

Институт космических исследований Российской академии наук

ИКИ

**ОПТИКО-ФИЗИЧЕСКИЙ ОТДЕЛ**

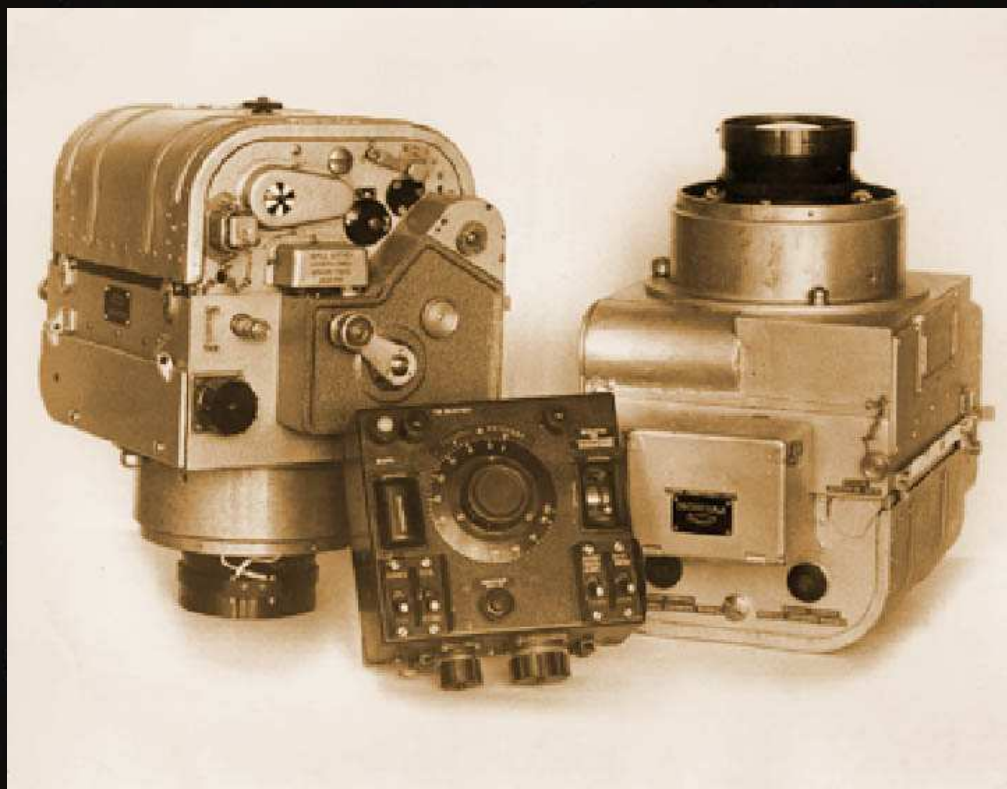
**Астронавигационные  
приборы,  
спутниковые и самолетные  
комплексы  
дистанционного  
зондирования Земли**

Г.А. Аванесов

Семейство  
звездных приборов  
БОКЗ

# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Наша история



Первые летные испытания фотосистемы, используемой для определения параметров звездной ориентации по изображениям звездного неба, прошли в 1971 году с борта орбитальной станции «Салют»

Впоследствии вместо модуля с фотопленкой был разработан оптический канал ПЗС-структурой

# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Наша история

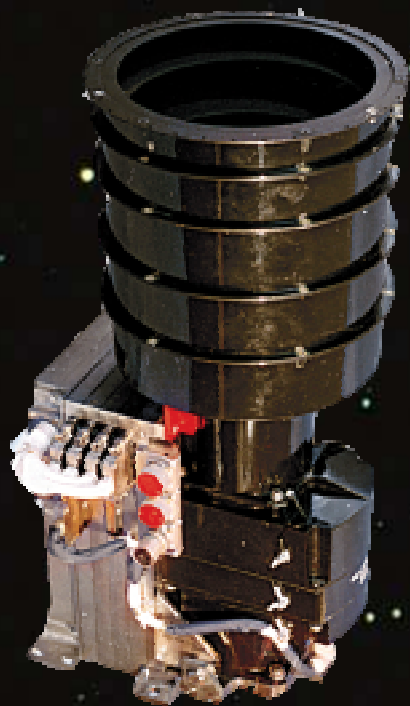
В 1989 году завершена разработка системы «Астро», выполненная в кооперации с компанией Карл Цейсс Йена



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Современный статус

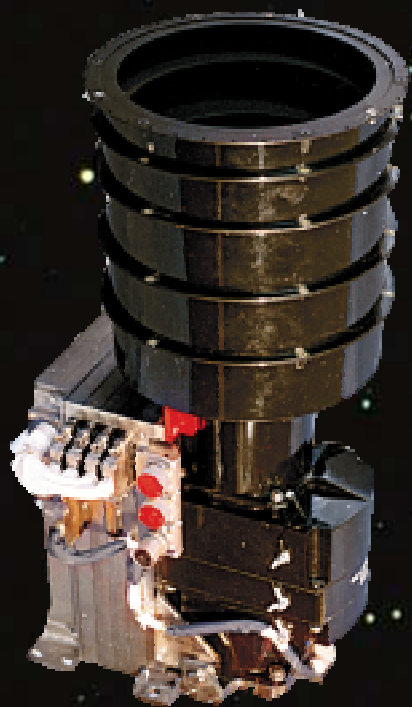
- ✓ 11 приборов БОКЗ в различных модификациях работают на 5 российских КА
- ✓ С 1999 года на околоземные орбиты на КА различного типа были выведены 19 звездных приборов семейства БОКЗ
- ✓ 2 прибора БОКЗ работают на КА «Ямал» с 1999 г.
- ✓ 3 прибора БОКЗ работают на МКС с 2000 г.
- ✓ 6 приборов установлены на 3-х российских КА, запуск которых планируется в ближайшее время



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Современный статус

- ✓ До 2008 года планируется подготовить по действующим контрактам еще около 40 приборов серии БОКЗ в разных модификациях.
- ✓ Продолжаются работы по модификации звездных приборов, в том числе в интересах проекта «Фобос-Грунт» – БОКЗ-МФ.



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Модельный ряд



“Ямал-100”

4,5 кг / 11 Вт



МКС

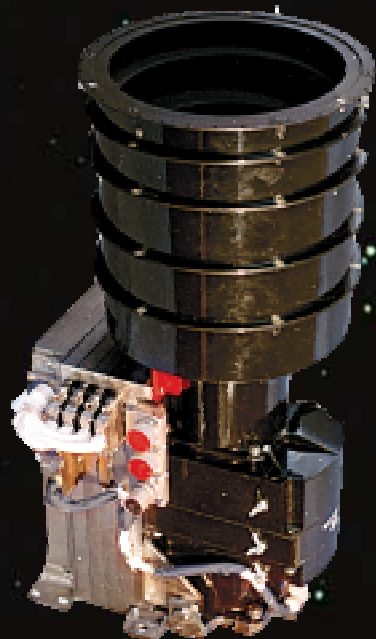
4,0 кг / 11 Вт



“Ямал-200”



“Ресурс-ДК/  
Космос-2410/  
Космос-2420”



