



Проект малого космического аппарата с маршевой электроракетной двигательной установкой для исследования астероидов

Коллектив авторов из ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

История развития проекта МКА-ЭРДУ

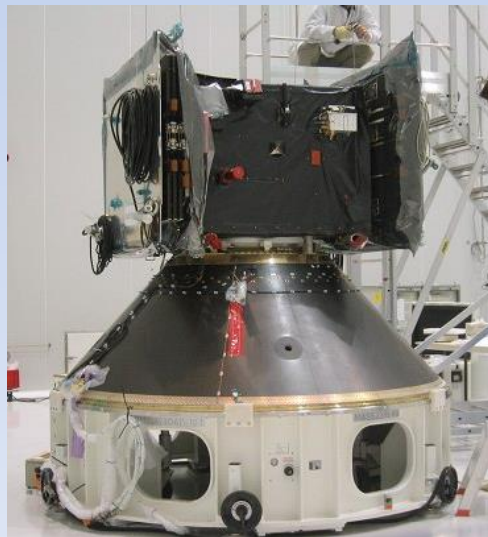
1. Начало работы над проектом 2011 год (подготовка к конкурсу молодежных проектов НПО-Л и ОАО «ИСС»);
2. Представление работы на конкурсе молодежных проектов НПО-Л и ОАО «ИСС» в 2012 году (цели: исследование Луны, отработка технологий при перелете Земля-Луна, выведение МКА: попутное);
3. Участие во всероссийском конкурсе молодежных проектов в 2012 году, (организатор: МАИ, результат: 2-е место);
4. Выполнение НИР по исследованию проектных характеристик МКА с ЭРДУ для исследования Луны в 2013 г (заказчик: ФГУП ЦНИИмаш);
5. Представление работы на 2-м конкурсе молодежных проектов НПО-Л и ОАО «ИСС» в 2013 году (цели: исследование Луны, ближних околоземных астероидов, отработка технологий при перелете, выведение МКА: попутное);
6. В 2014 году развитие проекта – основная цель миссии исследования околоземных астероидов;
7. Выполнение НИР по исследованию проектных характеристик МКА с ЭРДУ для исследования астероидов в 2015 г (заказчик: ФГУП ЦНИИмаш выведение МКА: попутное, целевое).

Реализованные проекты с маршевой ЭРДУ

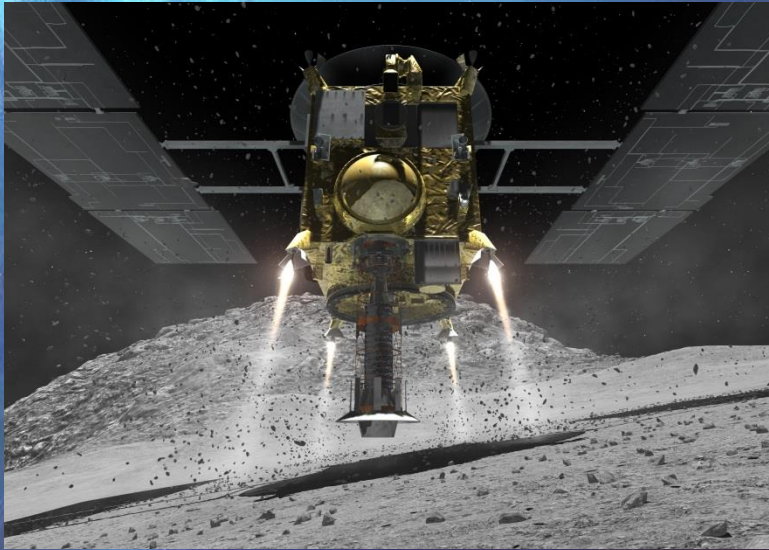


SMART - 1

- **Масса – 367 кг**
- **Мощность солнечных батарей – 1850 Вт**

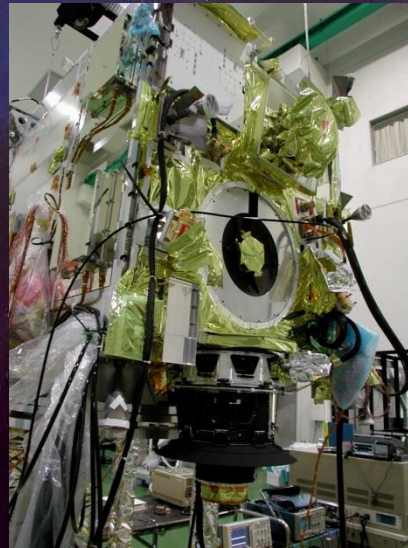
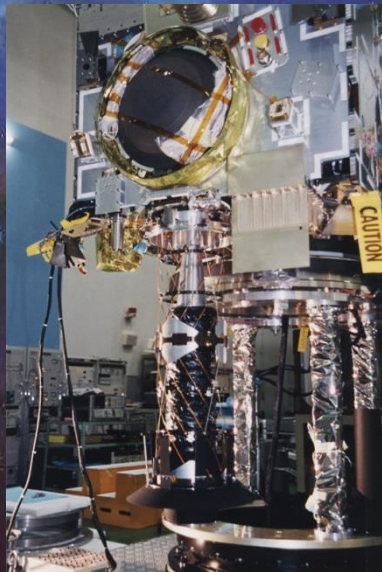


Реализованные проекты с маршевой ЭРДУ



MUSES-C «HAYABUSA» (САПСАН)

- **Масса – 510 кг**
- **Мощность
солнечных
батарей – 2570 Вт**



Сравнение удельных параметров КА с маршевыми электроракетными двигательными установками

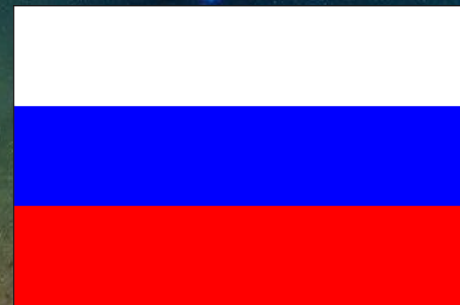
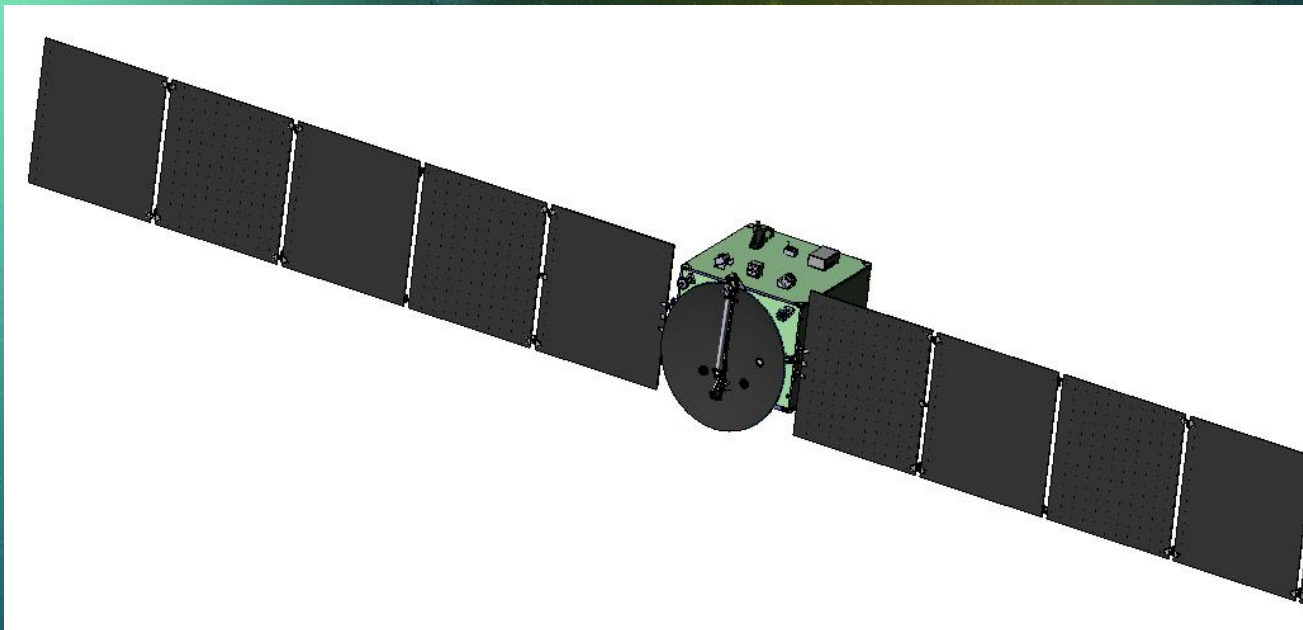


Dawn (Рассвет)

