относительной СК направлена в точку пересечения экватора с Гринвичским меридианом.

Система перемещается вместе с Землёй относительно солнца и вращается вместе с ней



Топоцентрическая система координат

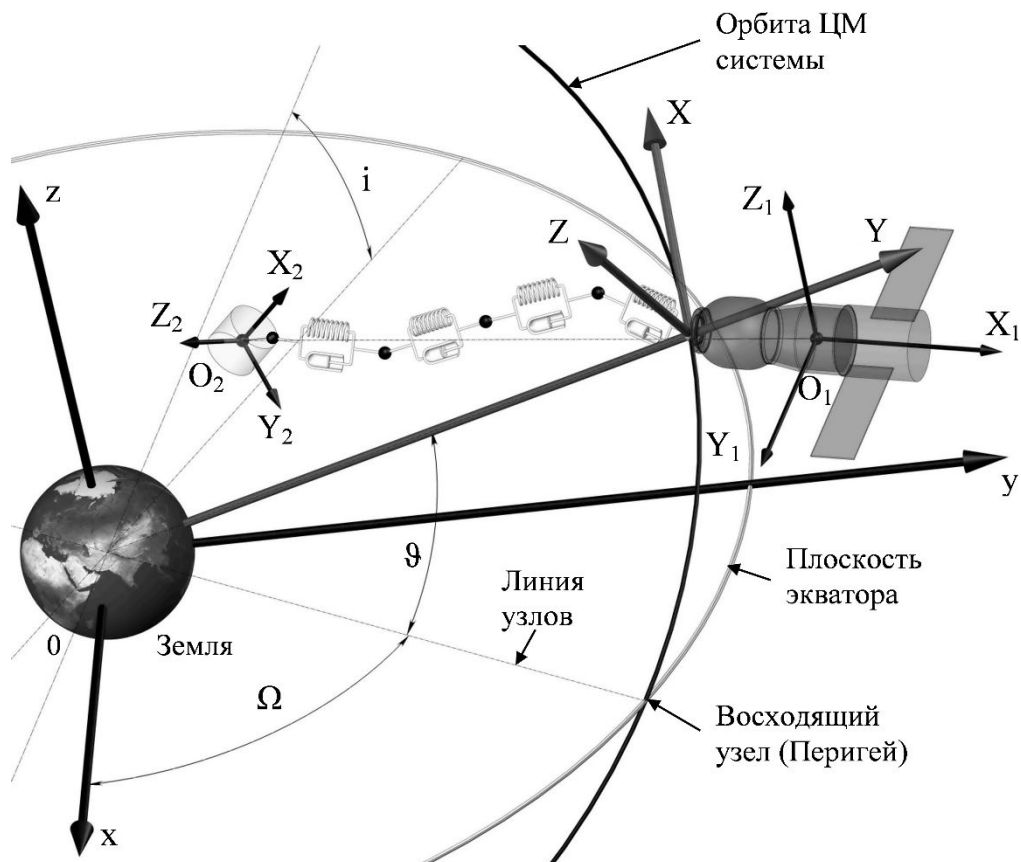


Начало системы координат определяется расположением Земной станции (геодезической широтой и долготой). Положение спутника определяется:

- азимутом λ ;
- углом возвышения Φ ;
- дальностью до спутника ρ .