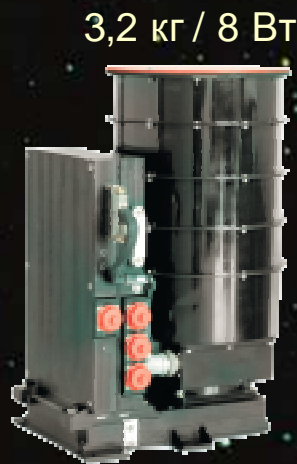
БОКЗ

1998



БОКЗ-М

2002



3,2 кг / 8 Вт

БОКЗ-М/24

2004



2,0 кг / 8 Вт

БОКЗ-2М

2004



2,0 кг / 8 Вт

БОКЗ-МФ

2006



0,6 кг / 3 Вт

БОКЗ-3

2008

Штатные серийные приборы

Завершенные разработки

Следующее поколение –  
ведется разработка

# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Основные характеристики

Модификация	БОКЗ	БОКЗ-М	БОКЗ-М24	БОКЗ-2М	БОКЗ-МФ	БОКЗ-3*
Масса, кг	4,5	4,0	3,2	2,0	2,0	0,6
Энергопотребление, Вт	11,2	11,2	10,0	8,0	8,0	3,0
Габариты, см	45x23x20	37x23x23	30x23x23	30x20x20	20x20x20	17x10x10
Допустимая скорость углового движения КА, ʎ сек	0,16	0,16	1,5	1,0	1,0	> 2,0
Время первичного обнаружения без априорной информации, сек	30	30	30	6	6	6
Частота обновления информации об ориентации, Гц	0,3	0,3	0,3	0,5	1	10
Выходные данные	Кватернион ориентации					
Точность $\sigma_{x,y}/\sigma_z$ , угл.сек	2 / 20	2 / 20	5 / 12	5 / 12	5 / 12	5 / 12

Радиационная стойкость компонентов и материалов позволяет применять приборы на околоземных, геостационарных, высокоэллиптических и межпланетных орбитах.

\* Предварительно



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Результаты обработки

Выполнено наложение 3 изображений звездного неба, полученных звездными приборами с интервалом 32 с каждое.

Очевидно следующее:

- изменения в ориентации через 64 с;
- действительная чувствительность приборов

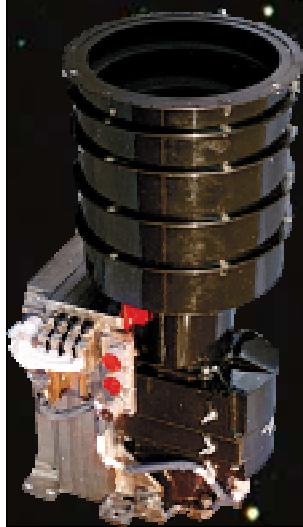
№	Зв. Вел-на	Спектр. класс
1	2.0	A0
2	5.7	A2
3	6.4	B3
4	6.2	B5
5	7.4	K2
6	9.0	—
7	10.0	—



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Рабочие характеристики

- ✓ Гарантированное время активного существования на ГЕО 15 лет
- ✓ Температура посадочного места  $-15^{\circ}\text{C} - +45^{\circ}\text{C}$
- ✓ Число циклов вкл. / выкл. 10 000
- ✓ Обмен данными поддерживается через резервированный интерфейс MIL STD 1553B



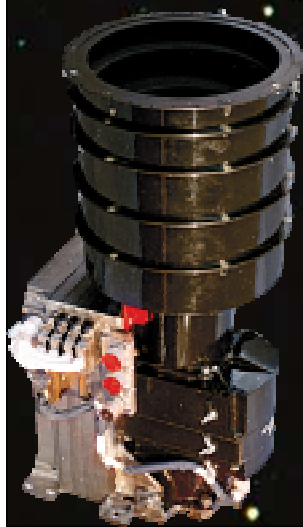
# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Принцип работы

Специализированная камера, включающая

- ✓ ПЗС-матрицу и
- ✓ мощный сигнальный процессор со
  - встроенным каталогом и
  - ПО для он-лайн обработки данных

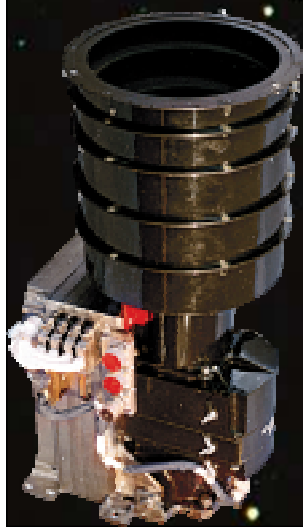
выполняет съемки произвольного участка  
небесной сферы



# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Принцип работы

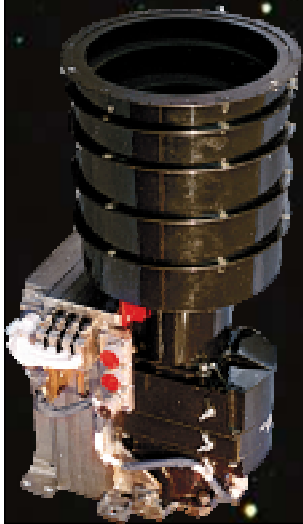
- ✓ Параметры инерциальной ориентации КА определяются по результатам геометрического анализа регистрируемых и обрабатываемых изображений произвольных участков звездного неба
- ✓ Встроенный процессор
  - «различает» изображения звезд и шум различного вида;
  - определяет энергетические центры регистрируемых изображений звезд;
  - идентифицирует звезды в бортовом звездном каталоге;
  - вычисляет параметры ориентации КА с учетом собственного движения звезд и нутации



# Семейство звездных приборов БОКЗ

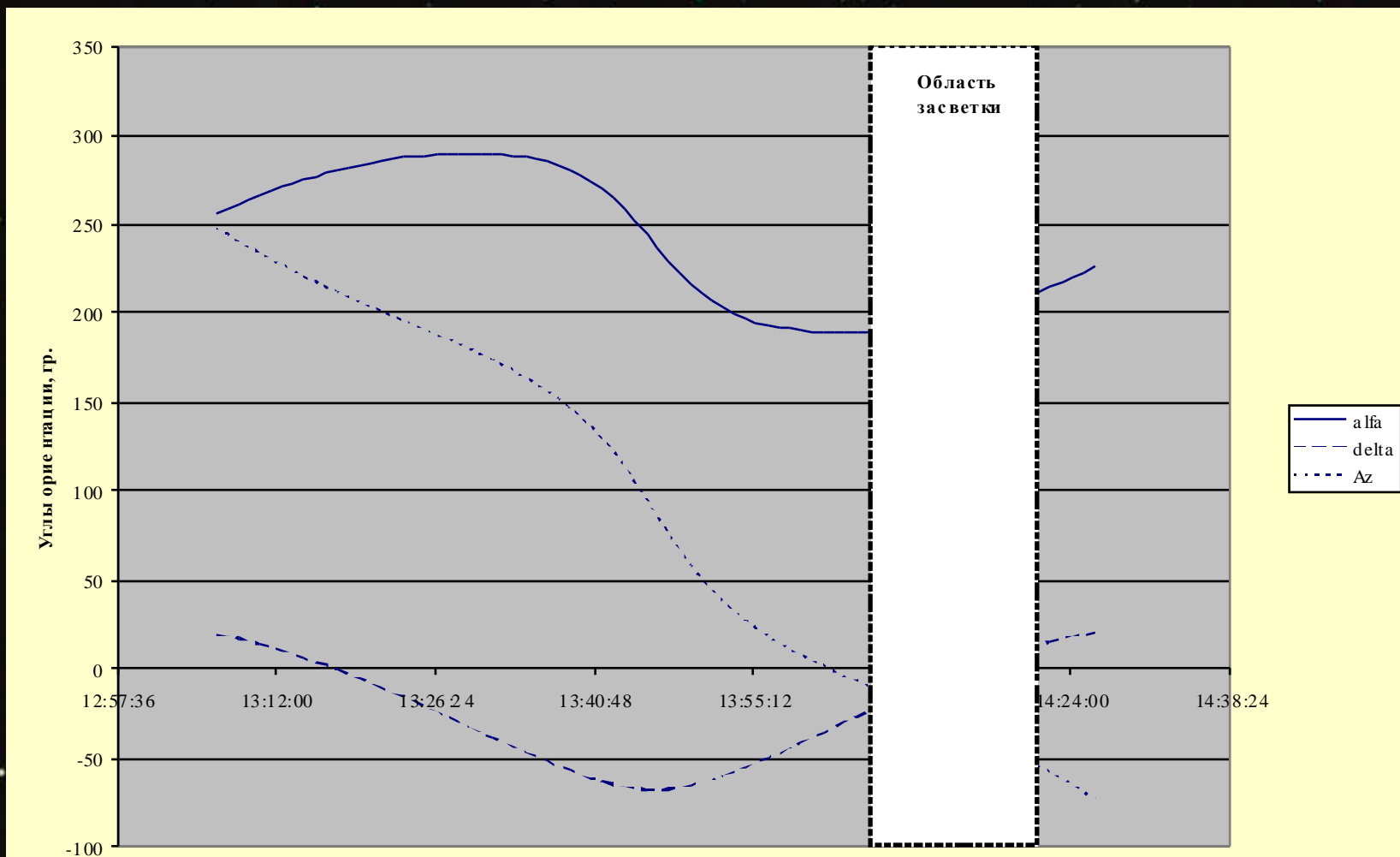
## Звездный каталог

- ✓ Суммарное число звезд 8 500
- ✓ Макс. звездная величина +7.5
- ✓ Время первого определения кватерниона ориентации (без *априорной* информации) 30 с