- **Масса – 1210 кг**
- **Мощность солнечных батарей – 10,3 кВт**

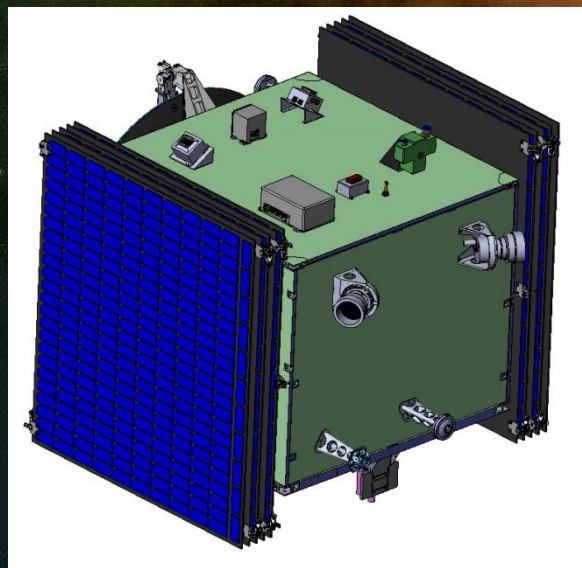
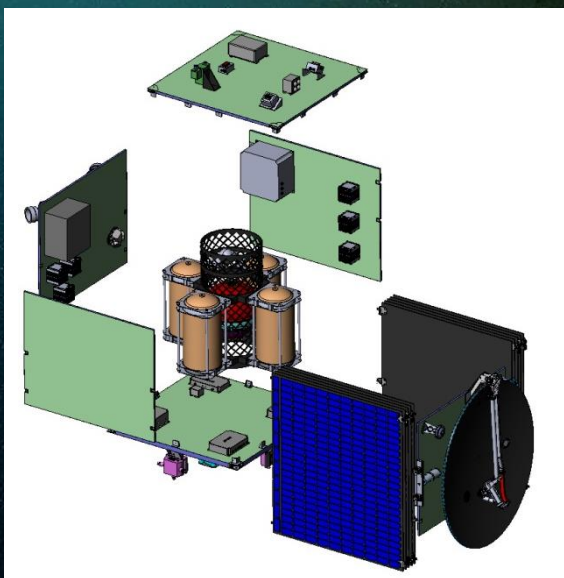


Проект МКА с маршевой ЭРДУ



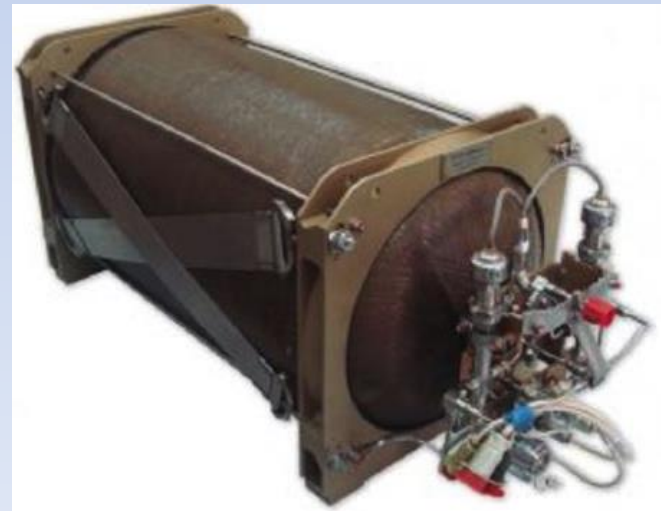
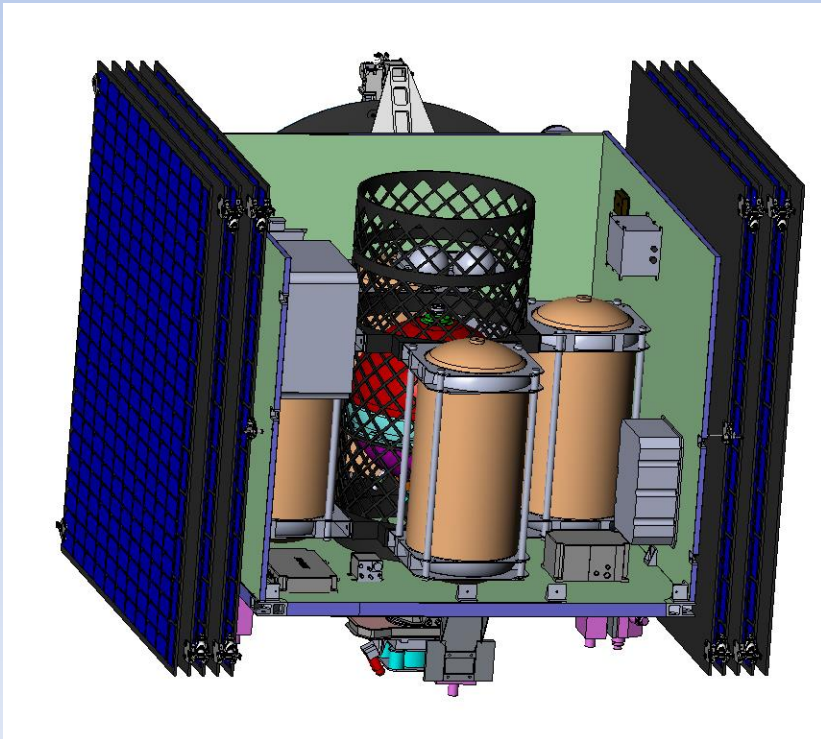
МКА - ЭРДУ

- Масса – 706,9 кг
- Запас ксенона – 280 кг
- Мощность солнечных батарей (1 а.е.) – 2120 Вт



Бортовые системы МКА-ЭРДУ ДУ на основе ЭРД СПД-100

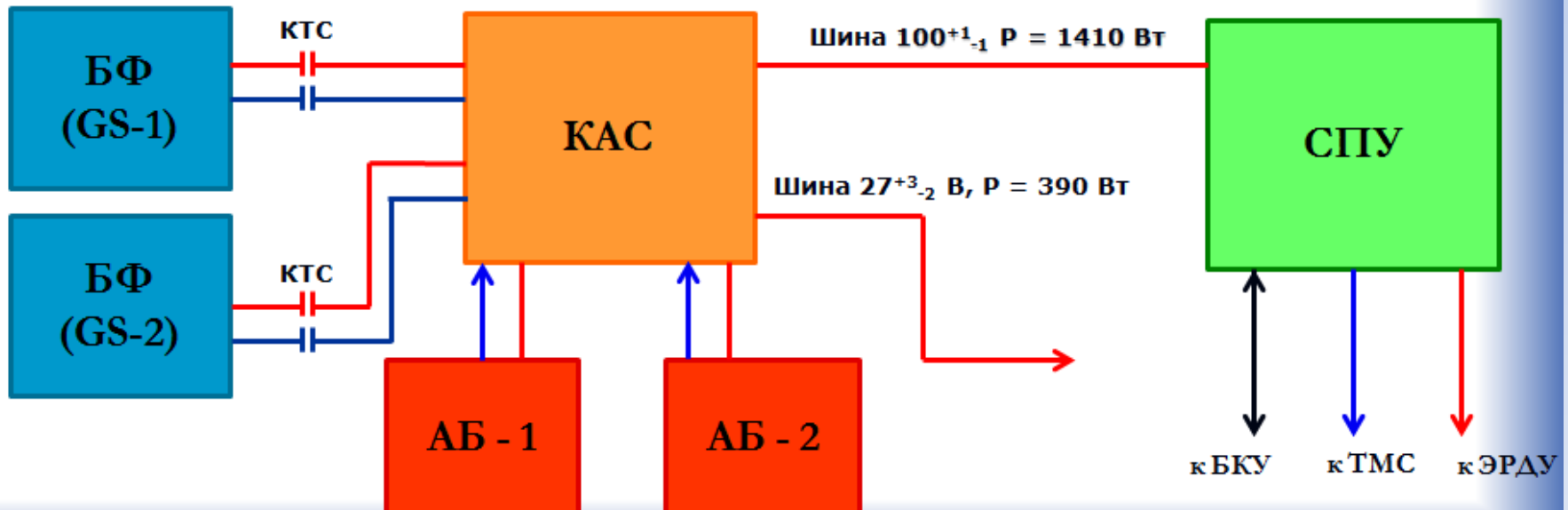
Мощность1350 Вт
Тяга.....73 мН
Удельный импульс..... 1600 с
Ресурс (не менее)..... 9 000 часов (СПД-100),
15000 часов (СПД-100ВУ)
Напряжение разряда.....300 В
Масса двигателя.....4,5 кг