Данная СК используется для наземных станций

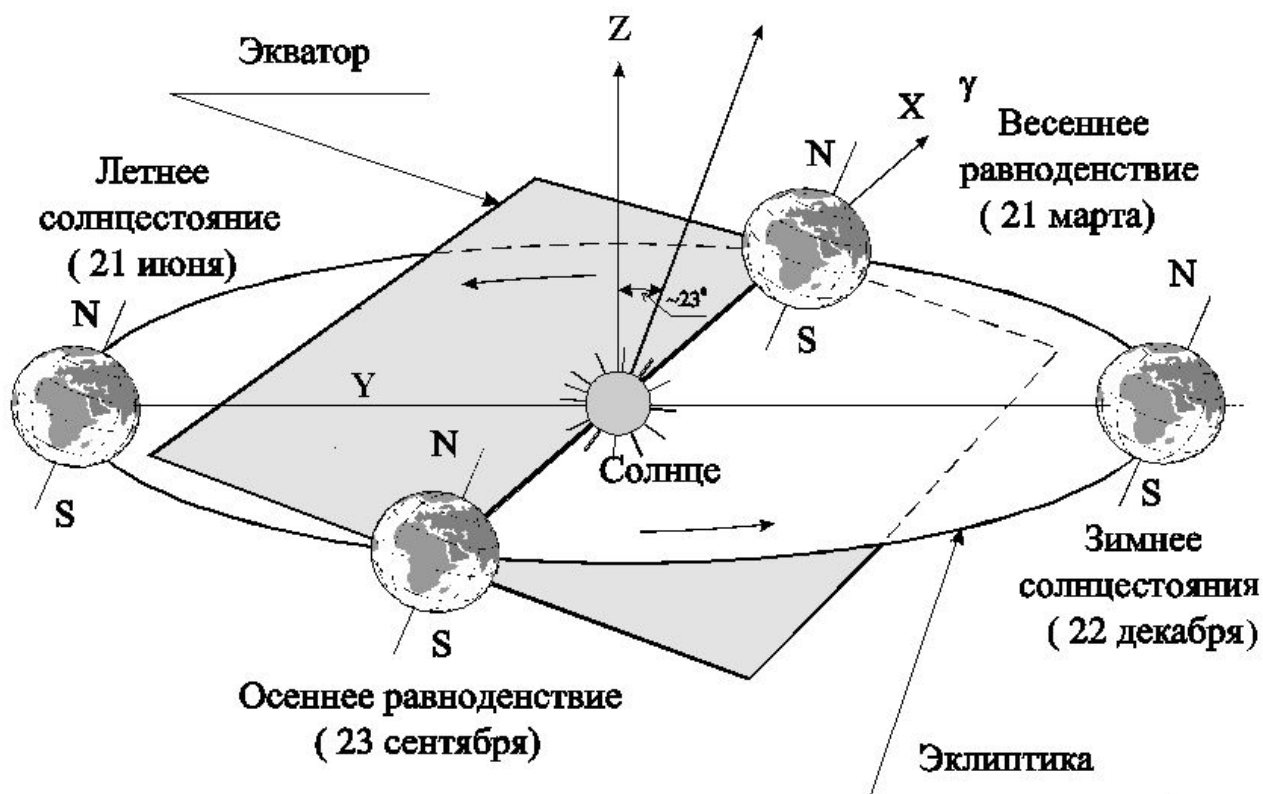
Орбитальная объектоцентрическая система координат



Начало системы координат помещают в центр масс космического аппарата. В орбитальной системе ось Y направляют вдоль радиуса-вектора, связывающего центр Земли с центром масс КА. Ось X располагают в плоскости орбиты перпендикулярно оси Y (в сторону движения аппарата).