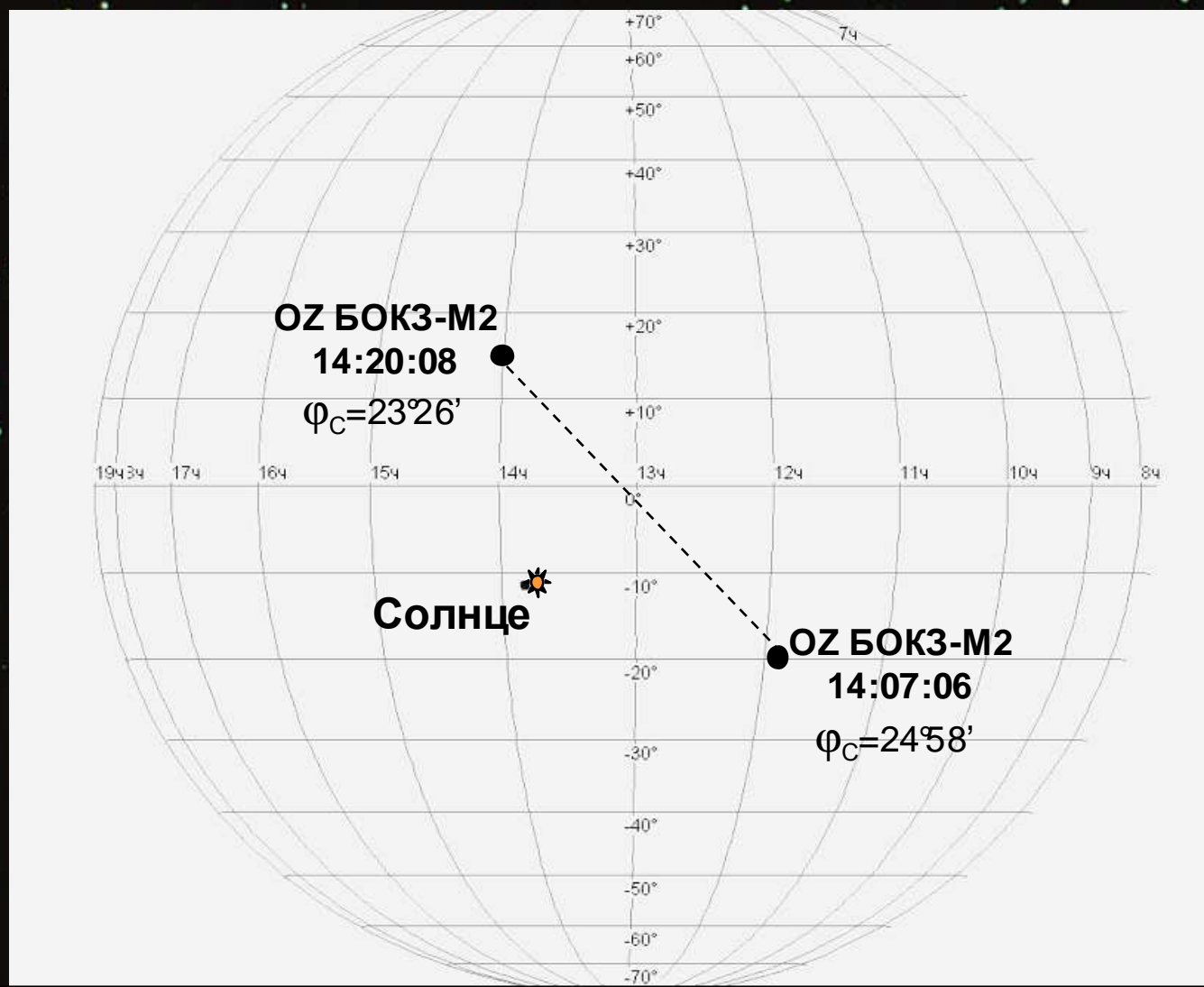
# Результаты работы приборов БОКЗ-М

## Траектория полета КА с прерыванием ориентации при засветке Солнцем



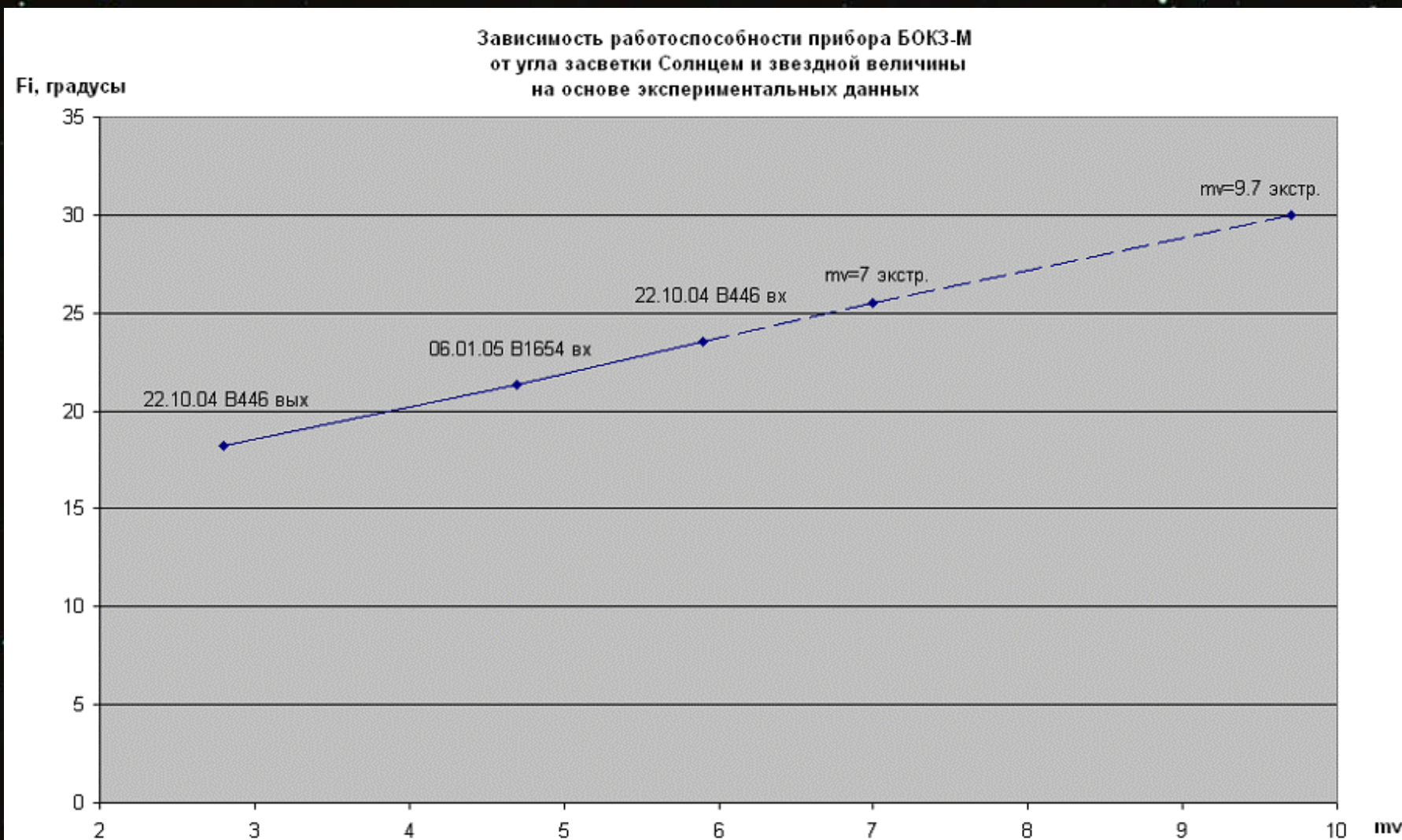
# Результаты работы приборов БОКЗ-М

## Область засветки прибора БОКЗ-М



# Результаты работы приборов БОКЗ-М

## Область засветки прибора БОКЗ-М





# Семейство звездных приборов БОКЗ

## Основные итоги отработки в полете

- ✓ Определен уровень защищенности приборов к фоновой засветке (*нит*) —  $\leq 1$
- ✓ Определен уровень защищенности приборов к протонному воздействию (*протонные события / число гидрирующих звезд*) — 20 / 1
- ✓ Подтверждена методика расчета, технология изготовления и испытаний светозащитных бленд приборов с уровнем подавлением боковой засветки —  $\sim 10^9$
- ✓ Практически подтверждена точность определения ориентации в приборной системе координат:
  - на геостационарной орбите  $\sigma_{x,y}/\sigma_z$  (угл.сек) — 1,5 / 12
  - на околоземной орбите  $\sigma_{x,y}/\sigma_z$  (угл.сек) — 1,8 / 15
- ✓ Практически установлена величина апостериорной вероятности определения ориентации звездными приборами:
  - для 1 прибора на геостационарной орбите за 6 лет эксплуатации в сеансом режиме (КА «Ямал») — 0,995
  - для 1 прибора на околоземной орбите за 3 месяца непрерывной эксплуатации (КА «Космос-2410») — 0,98
  - для 3 приборов на околоземной орбите за 5 лет эксплуатации в сеансом режиме (МКС) — 0,995