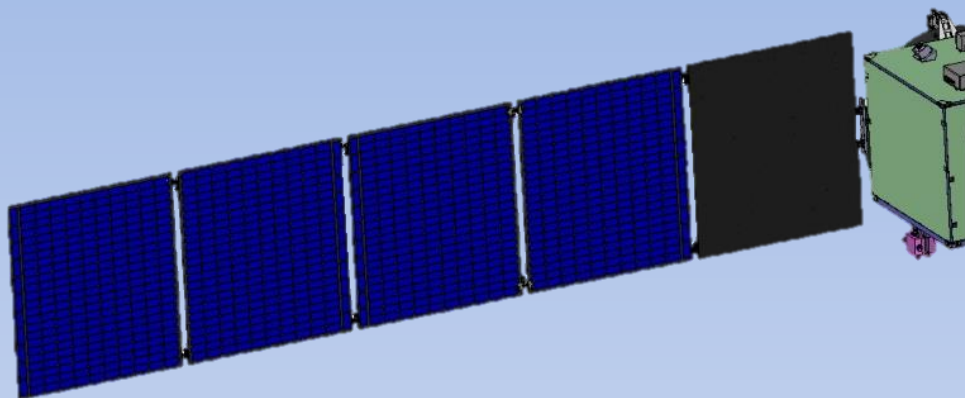
Бортовые системы МКА-ЭРДУ

Система электроснабжения

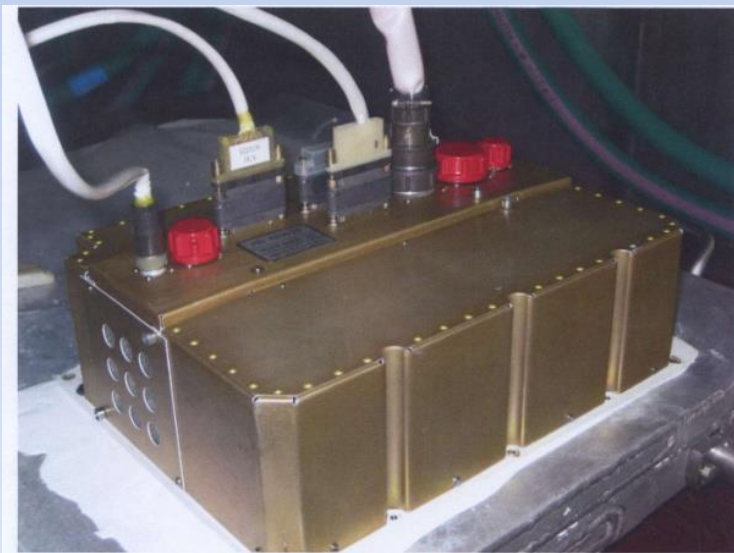
- Батарея фотоэлектрическая
- Батарея аккумуляторная – 2 шт.
- Комплекс автоматики и стабилизации
- Система преобразования и управления



Батарея фотоэлектрическая и аккумуляторная батарея БЛИ - 25



- Фотопреобразователи трехкаскадные из арсенида галлия на германиевых подложках типа 3G30A, КПД ~28%
- Выходная мощность в конце САС на расстоянии 1 а.е. - 2100 Вт
- Количество створок БФ – 8 шт.
- Общая площадь БФ – 13 м²
- Масса БС с приводом – 30 кг
- Производство преобразователей - ОАО «Сатурн»



- Номинальная разрядная емкость 25 А*ч
- Максимальный ток разряда 10 А
- Максимальный ток заряда 5 А
- Диапазон рабочего напряжения аккумулятора 16,2 – 24,6 В
- Количество циклов с глубиной разряда 3,6 А*ч - 8760
- Масса 2 АБ – 18 кг
- Производство ОАО «Сатурн»

Комплекс автоматики и стабилизации и система преобразования и управления для ЭРД серии СПД-100



КАС

- Шина 27^{+3}_{-2} В, Выходная мощность 390 Вт
- Шина 100^{+1}_{-1} Выходная мощность 1410 Вт
- Масса – 17 кг
- Производство ОАО НПЦ «Полюс» или ОАО «АВЭКС»



СПУ

- Напряжение питания 100^{+1}_{-1} В
- Выходная мощность 1350 Вт
- Масса – 12 кг
- Производство ОАО НПЦ «Полюс» или ОАО «АВЭКС»

Бортовые системы МКА-ЭРДУ

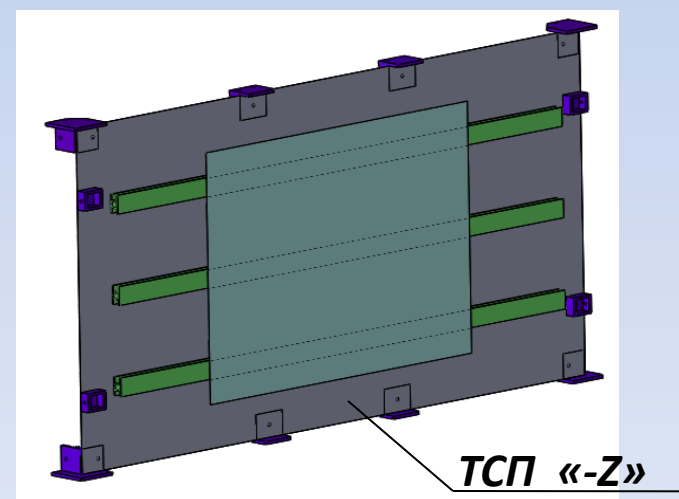
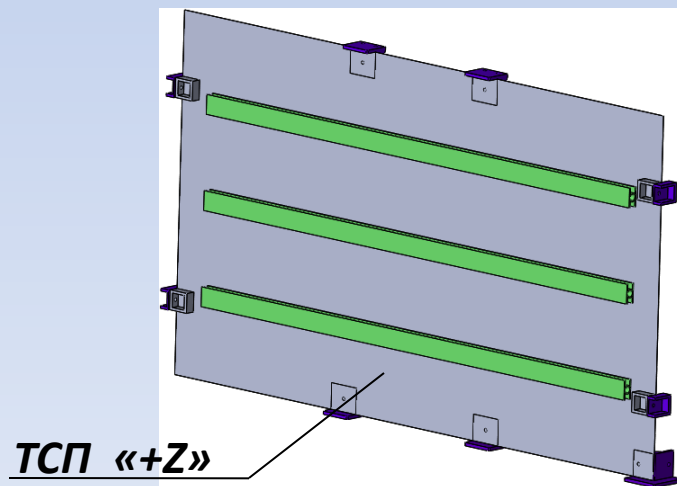
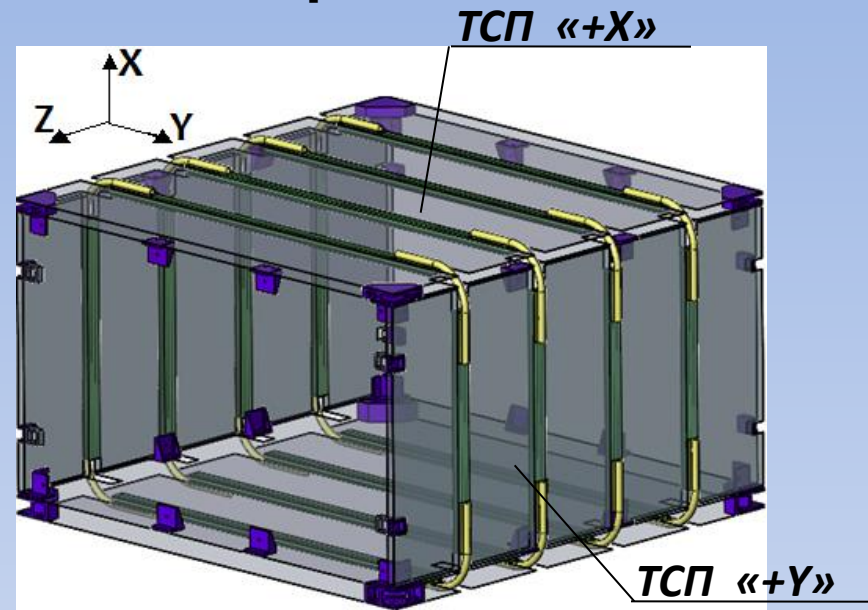
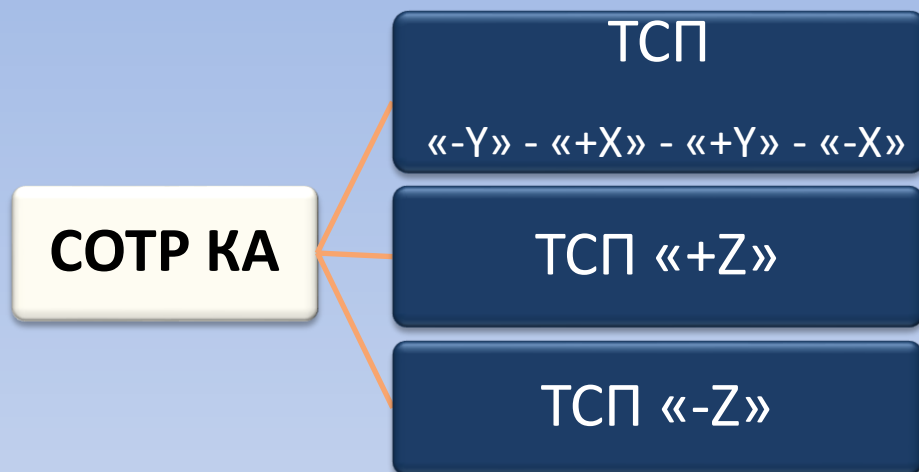
Бортовой комплекс управления