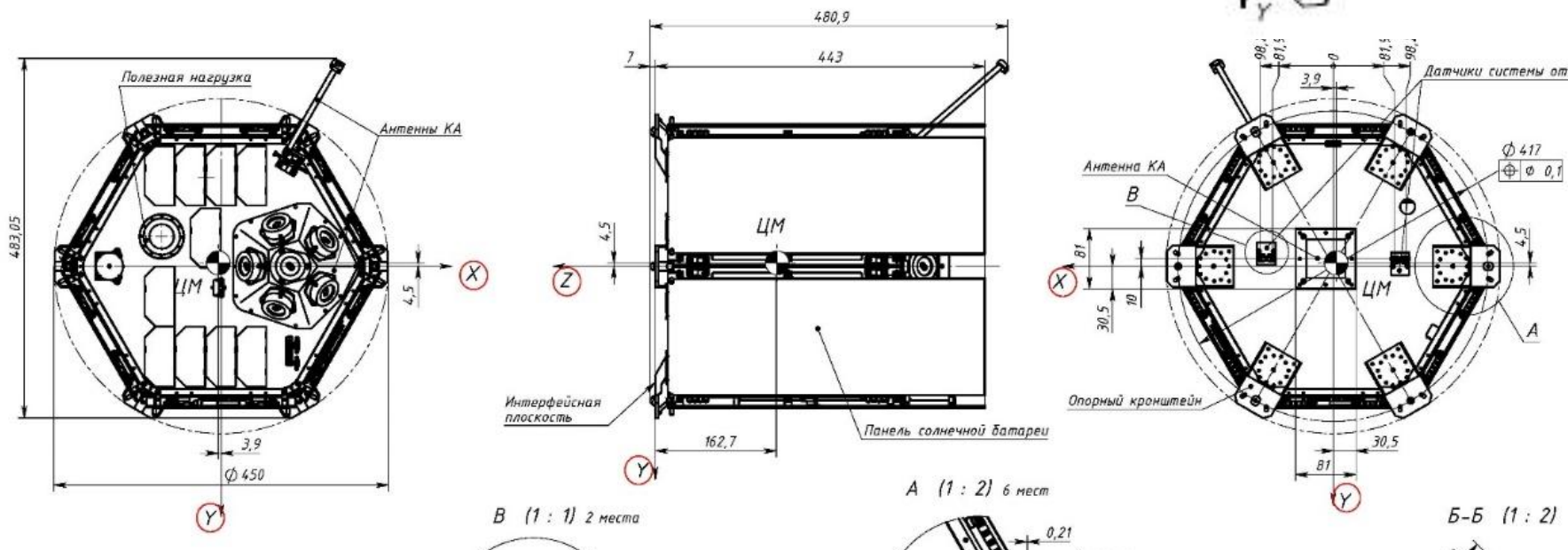


Гелиоцентрическая эклиптическая система координат

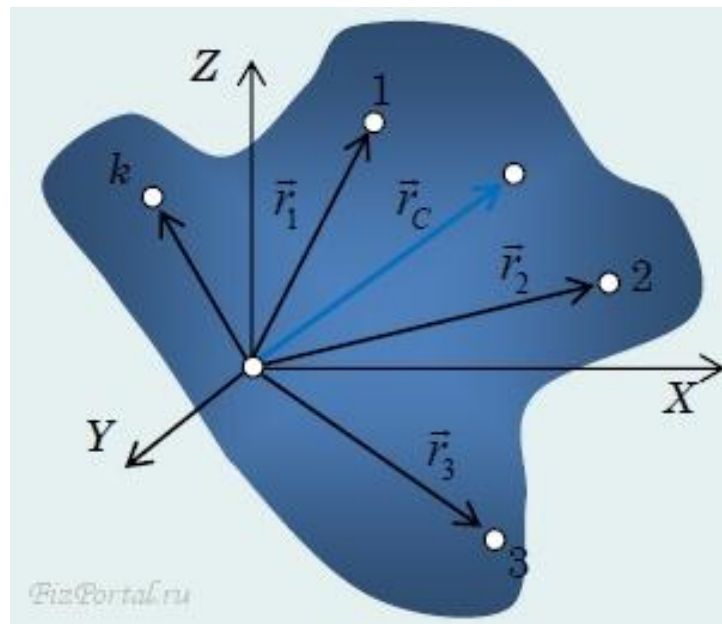
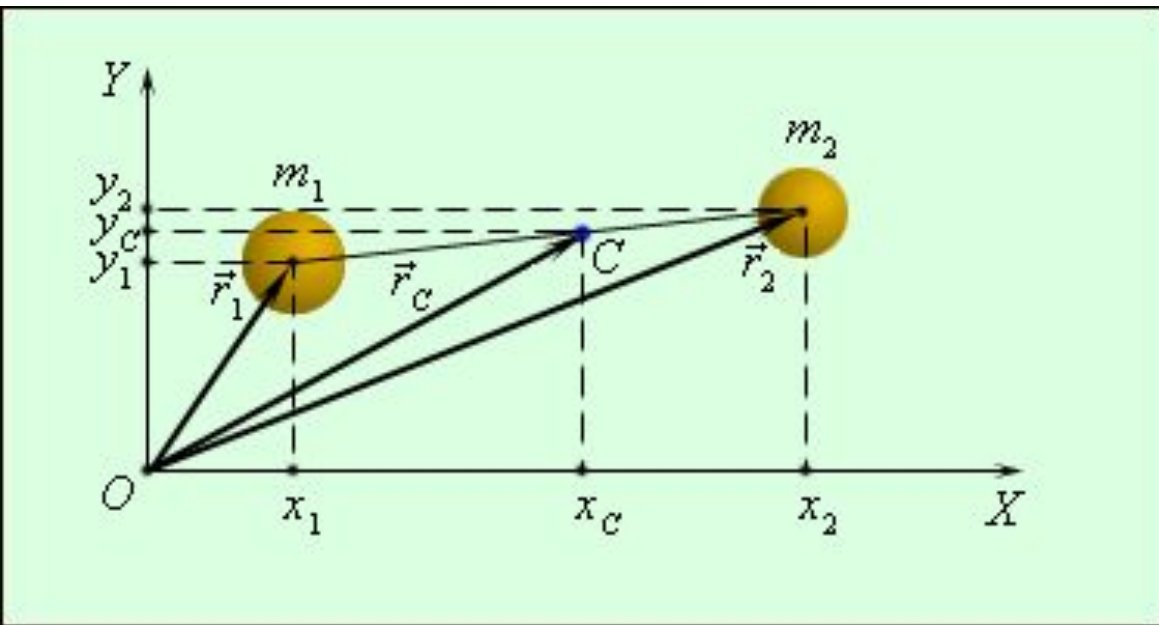