# Семейство звездных приборов БОКЗ

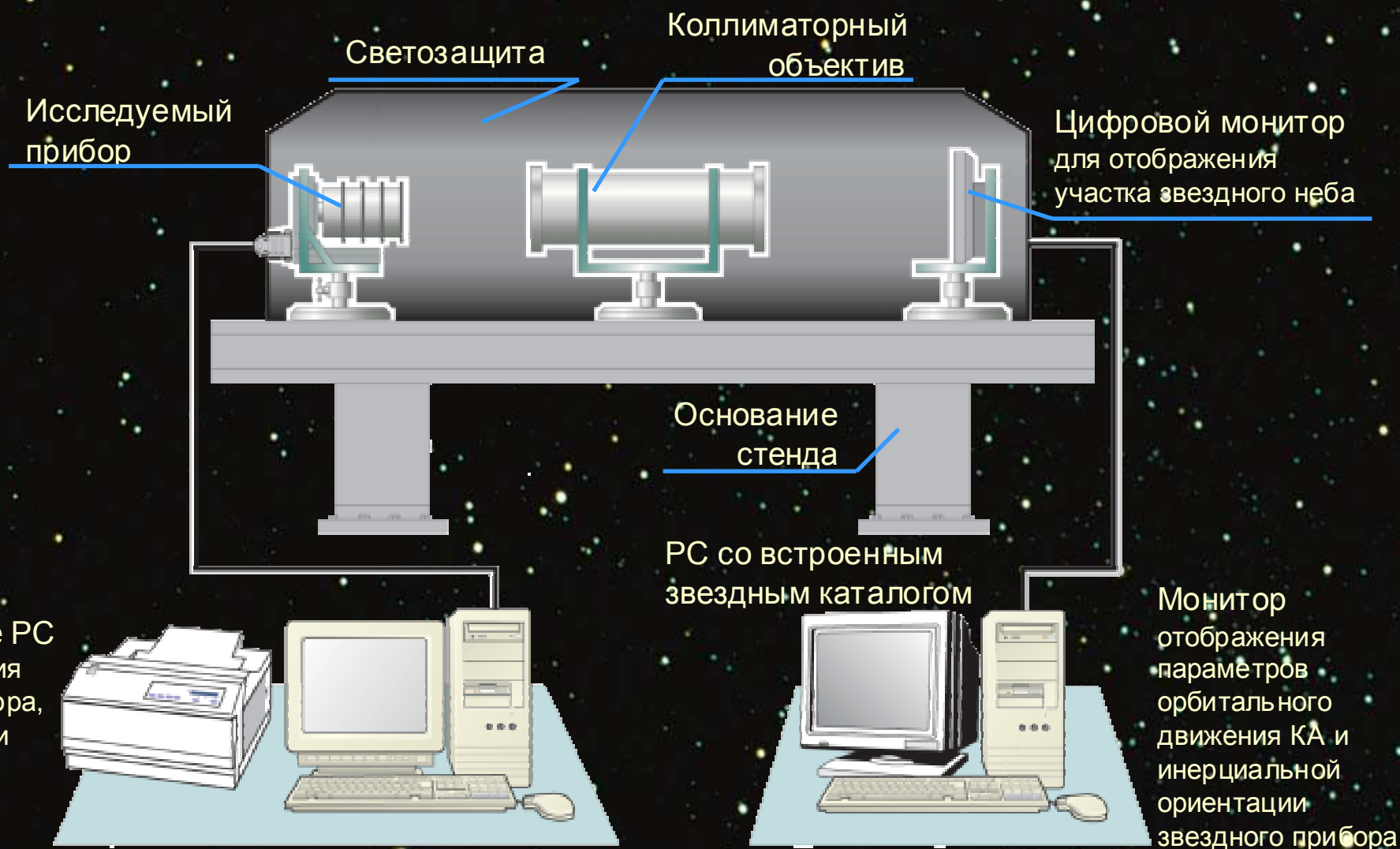
## Направления работ по модернизации и отработке

- ✓ оптимизация схемных решений
- ✓ оптимизация программно-математического обеспечения
- ✓ оптимизация конструкции приборов БОКЗ
- ✓ определение реальной стойкости элементов приборов БОКЗ к накопленной дозе,
- ✓ экспериментальное установление устойчивости процессора и алгоритма функционирования прибора к протонному излучению

Создание звездного прибора со встроенными ДУСами для решения задачи прямого управления параметрами углового движения КА

Объединение такого звездного прибора с приемниками системы GPS-Глонасс приведет к построению многоцелевого интегрированного прибора, составляющего информационную основу системы управления движением

# Динамический стенд для отработки приборов семейства БОКЗ



# Динамический стенд для отработки приборов семейства БОКЗ

## Функциональные возможности

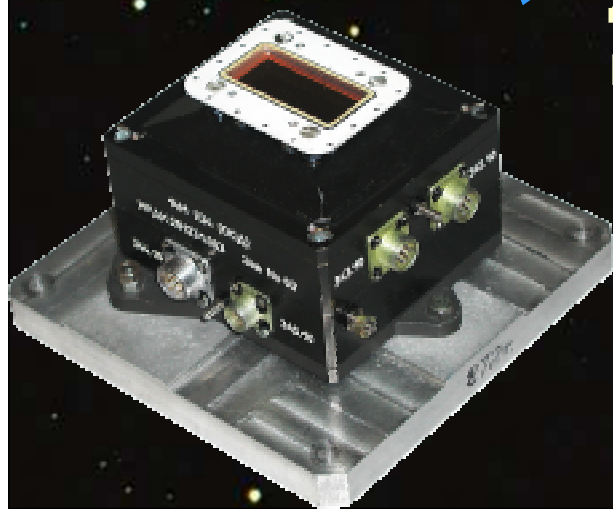
- ✓ Исследования и калибровка звездных приборов
- ✓ Моделирование процесса наблюдения звездными приборами участка небесной сферы с использованием встроенного каталога в различных динамических режимах:
  - орбитального полета космических аппаратов и
  - их движения вокруг центра масс
- ✓ Отработка звездных приборов с различными
  - оптическими системами и
  - приемниками изображения
- ✓ Отработка программного обеспечения звездных приборов