Вариант			Общая масса, кг	Общее энергопотребление, Вт
А	БЦВМ	БИНК	30,9	107
	БУ, БПТДУ, АСТРОЛ12, 347К, БИБ6, ДМ-2-50			
В	БЦВМ	ЦВМ25	33,5	88,5
	БУ, БПТДУ, АСТРОЛ12, 347К, БИБ6, ДМ-2-50			
С	БЦВМ	ЦБК	38,4	110
	БУ, БПТДУ, 348К, 347К, БИБ6, ДМ-2-50			
D	БЦВМ	С-1	48,1	115
	БУ, БПТДУ, 348К, 347К, БИБ6, ДМ-2-50			



Бортовые системы МКА-ЭРДУ

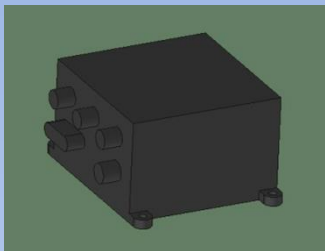
Средства обеспечения теплового режима



Укрупненная массовая сводка МКА-ЭРДУ

№	Наименование	Масса, кг
1	Комплекс научной аппаратуры	39
2	Бортовой комплекс управления	30,9
3	Бортовой радиокомплекс и антенно-фидерная система	10,1
4	Система электроснабжения	95
5	Двигательная установка (включая жидк. ДУ)	163,9
6	Рабочее тело (ксенон)	280
7	СОТР (датчики, нагреватели, ЭВТИ, угловые тепловые трубы)	7
8	Бортовая кабельная сеть	11
9	Конструкция	55
10	Кронштейны, мелкие детали	5
11	Резерв	10
	Итого:	706,9

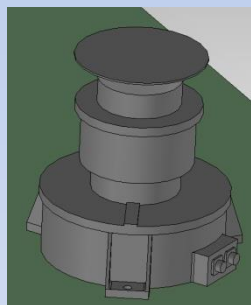
Возможные приборы комплекса научной аппаратуры МКА-ЭРДУ



-Инфракрасный спектрометр (ЛИС), прибор предназначен для дистанционного изучения в ИК диапазоне реголита (поиск воды в имплантированной или связанной форме и минералогического состава)

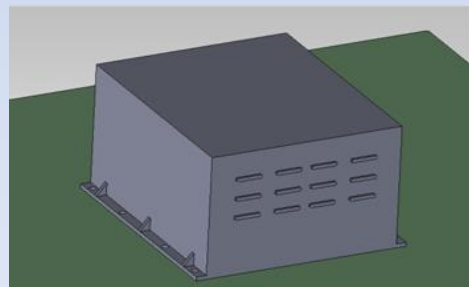


-Гамма спектрометр, прибор предназначен для измерения дифференциальных энергетических спектров жесткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий 0,02...10,0 МэВ. Потребление блока не более 8 Вт, масса 7 кг.



- МСУ, прибор предназначен для картирования отдельных участков поверхности небесных тел, топографической привязки орбитальных измерений. Потребление блока не более 8 Вт, масса 7 кг.

- Пенетратор, масса 20 кг.



- Система управления сбора и передачи научной информации.

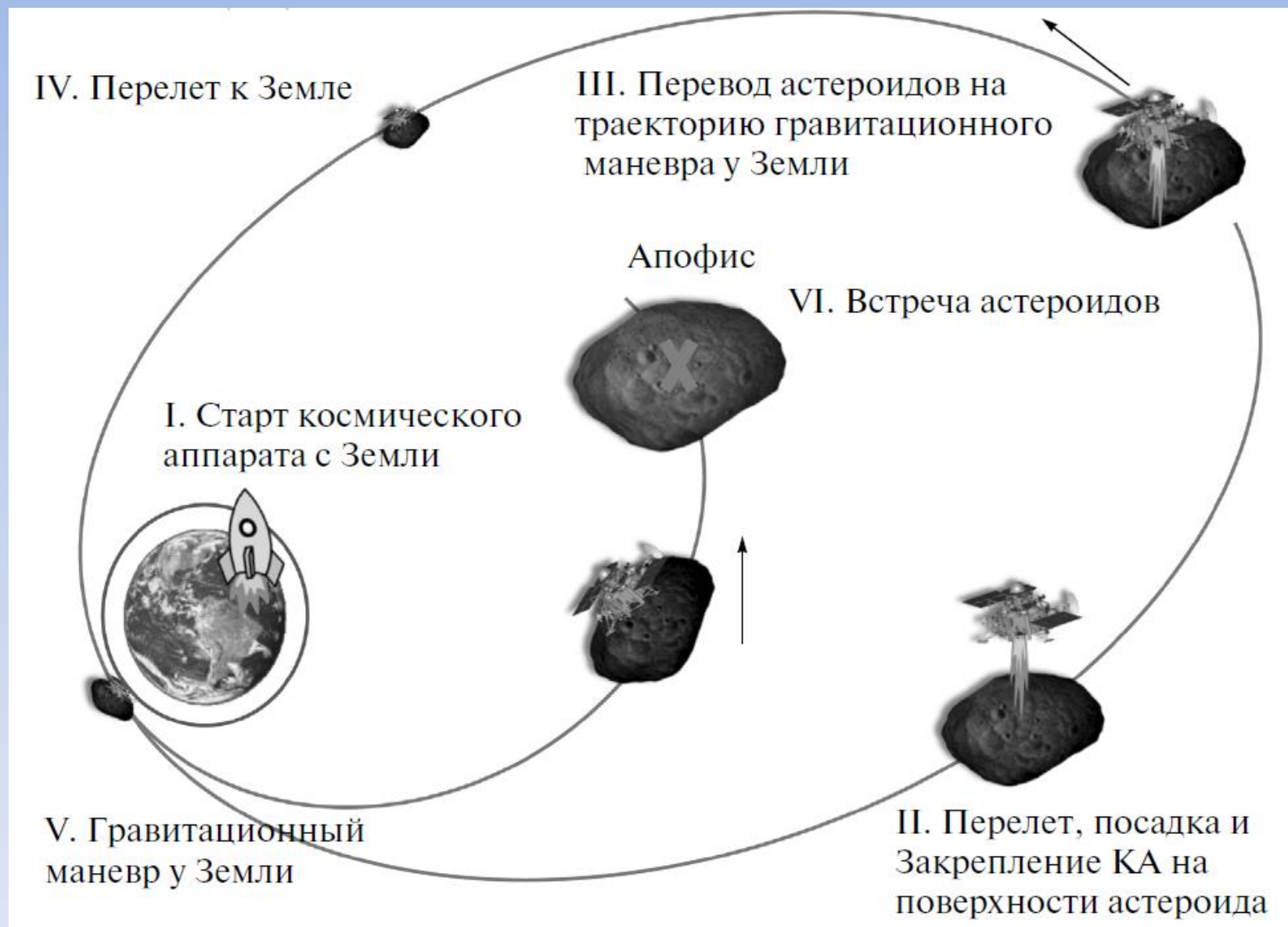
- 1) Сбор и хранение научной информации;
- 2) Управление научными приборами (с интерфейсным сопряжением);

Масса блока 4,8 кг, потребление не более 7 Вт.