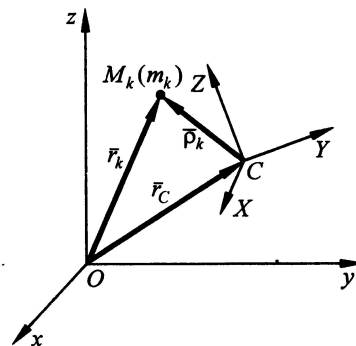
Строительная система координат



Понятие о центре масс



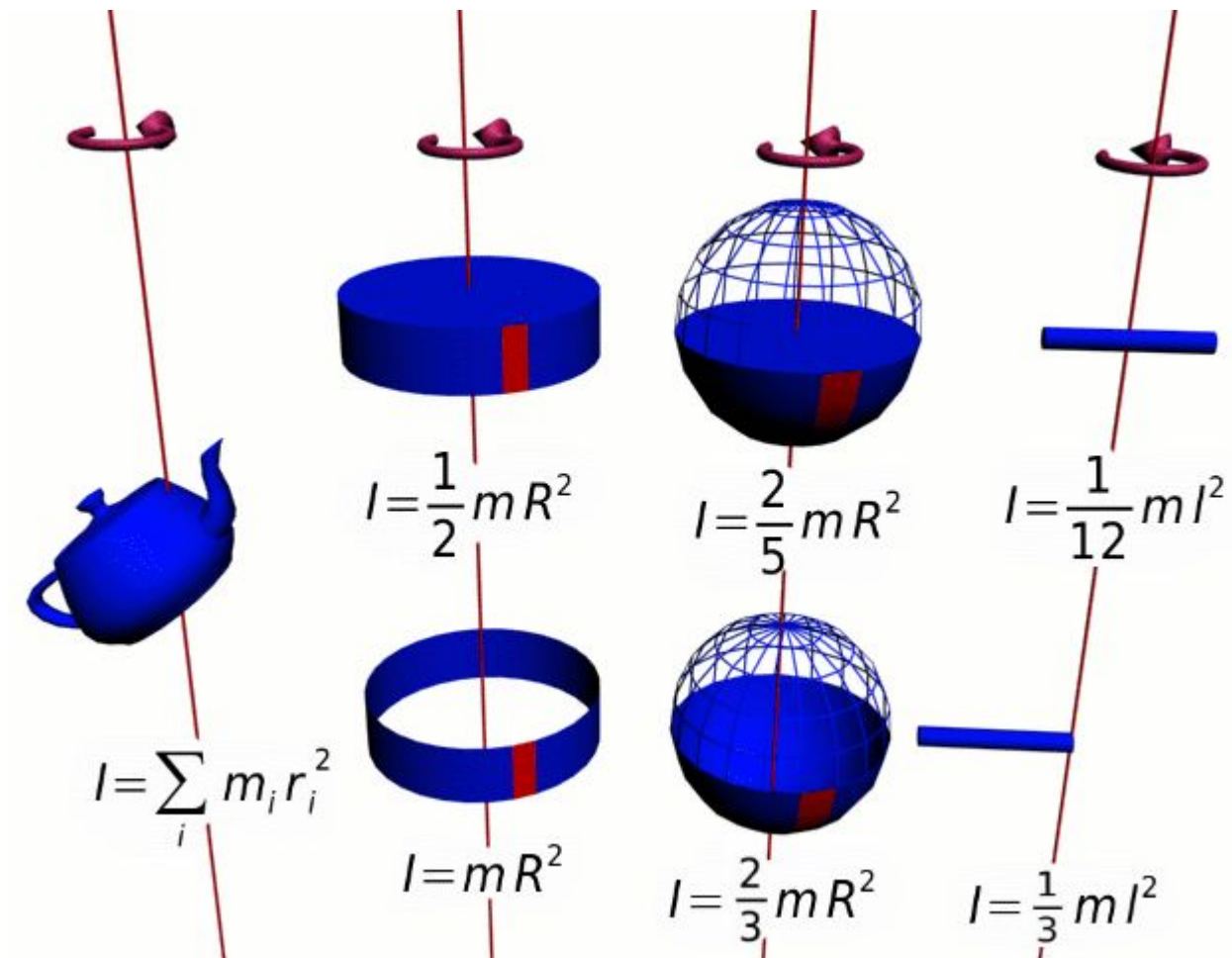
$$\bar{r}_C = \frac{\sum_{k=1}^N m_k \bar{r}_k}{M}$$