Оптический  
солнечный датчик  
ОСД

# Солнечный датчик ОСД

## Современный статус

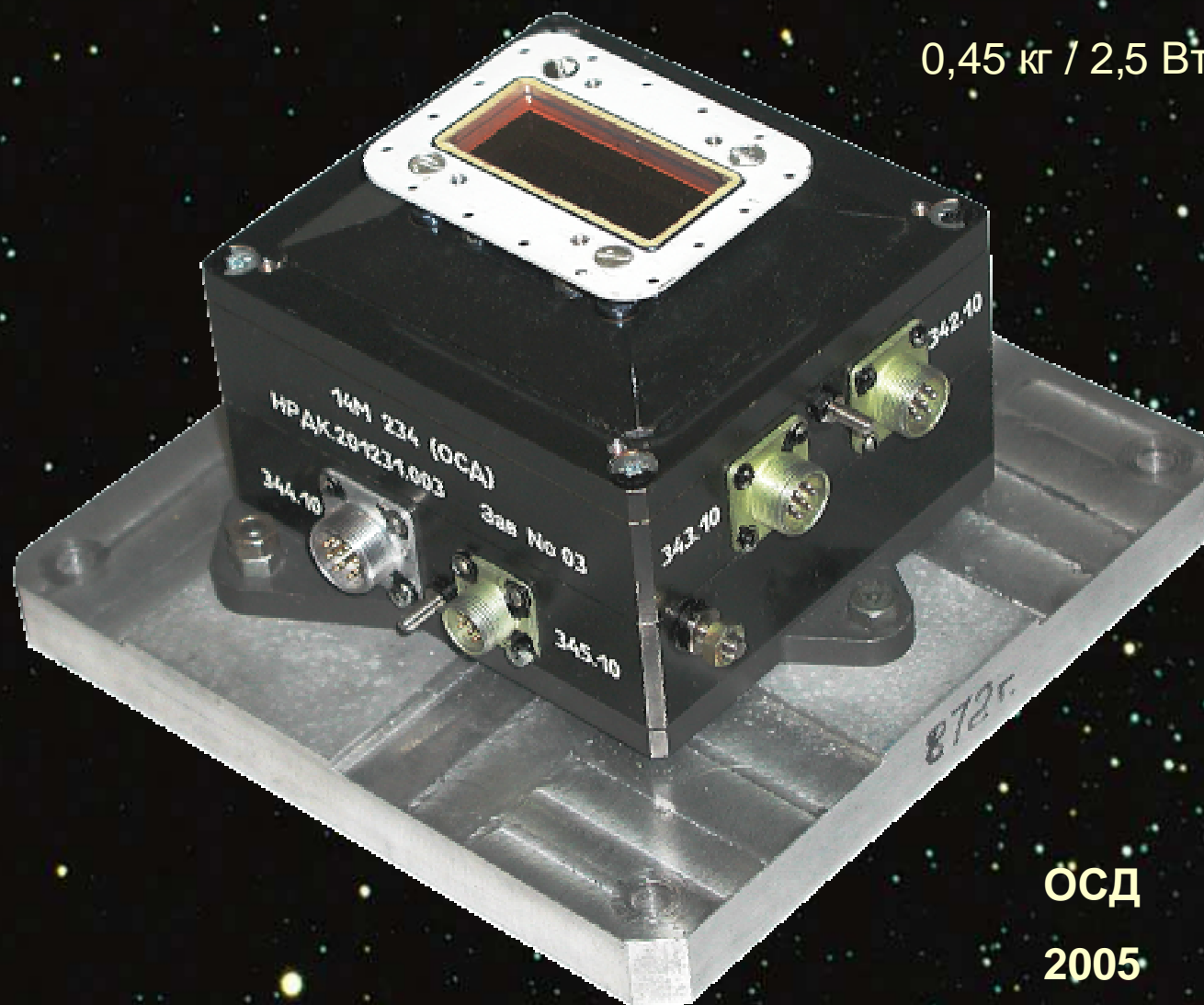
- ✓ Изготовлен технологический образец, на котором подтверждены все основные параметры прибора
- ✓ В стадии испытаний находятся штатные образцы и образец для ПРИ
- ✓ До 2008 года планируется изготовить по действующим контрактам **около 30 приборов**



# Солнечный датчик ОСД

## Внешний вид

0,45 кг / 2,5 Вт

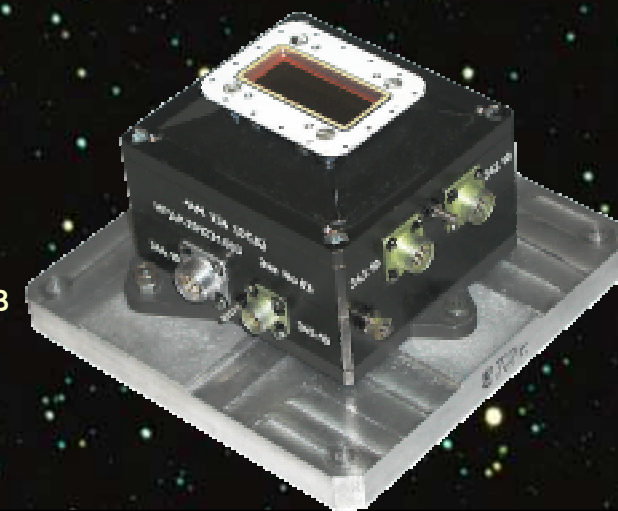


ОСД  
2005

# Солнечный датчик ОСД

## Основные характеристики

Масса, кг	0,45
Энергопотребление, Вт	2,5
Габариты, мм	120 x 112 x 72,5
Поле зрения, град	-60 — +60 в плоскости OXZ -31 — +31 в плоскости OYZ
Время готовности после подачи питания, сек	60
Период обновления данных, мс	250
Ресурс работы, часов	20 000
Температура посадочного места, °C	-15 — +45
Внешний интерфейс	MIL STD-1553B
Вероятность безотказной работы	0,98
Содержание выходной информации	Координаты вектора направления на Солнце в виде направляющих косинусов
Точность (3σ), угл.мин	
при угл. скорости КА до 0,1°/с	3
при угл. скорости КА до 1,0°/с	5