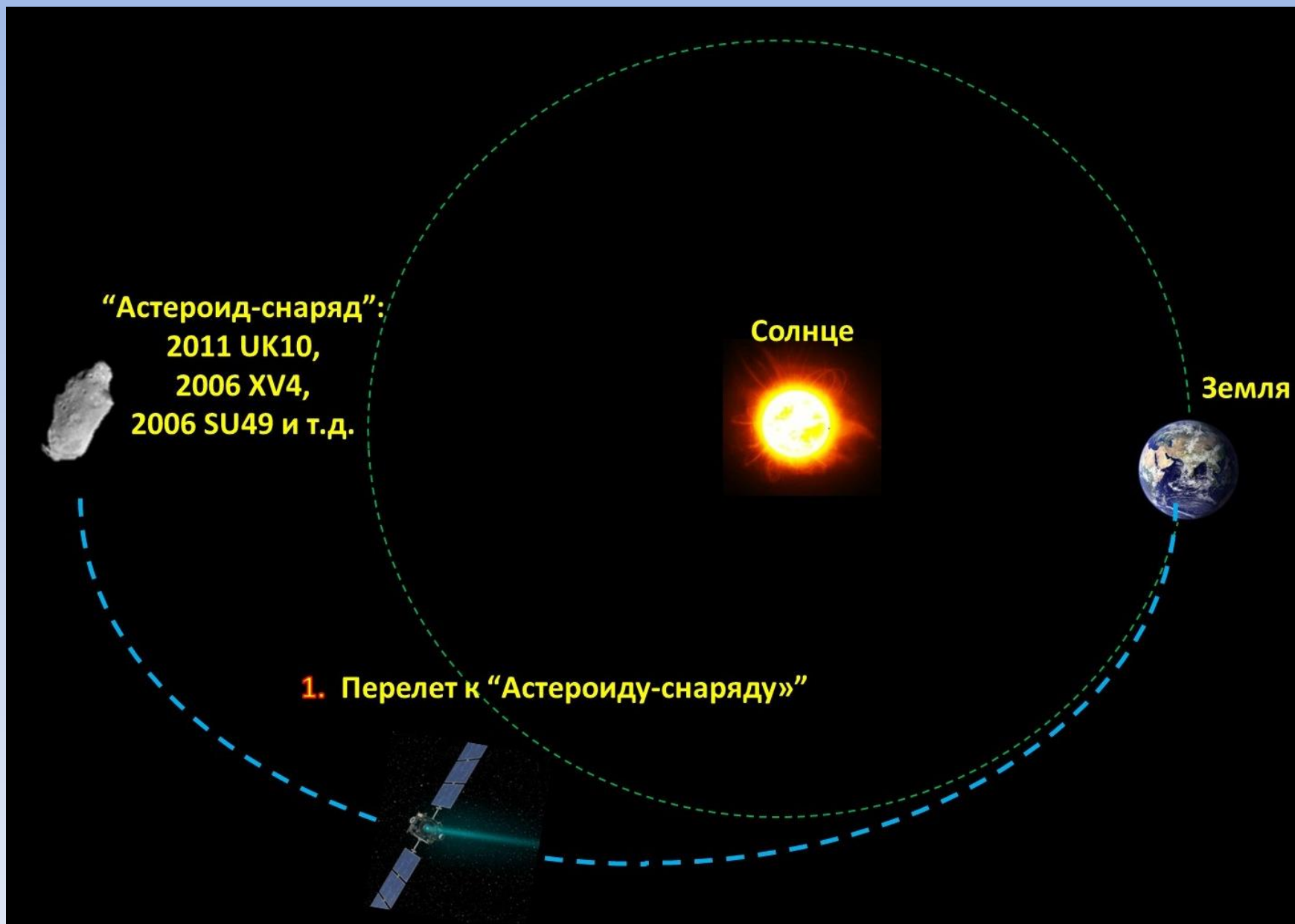
Актуальные задачи для МКА-ЭРДУ

- Исследования астероидов с помощью комплекса научной аппаратуры, исследование космического пространства на этапе перелета;**
- Уточнение параметров движения опасных астероидов;**
- Проверка концепции отклонения опасных астероидов;**
- Доставка к астероидам долгоживущих станций и микроспутников;**
- Отработка технологий для реализации длительных перелетов автоматических КА с ЭРДУ.**

Базовая концепция отклонения опасных астероидов (ИКИ РАН)



Проверка базовой концепции отклонения опасных астероидов



Проверка базовой концепции отклонения опасных астероидов



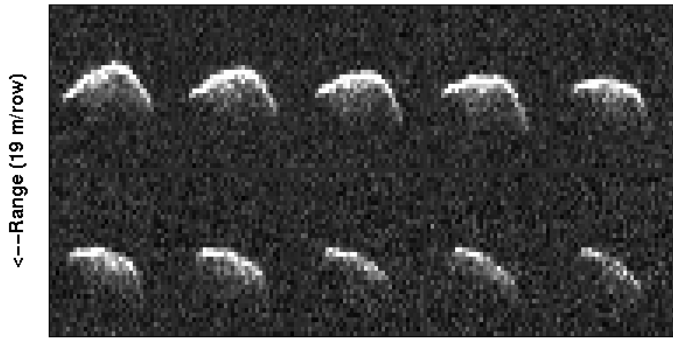
Проверка базовой концепции отклонения опасных астероидов



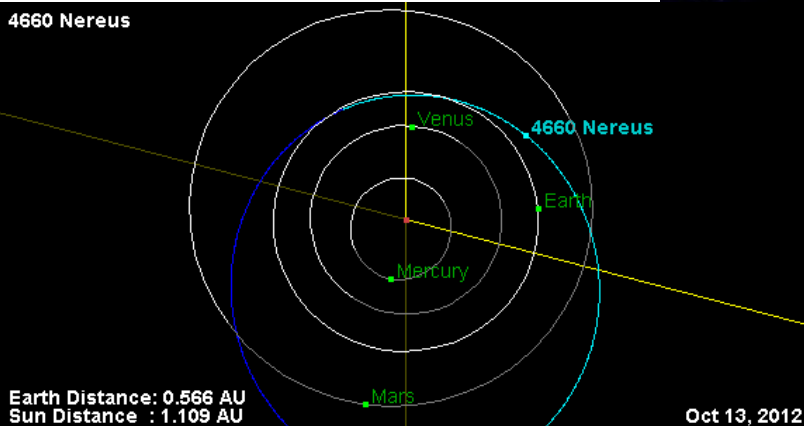
Возможные цели миссии МКА-ЭРДУ

1982 DB “Нерей”

Goldstone images of 4660 Nereus: 2002 January 25, 16:37:12–18:55:20 UTC



4660 Nereus

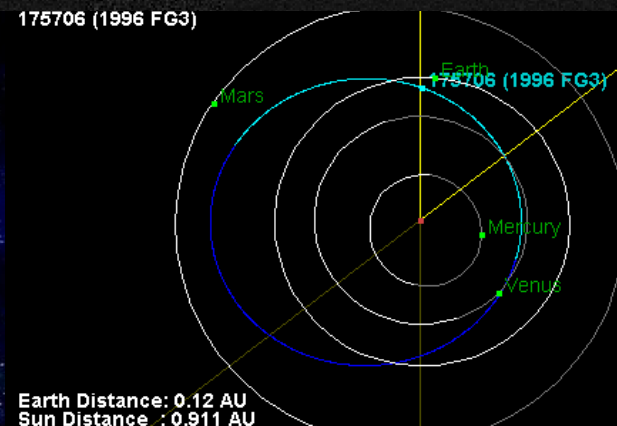


- Относится к группе Аполлонов
- Перигелий 0,953 а.е., Афелий 2,026 а.е., Наклонение 1,424°
- Диаметр от 0,7 до 1,5 км
- Рассматривался как цель для миссий: NEAR Shoemaker и Hayabusa

1996 FG3



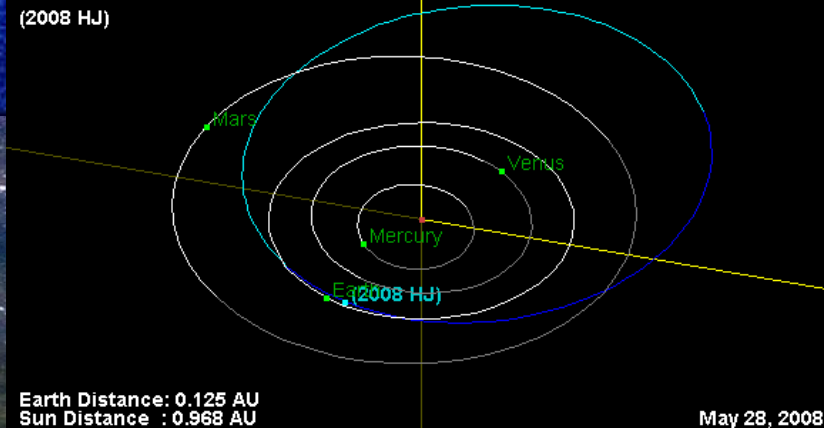
Nov 06 Nov 17 Nov 18 Nov 20 Nov 21 Nov 22
175706 (1996 FG3)



- Двойной, относится к группе Аполлонов
- Перигелий 0,685 а.е., Афелий 1,423 а.е., Наклонение 2°
- Диаметр ~1,8 км
- Рассматривался как цель для миссии MarcoPolo-R