$$\bar{r}_C = \frac{\int \bar{r} dm}{M}$$



Понятие о моменте инерции



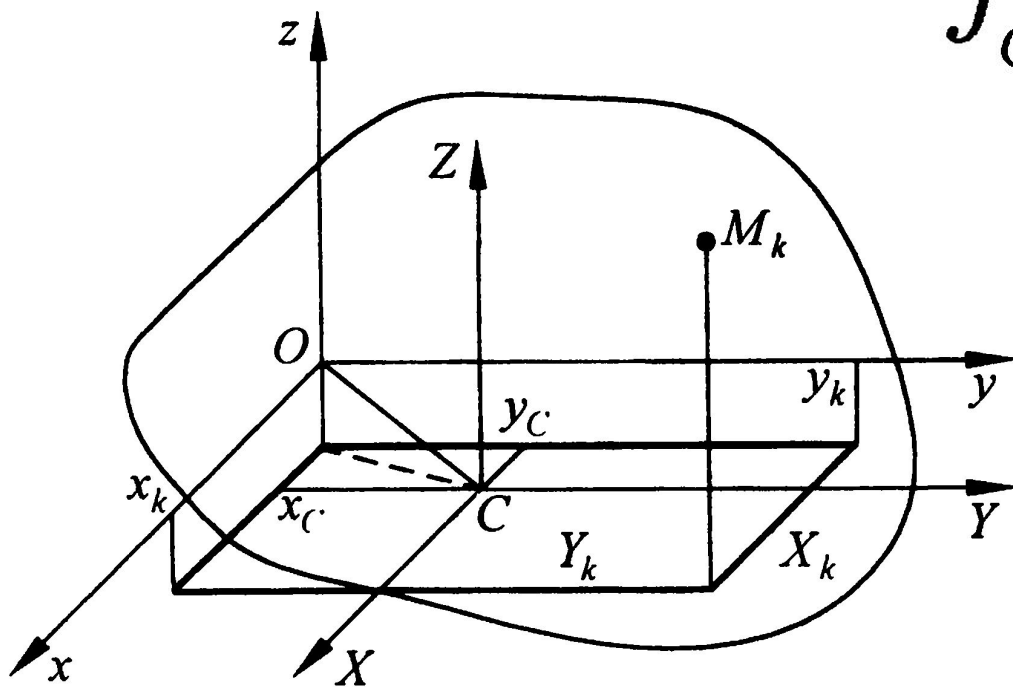
$$J = \int r^2 dm$$

$$L = J \cdot \omega$$

$$p = m \cdot V$$

Теорема Гюйгенса-Штейнера

$$J_{Oz} = J_{Cz} + Md^2$$



Понятие о главных, центробежных моментах инерции и тензоре инерции

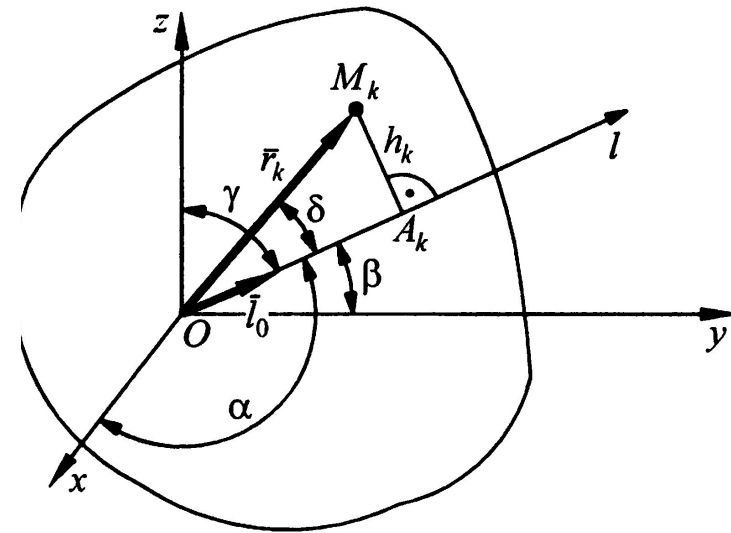
Момент инерции относительно оси, проходящей через произвольную точку