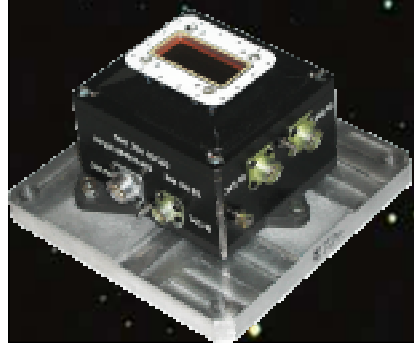


# Солнечный датчик ОСД

## Основные схемотехнические решения

### Характеристики ПЗС-линейки

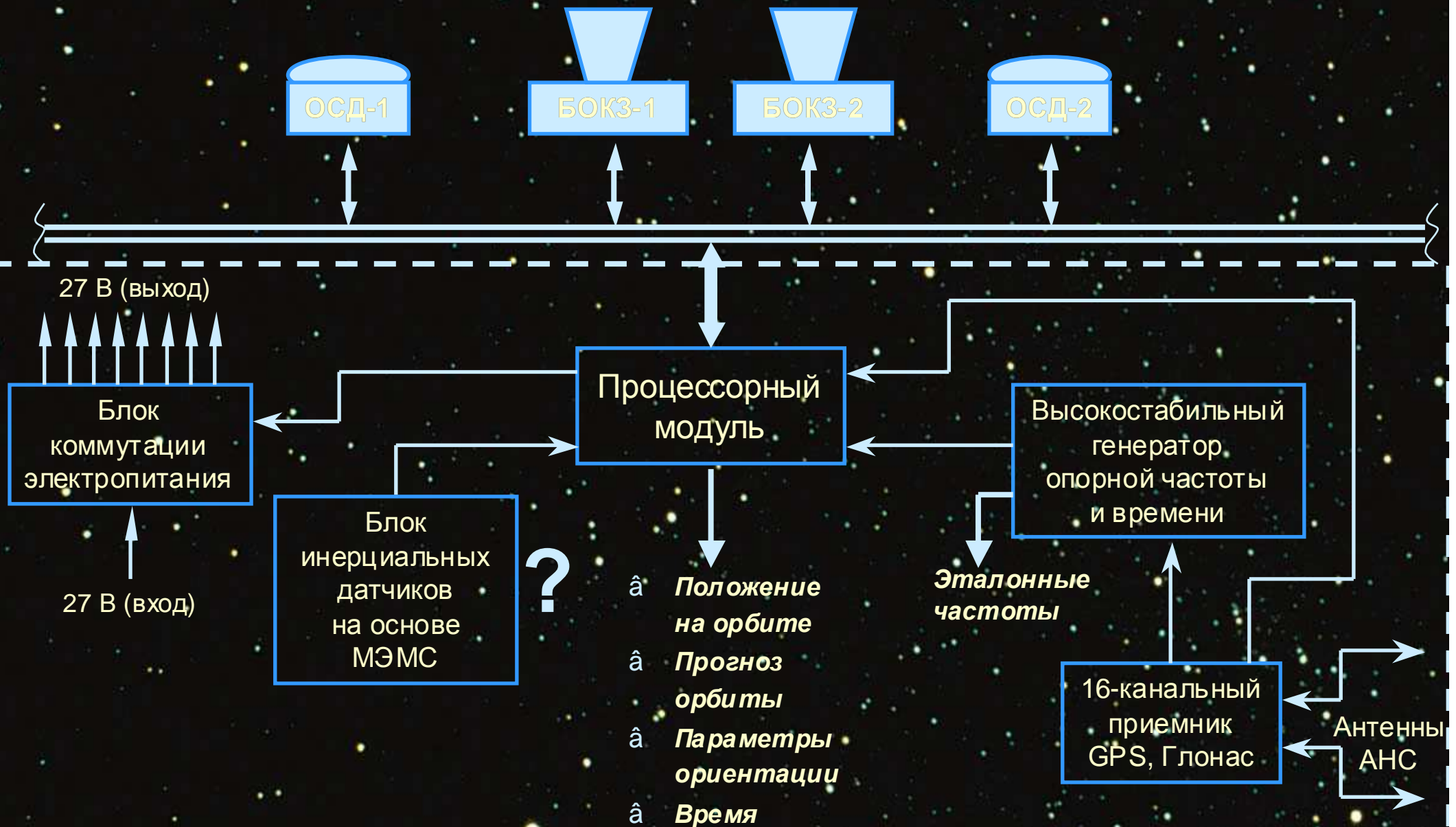
Количество элементов	2048
Размер элемента	14 x 14 мкм
Минимальная ширина светового сигнала	5 элементов
Чувствительность	30 В/лк-сек
Максимальная рабочая частота	5 МГц



Структурная блок-схема

# Автономная навигационная система

# Функциональная схема АНС



**Оптико-электронные  
комплексы  
дистанционного  
зондирования**

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

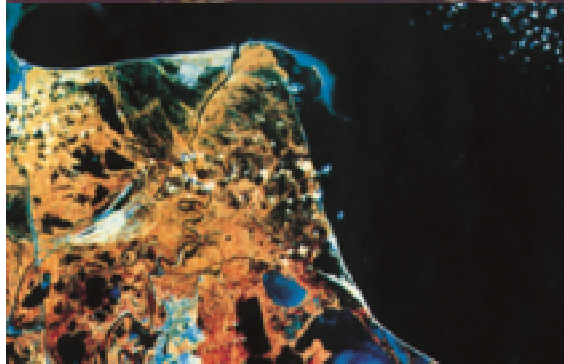
## Наша история — съемки Земли



**Первая в стране самолетная лаборатория ДЗЗ** с регистрацией видеоданных на цифровом магнитофоне выполнила съемки в 1973 году.



В 1980 году создана **первая в стране цифровая космическая многоспектральная сканирующая система «Фрагмент»**, отработавшая 4 года на спутнике «Метеор-Природа» и положившая начало созданию отечественной оперативной системы исследования Земли из космоса.



Объектив был разработан и изготовлен по нашему заданию компанией Карл Цейсс Йена

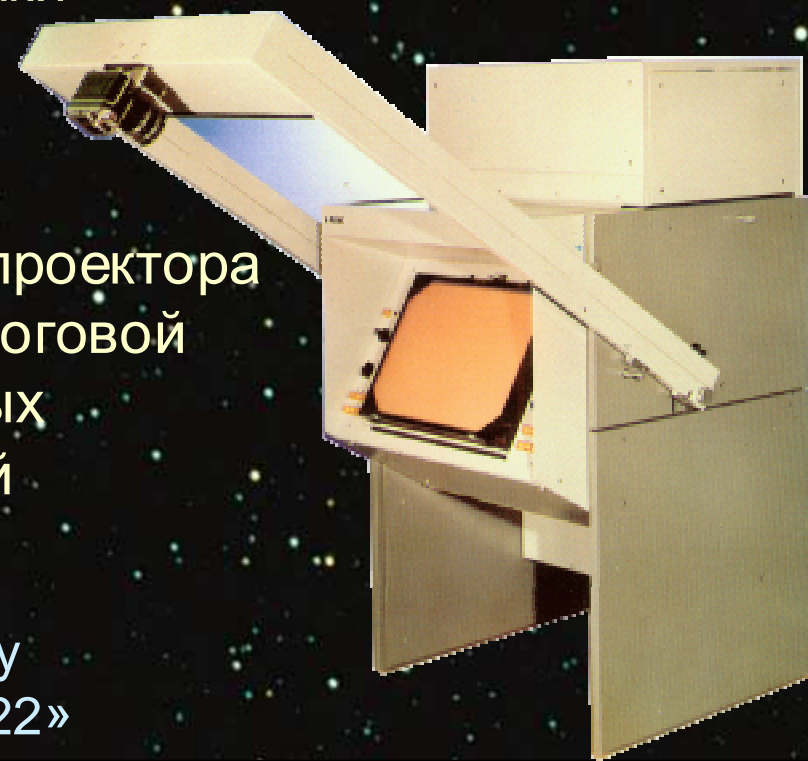
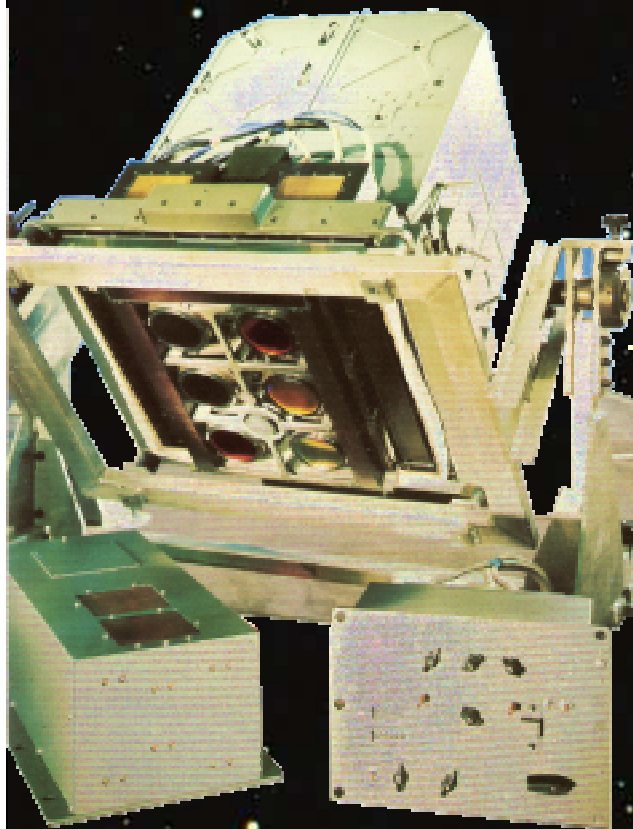
# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Наша история — съемки Земли