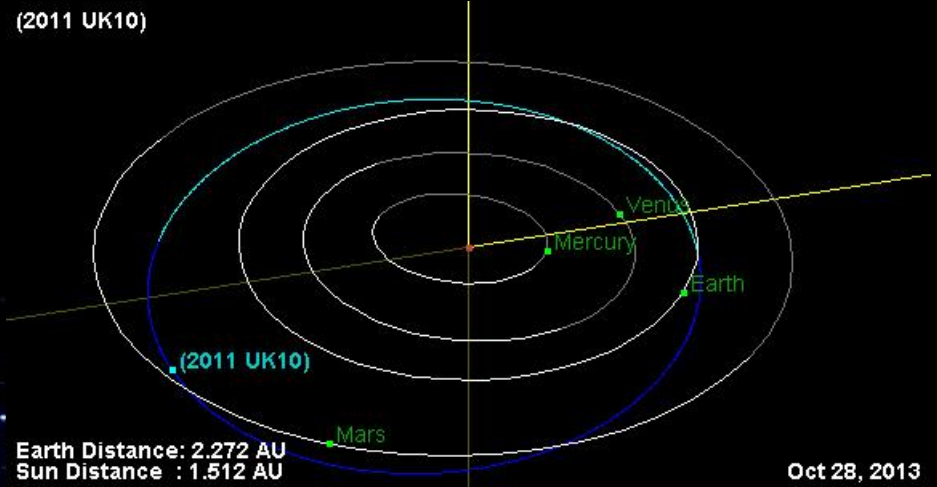
Возможные цели миссии МКА-ЭРДУ

2008 HJ



- Относится к группе Аполлонов
- Перигелий 0,968 а.е., Афелий 2,296 а.е., Наклонение 0,927°
- Размер 12 × 24 м
- Особенность – период вращения 42 с (самый быстрый из известных астероидов)

2011 UK10



- Относится к группе Аполлонов
- Диаметр ~27 м
- Рассматривается как астероид-снаряд для отклонения астероида «Апофис»

Проектно-баллистический анализ миссии МКА-ЭРДУ

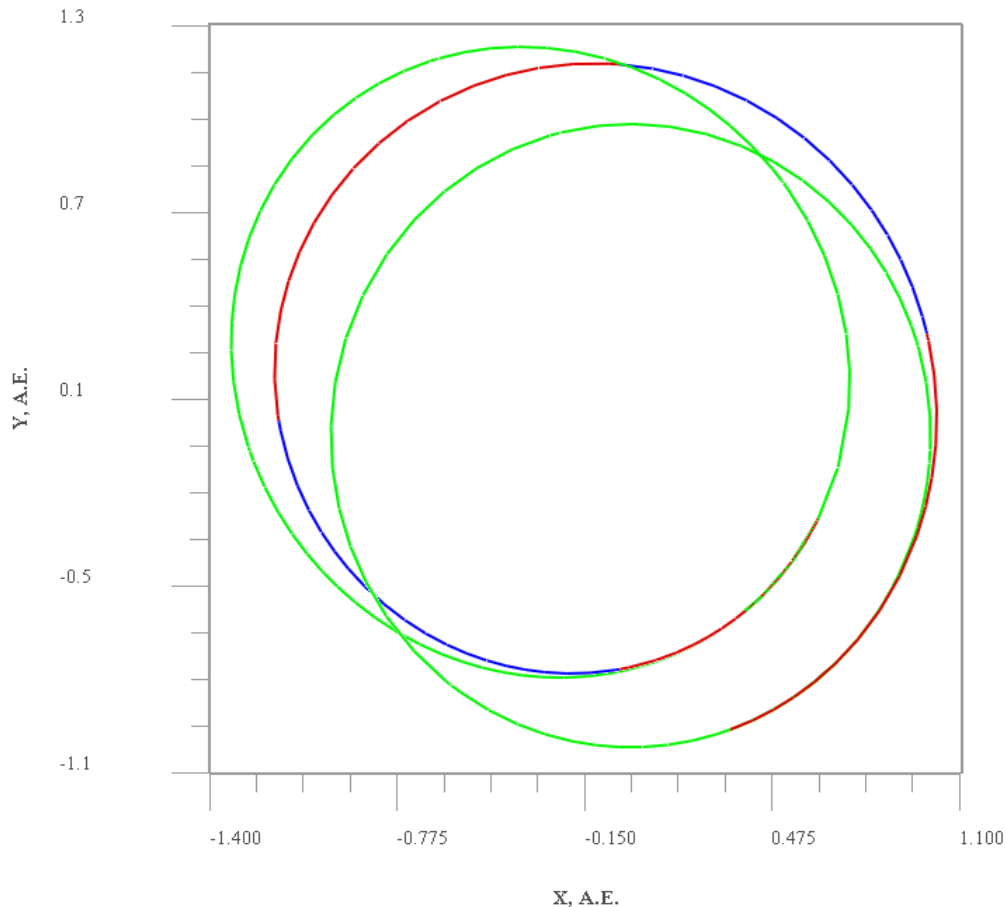
Исходные данные:

Выведение на орбиту Земли	РН «Рокот» с РБ «Бриз-КМ»
Начальная масса КА:	474.768 кг
Начальная орбита:	$H_a = 10000 \text{ км}, H_p = 2000 \text{ км}, i = 82.5^\circ$
Удельный импульс ЭРДУ (СПД-100ВУ):	1600 с
Тяга ЭРДУ (СПД-100ВУ):	89.24 мН

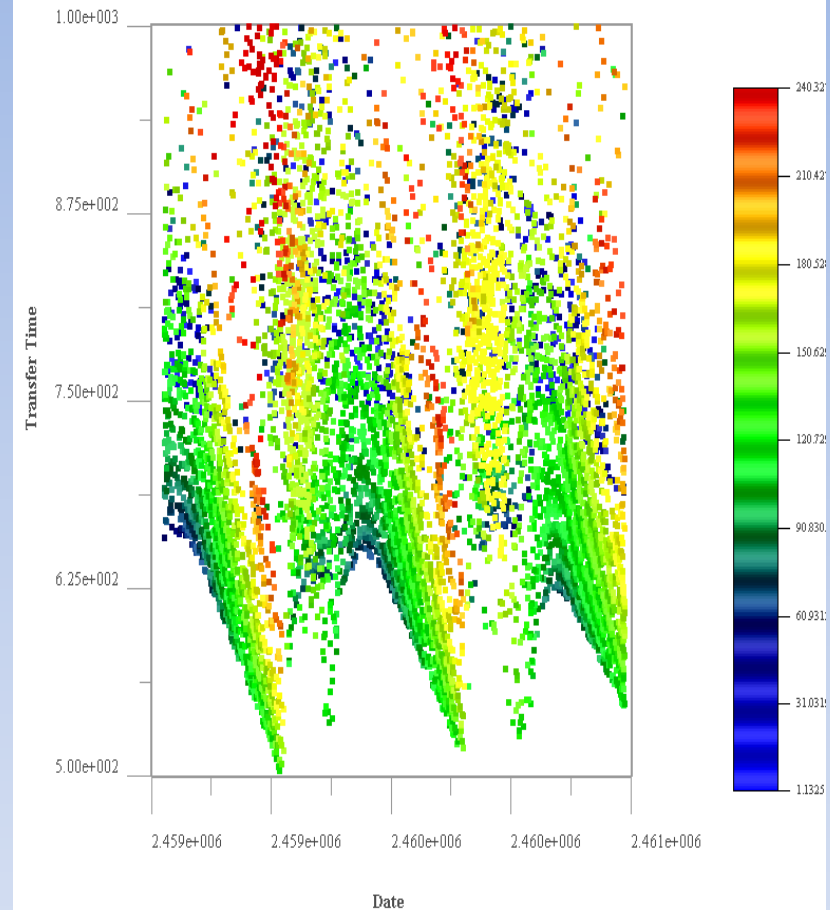
Результаты расчета геоцентрического участка набора параболической скорости (тангенциальная раскрутка):

Продолжительность маневра:	278.56508 суток
Характеристическая скорость маневра:	5.33689 км/с
Масса КА в момент набора параболической скорости:	337.88112 кг
Планетоцентрическое удаление конечной точки геоцентрического участка:	1090656.48385 км
Число витков траектории раскрутки:	534.81527

Проектно-баллистический анализ миссии МКА-ЭРДУ



Проекция траектории гелиоцентрического участка перелета МКА к астероиду 1996 FG3 на плоскость эклиптики. Красным цветом показаны активные участки движения, синим – пассивные, зеленым цветом показаны орбиты Земли (круговая орбита) и астероида.