Для J_l получаем

$$\begin{aligned}
 J_l = & \cos^2 \alpha \sum_{k=1}^N m_k (y_k^2 + z_k^2) + \cos^2 \beta \sum_{k=1}^N m_k (x_k^2 + z_k^2) + \\
 & + \cos^2 \gamma \sum_{k=1}^N m_k (x_k^2 + y_k^2) - 2 \cos \alpha \cos \beta \sum_{k=1}^N m_k x_k y_k - \\
 & - 2 \cos \alpha \cos \gamma \sum_{k=1}^N m_k x_k z_k - 2 \cos \beta \cos \gamma \sum_{k=1}^N m_k y_k z_k ,
 \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned}
 J_l = & J_x \cos^2 \alpha + J_y \cos^2 \beta + J_z \cos^2 \gamma - \\
 & - 2J_{xy} \cos \alpha \cos \beta - 2J_{xz} \cos \alpha \cos \gamma - 2J_{yz} \cos \beta \cos \gamma .
 \end{aligned}$$





Понятие о главных и центробежных моментах инерции; эллипсоиде и тензоре инерции

$$J_{xx} = \int x^2 dm \quad J_{yy} = \int y^2 dm \quad J_{zz} = \int z^2 dm$$

$$J_{xy} = \int xy dm$$

$$J_{yz} = \int yz dm$$

$$J_{zx} = \int xz dm$$

Центробежные моменты инерции

Тензор инерции

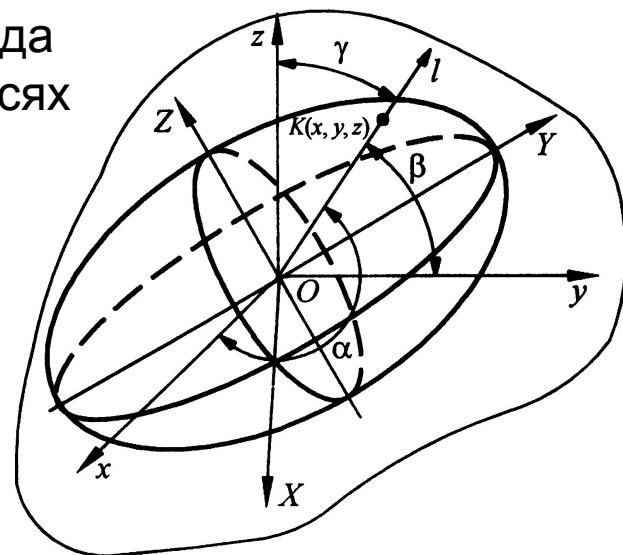
$$\begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} & J_{xz} \\ J_{yx} & J_{yy} & J_{yz} \\ J_{zx} & J_{zy} & J_{zz} \end{pmatrix}$$