В 1970-е годы сотрудниками ОФО ИКИ и Карл Цейсс Йена была разработана и создана **система сбора и обработки данных**, состоящая из следующих модулей:

- многоспектральной камеры МКФ-6 для съемки с аэрокосмических платформ
- многоспектрального проектора МСП-4 для опто-аналоговой обработки получаемых камерой изображений

Камера МКФ-6 прошла летные испытания на борту пилотируемого КА «Союз-22»



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Современные комплексы ДЗ



**Аппаратно-программные комплексы дистанционного зондирования космического и авиационного применения**

**Комплекс многозональной спектральной съемки для КА «Метеор-М»**

получение изображений суши и водной поверхности в шести зонах видимого и ближнего ИК диапазонов спектра электромагнитных волн в полосе захвата около 1000 км со средним пространственным разрешением от 60 до 110 м



**Авиационный цифровой комплекс топографической стереосъемки**

разработан и изготовлен по заказу Роскартографии специалистами ИКИ РАН, АНО «Космос-НТ» совместно с ГЦ «Природа»

**Многозональная авиационная цифровая камера ЦМК-70**



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Основные характеристики

### Параметры / Камера

Датчик изображения

Число элементов в строке

Захват, км (H = 830 км)

Проекция элемента на поверхность, м (H = 830 км)

Спектральные зоны, нм

Частота строк, Гц

Информационный поток одной камеры, Мбит/сек

Разрядность АЦП / изображения, бит

Динамический диапазон ЛПЗС

**МСУ-100**

**МСУ-50**

3 линейных ПЗС

3 x 7926

480 x 2

927

55

115

535 – 575

370 – 450

630 – 680

450 – 510

700 – 900

580 – 690

156,25

~ 30

16 / 8

5000



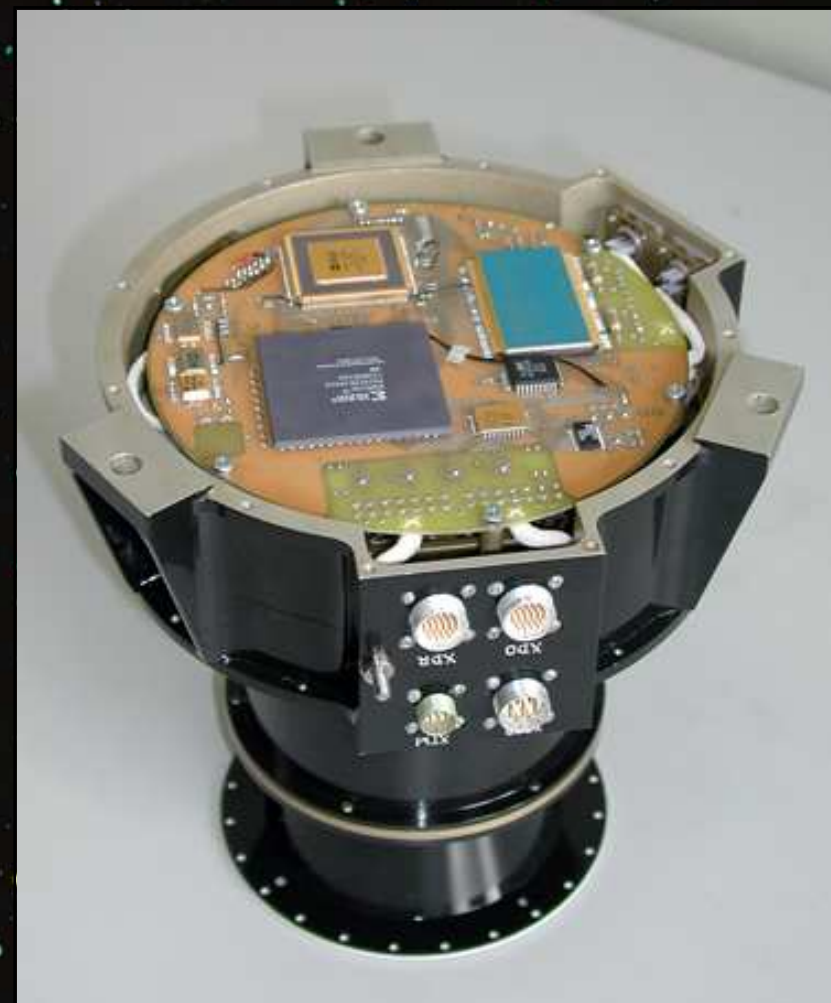
# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Основные характеристики

Параметры / Камера	МСУ-100	МСУ-50
Число камер	2	1
Фокусное расстояние, мм/отн. отверстие объектива	100 / 4,5	50 / 6,8
Углы установки отн. местной вертикали	$\pm 14^\circ$	$0^\circ$
Шина передачи данных	XDO / XDR	
Служебная шина	MIL STD 1553B	
Масса, кг	2 x 3,5	2,5
Энергопотребление, Вт	2 x 5	5
Срок службы на орбите, лет	не менее 5	

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Технологический образец КМСС «Метеор-М»



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Технологические образцы КМСС «Метеор-М»



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## КИА КМСС / МСУ «Метеор-М»



### Состав КИА КМСС:

- ✓ Блок коммутации питания и контроля (БКП и К)
- ✓ Адаптер видеоинтерфейса (АВИ)
- ✓ Имитатор видеосигнала (ИВС) – 3 шт
- ✓ Электрический эквивалент прибора (ЭЭП)
- ✓ Панель и шины заземления
- ✓ Комплект кабелей
- ✓ Комплект кабелей-вставок для проверки цепей
- ✓ Персональный компьютер, принтер, ИБП
- ✓ Специализированное Программное обеспечение
- ✓ Стойка для работы с ПЭВМ и КА КИА
- ✓ Документация



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Примеры изображений камер МСУ – Разрешающая способность  
(Съемка лабораторным макетом RGB версии МСУ)



Сбербанк, 6000 м



Человек, 1300 м



Шпиль Университета, 6000 м



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Примеры изображений камер МСУ – Удаленные объекты  
(Съемка лабораторным макетом RGB версии МСУ)

Новодевичий монастырь, 3 км



Кремль, 8 км



Антенна, Медвежье Озеро, 35 км



Панорама Москвы. Вид с 22-го этажа МГУ им. Ломоносова.