Конечная масса КА в зависимости от даты старта и времени гелиоцентрического перелета при полете к астероиду 2008 HJ

Проектно-баллистический анализ миссии МКА-ЭРДУ

Результаты проектно-баллистического анализа перелета к астероиду 1982 DB

Юлианская дата выхода КА из грависферы Земли	Время гелиоцент рического перелета, сутки	Суммарное время межпланетн ого перелета (вместе с раскруткой), сутки	Конечная масса КА, кг	Масса рабочего тела ЭРДУ, кг	Моторное время ЭРДУ, ч
2459411.21	300.7064	579.2715	220.3571	254.4109	12425.51
2459074.54	570.7536	849.3187	226.0593	248.7087	12147.01
2459019.93	644.6763	923.2414	231.7214	243.0466	11870.48
2460215.17	680.9968	959.5619	235.2001	239.5679	11700.57

Результаты проектно-баллистического анализа перелета к астероиду 1996 FG3

Юлианская дата выхода КА из грависферы Земли	Время гелиоцент рического перелета, сутки	Суммарное время межпланетн ого перелета (вместе с раскруткой), сутки	Конечная масса КА, кг	Масса рабочего тела ЭРДУ, кг	Моторное время ЭРДУ, ч
2460452.13	301.3177	579.8827	218.3608	256.4072	12523.01
2460448.99	314.5966	593.1617	220.6204	254.1476	12412.65
2460420.95	339.8018	618.3669	225.0316	249.7364	12197.21
2460391.04	384.0148	662.5799	230.0964	244.6716	11949.84
2460550.75	631.4789	910.044	235.4394	239.3286	11688.89

Проектно-баллистический анализ миссии МКА-ЭРДУ

Результаты проектно-баллистического анализа перелета к астероиду 2008 НЈ

Юлианская дата выхода КА из грависферы Земли	Время гелиоцентр ического перелета, сутки	Суммарное время межпланетного перелета (вместе с раскруткой), сутки	Конечная масса КА, кг	Масса рабочего тела ЭРДУ, кг	Моторное время ЭРДУ, ч
2459322.56	576.6386	855.2037	201.0341	273.7339	13369.25
2459292.49	617.4158	895.9808	208.7839	265.9841	12990.75
2459293.13	635.0835	913.6486	215.7927	258.9753	12648.44
2459214.93	762.6071	1041.172	222.6815	252.0865	12311.99
2459293.59	981.3763	1259.941	225.3786	249.3894	12180.26

Результаты проектно-баллистического анализа перелета к астероиду 2011 UK10

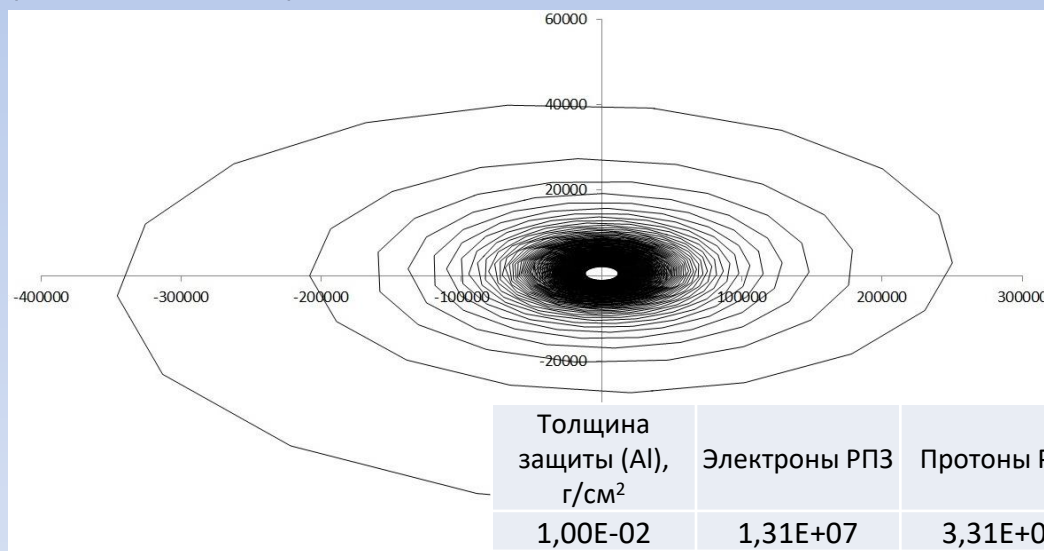
Юлианская дата выхода КА из грависферы Земли	Время гелиоцентр ического перелета, сутки	Суммарное время межпланетного перелета (вместе с раскруткой), сутки	Конечная масса КА, кг	Масса рабочего тела ЭРДУ, кг	Моторное время ЭРДУ, ч
2459565.02	301.7844	580.3494	219.2843	255.4837	12477.91
2459776.45	416.2771	694.8422	222.3203	252.4477	12329.63
2459768.3	432.6596	711.2247	226.7281	248.0399	12114.35
2459733.48	525.9826	804.5477	230.0122	244.7558	11953.95

Радиационная обстановка на борту МКА-ЭРДУ (перелет к астероиду 1996 FG3)

Исходные данные для расчета радиационных условий функционирования

Параметр	Значение
Высота в апогее, км	10000
Высота в перигее, км	2000
Наклонение, град	82,5
Геоцентрический участок траектории, суток	296
Гелиоцентрический участок траектории, суток	400
Дата старта	11 Мая 2023 02:09:12 UTC

Поглощенные дозы за защитными экранами на геоцентрическом участке траектории (в геометрии 4π), рад

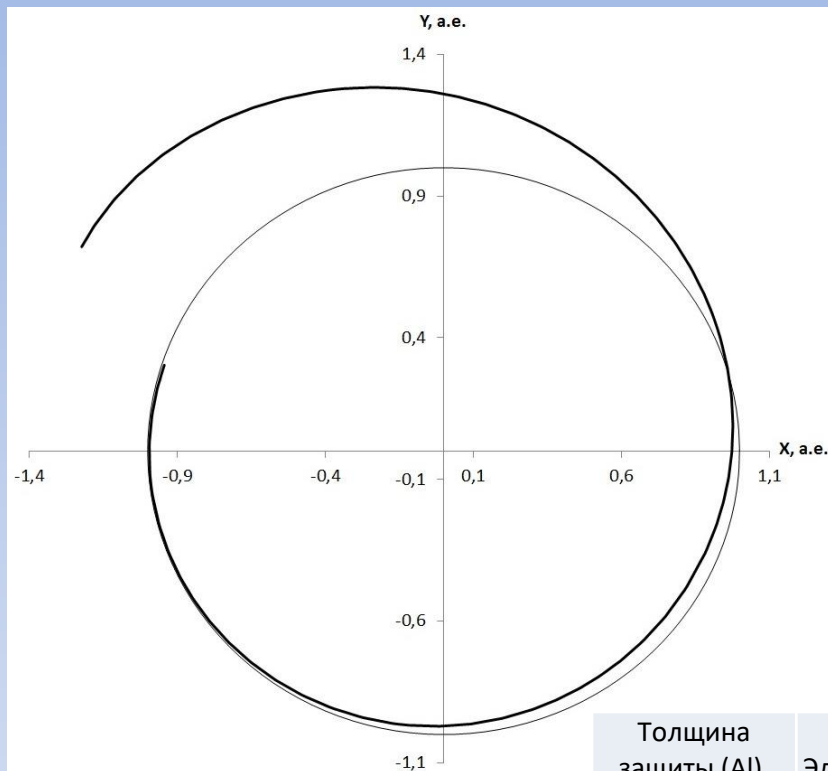


Расчет воздействия ионизирующих излучений космического пространства выполнен с помощью программного комплекса «FD_ORBIT2» (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»).