$$J_X X^2 + J_Y Y^2 + J_Z Z^2 = 1$$

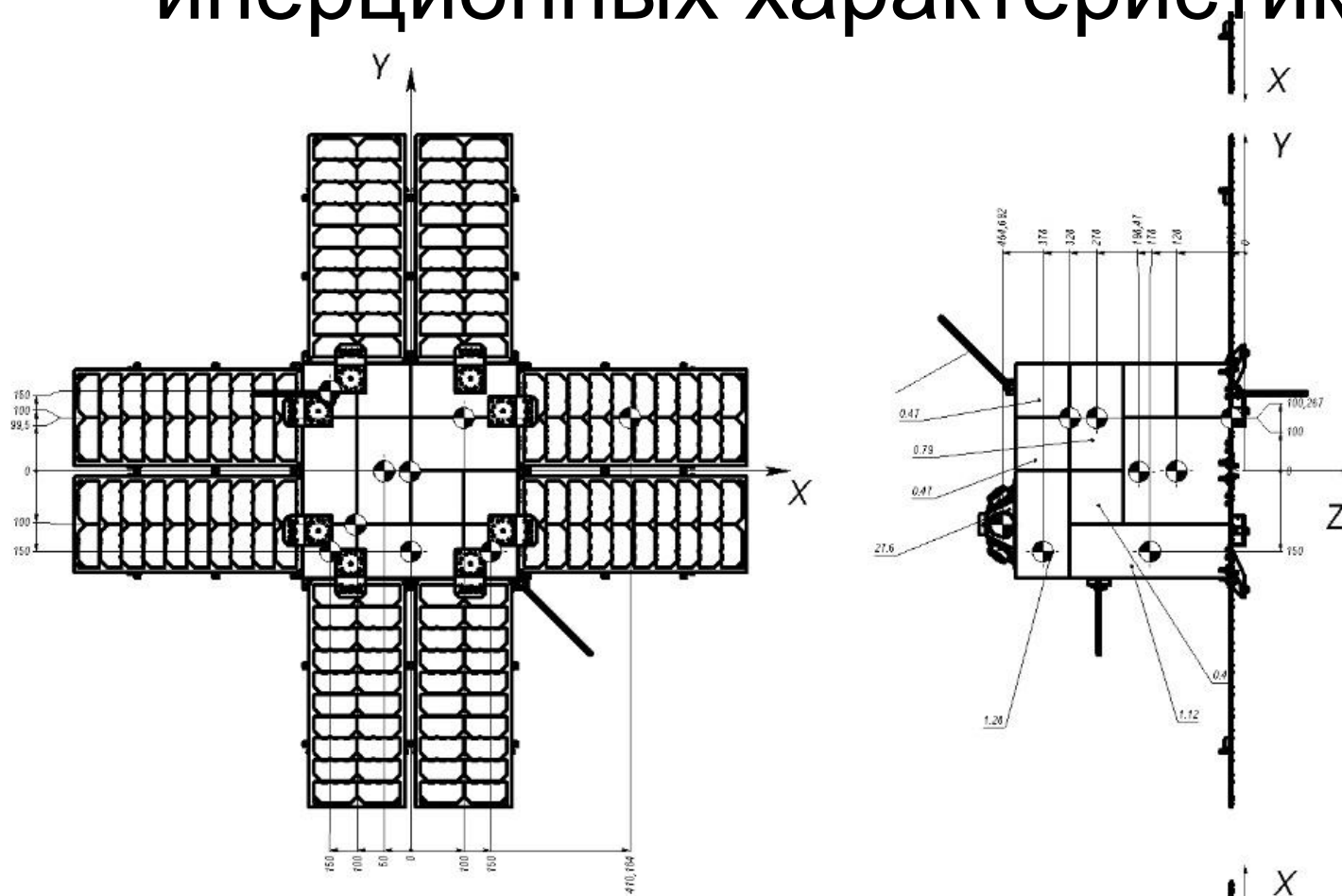
Уравнение эллипсоида инерции в главных осях инерции

$$\begin{pmatrix} J_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & J_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & J_{zz} \end{pmatrix} - \text{тензор инерции}$$

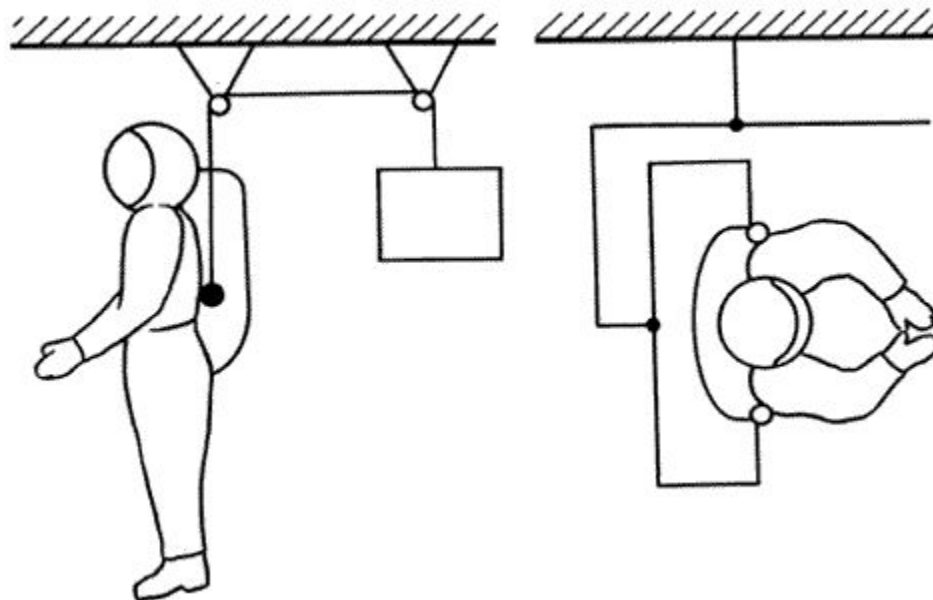
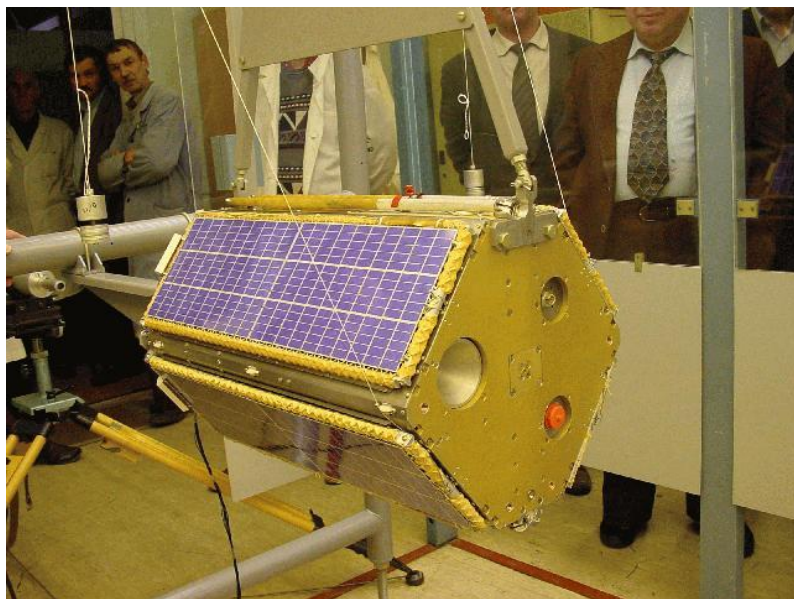
вокруг главных осей инерции



Расчёт и измерение массово-инерционных характеристик



Расчёт и измерение массово-инерционных характеристик



Стенды для обезвешивания



Способы обеспечения заданных по ТЗ массово-инерционных характеристик

- Для смещения центра масс:
 - Проектные решения за счёт перекомпоновки и перемены местами лёгких и тяжёлых приборов в направлении смещения центра масс
 - Добавление дополнительной, «балластной» массы в направлении смещения ЦМ или выборка массы в направлении, противоположном смещению ЦМ
 - Цель – расположить на оси симметрии (линии действия силы);
 - точно знать его положение для согласования запуска

Важно при наличии действующей на аппарат силы (реактивной, силы сопротивления, силы отталкивания и т.п.)
- Для изменения момента инерции:
 - Те же приёмы, что и для перемещения центра масс + поворот приборов на месте
 - Рекомендации – осесимметричность конструкции, повышение момента инерции вокруг оси с минимальным моментом
 - Цель – приведение главных осей инерции к строительным осям КА
 - точное знание их значений для разработки алгоритмов управления КА и для согласования запуска



Список литературы

1. Феодосьев В.И. Основы техники ракетного полета, изд. 2-е. - М. Наука, Главная редакция физ-мат литературы, 1981. - 496 с.
2. *Инженерный справочник по космической технике. Изд 2-е. М*
3. Солодов А.В. - Инженерный справочник по космической технике. – 1969
4. Гуцин В.Н., - Основы устройства космических аппаратов - 2003
5. Курс теоретической механики. «Механика в техническом университете», под. ред. К.С. Колесникова, 2005г. – 735 с.



Введение.

Состав систем космического аппарата.

Проведение литературного обзора

Спасибо за внимание

Попов Александр Викторович, технический директор ООО
«Спутникс»,

www.sputnix.ru

123995, г. Москва, Бережковская набережная, д. 20, стр. 6

Кафедра SM-1 «Космические аппараты и ракеты-носители»

107005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10

E-mail: kafsm1@sm.bmstu.ru

Телефон: +74992610107