Толщина защиты (Al), г/см ²	Электроны РПЗ	Протоны РПЗ	СКЛ	ГКЛ	Суммарная доза
1,00E-02	1,31E+07	3,31E+07	1,50E+05	1,05E+01	4,63E+07
3,00E-02	5,37E+06	3,40E+06	5,96E+04	1,03E+01	8,83E+06
1,00E-01	1,30E+06	4,13E+05	1,94E+04	1,00E+01	1,73E+06
3,20E-01	2,21E+05	4,30E+04	5,70E+03	9,40E+00	2,70E+05
1,00E+00	1,34E+04	3,11E+03	1,55E+03	8,54E+00	1,81E+04
3,00E+00	1,24E+02	3,65E+02	4,25E+02	7,54E+00	9,21E+02
1,00E+01	4,11E+01	7,35E+01	1,02E+02	6,43E+00	2,23E+02
3,16E+01	6,28E+00	1,14E+01	2,59E+01	5,36E+00	4,89E+01

Радиационная обстановка на борту МКА-ЭРДУ

Поглощенные дозы за защитными экранами на гелиоцентрическом участке траектории (в геометрии 4π), рад

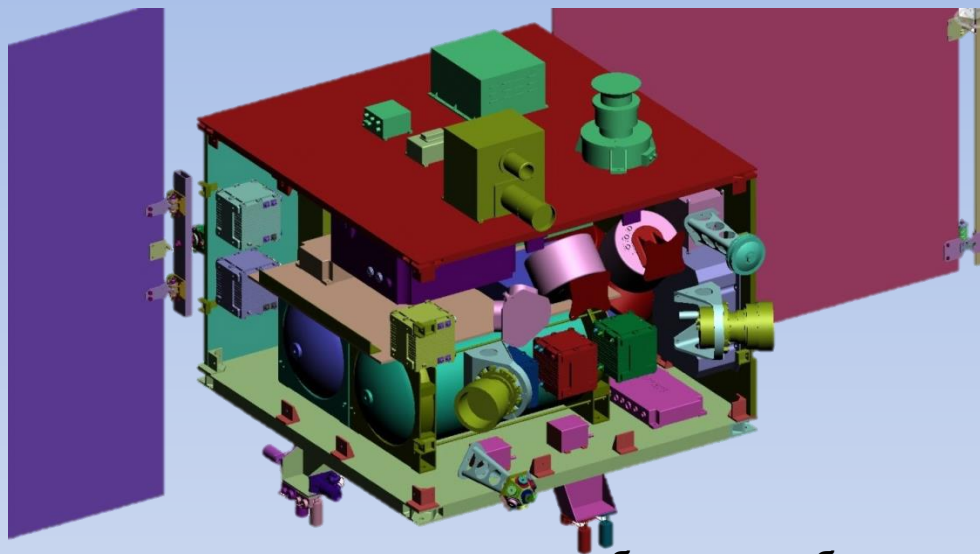


Расчет воздействия ионизирующих излучений космического пространства выполнен с помощью программного комплекса «FD_ORBIT2» (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»).

Толщина защиты (Al), г/см ²	Электроны РПЗ	Протоны РПЗ	СКЛ	ГКЛ	Суммарная доза
1,00E-02	-	-	1,45E+05	6,18E+00	1,45E+05
3,00E-02	-	-	5,75E+04	4,31E+00	5,75E+04
1,00E-01	-	-	1,88E+04	3,83E+00	1,88E+04
3,20E-01	-	-	5,40E+03	3,72E+00	5,40E+03
1,00E+00	-	-	1,41E+03	3,84E+00	1,41E+03
3,00E+00	-	-	3,67E+02	3,74E+00	3,71E+02
1,00E+01	-	-	7,99E+01	3,46E+00	8,34E+01
3,16E+01	-	-	1,62E+01	2,57E+00	1,88E+01

Радиационная обстановка на борту МКА-ЭРДУ

Расчеты локальных поглощенных доз проводился с учетом пространственного расположения бортового оборудования в корпусе КА с помощью программно-математического обеспечения «LocalDose&SEE» (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»).



Локальные поглощенные дозы в местах расположения бортового оборудования КА с маршевой ЭРДУ

	Расположение на КА	Суммарная локальная поглощенная доза, не более, рад
1	Место расположения звездных датчиков и научного оборудования на внешней стороне сотопанелей	$1,4 \cdot 10^6$
2	Место расположение бортового информационного вычислительного комплекса	$5,5 \cdot 10^4$
3	Место расположения приборов системы электроснабжения	$1,6 \cdot 10^4$
4	Место расположения бортового радиокомплекса	$8,4 \cdot 10^4$

Результаты проектно-баллистического анализа перелета МКА к околоземному астероиду 1996 FG3 при использовании РН "Союз - 2" этапа 16 и РБ "Фрегат"

Исходные данные:

Стартовая масса КА:	707 кг
Удельный импульс ЭРДУ (СПД-100ВУ):	1600 с
Тяга ЭРДУ (СПД-100ВУ):	89.24 мН
Масса ГБ РН на опорной ОИСЗ ($H = 200$ км, $i = 51.7^\circ$)	8200 кг
Конечная масса РБ:	930 кг
Удельный импульс маршевой ДУ РБ:	333,2 с

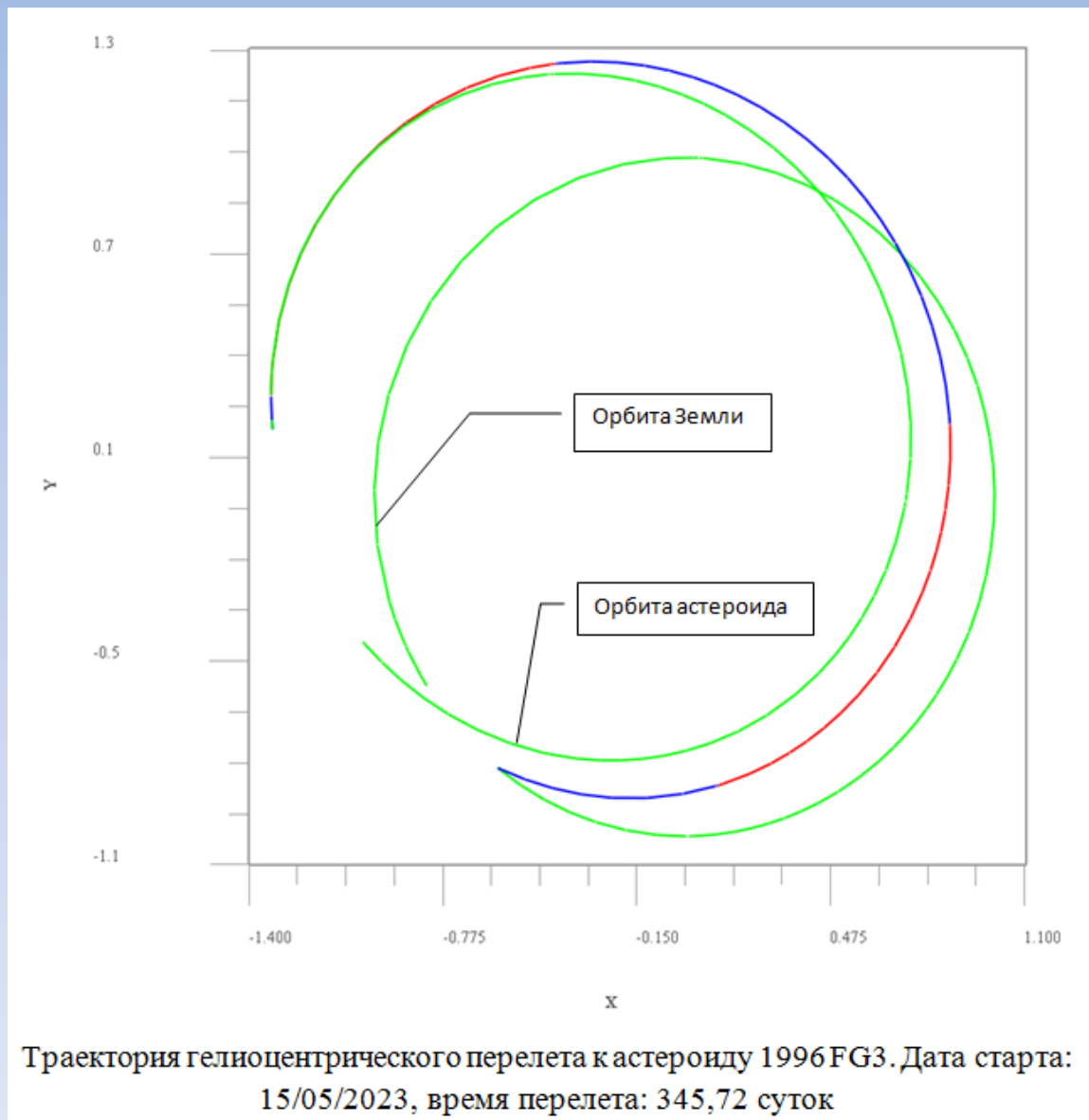
Расчет геоцентрического участка:

Модуль гиперболического избытка скорости, при котором обеспечивается выведение КА с массой 707 кг на отлетную траекторию: 7,005 км/с

Результаты проектно-баллистического анализа перелета к астероиду 1996 FG3

Дата старта	Время перелета, сутки	Конечная масса КА, кг	Масса рабочего тела ЭРДУ, кг	Моторное время ЭРДУ, ч
19/05/2023	314.6816148	613.814	93.18603	4551.236
15/05/2023	345.7207129	615.0016	91.9984	4493.232
03/06/2023	479.0849001	621.0934	85.90659	4195.706
06/06/2024	630.2031196	626.5822	80.41782	3927.633

Результаты проектно-баллистического анализа перелета МКА к околоземному астероиду 1996 FG3 при использовании РН "Союз - 2" этапа 16 и РБ "Фрегат"



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!