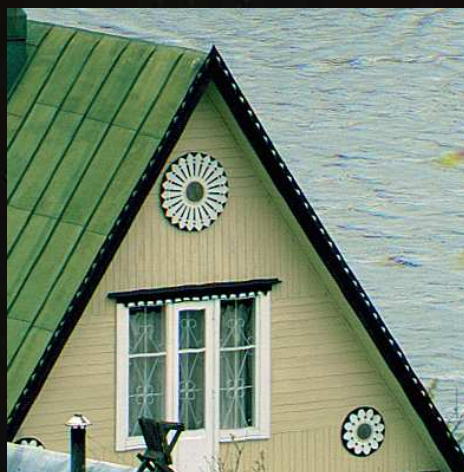
# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Примеры изображений камер МСУ – Удаленные объекты  
(Съемка лабораторным макетом RGB версии МСУ)

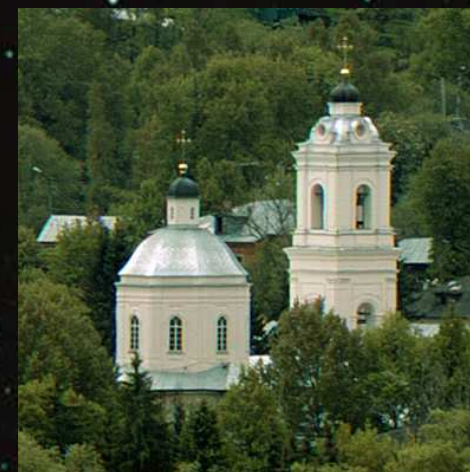
Опора ЛЭП



Жилой дом



Петропавловский собор



Панорама г. Таруса. Весна 2006 года



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Примеры изображений камер МСУ – Цветопередача  
(Съемка лабораторным макетом RGB версии МСУ)





# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Примеры изображений камер МСУ – Динамический диапазон  
(Съемка лабораторным макетом RGB версии МСУ)





## Летные испытания

В августе 2003 года были проведены первые летные испытания инженерной модели цифровой камеры.



В ходе испытаний проводились воздушные съемки с нескольких высот при различной освещенности снимаемой поверхности.

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Пример аэросъемок – с высоты 5800 м

Фрагмент полосы съемочного маршрута



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

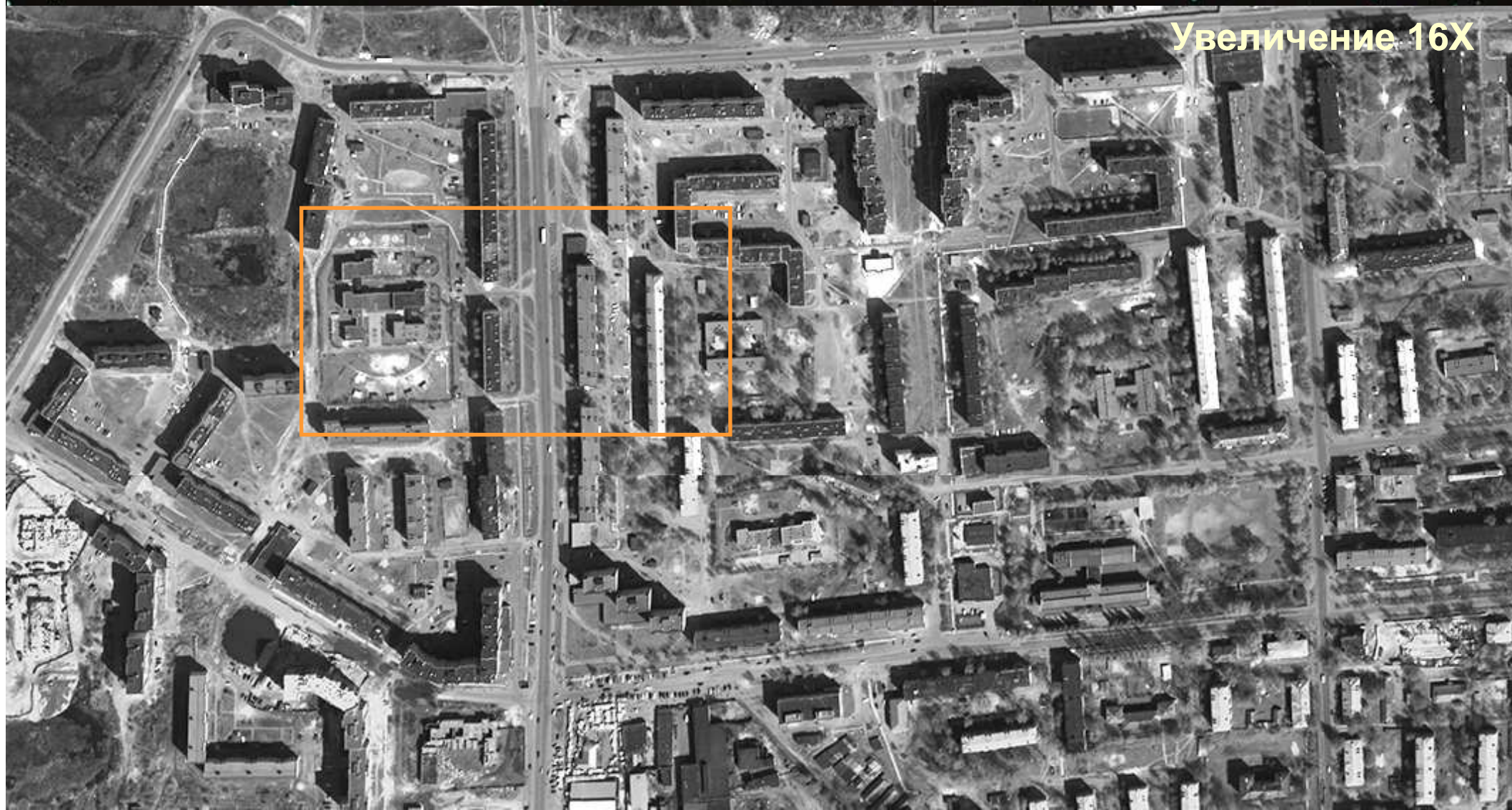
Пример аэросъемок – с высоты 5800 м



Увеличение ~4X

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Пример аэросъемок – с высоты 5800 м



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

Пример аэросъемок – с высоты 5800 м



Увеличение ~32X, разрешение 30 см

## Визуальное сравнение

Фотопленка, масштаб съемки 1:20000

Цифровое изображение, разрешение 20 см



## Динамический диапазон

Тень от облака, детали не видны



Коррекция изображения в тенях, детали проявлены





# Оптико-электронные комплексы ДЗ

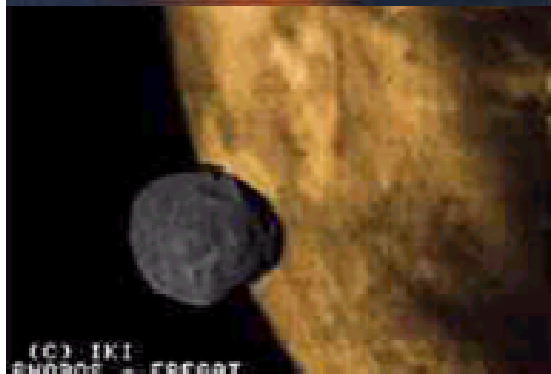
## Наша история — планетные исследования



Далее в качестве фотоприемников уже использовались **матричные и линейные ПЗС**

В 1984 создан платформенный комплекс ТВС «Вега», выполнивший съемки кометы Галлея и ее ядра.

В 1988 разработан видеоспектрометрический комплекс «Фрегат» для съемок Марса и его спутника Фобоса.



В 1996 завершено создание видеоинформационного комплекса «Аргус» межпланетной станции «Марс-96» с навигационной камерой и камерой высокого разрешения HRSC для картографирования поверхности Марса.



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Направления работ по проекту «Фобос-Грунт»

### Приборные разработки

#### Служебные системы

- Звездный датчик – БОКЗ-МФ
- Солнечный датчик – ОСД

#### Системы двойного назначения

- ТВ-система навигации и наведения (ТСНН) :
  - узкоугольная ТВ-камера (УТК ТСНН) и
  - широкоугольная ТВ-камера (ШТК ТСНН)

### Разработка ПМО

- системное
- целевое

### Наземная отработка

- Стенд отработки ТСНН
- Комплексный стенд отработки посадки / БКУ
- Стенд динамических испытаний

### Разработка ПМО

- системное
- целевое (имитаторы задач)

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Размещение приборов на КА «Фобос-Грунт»



Приборы БОКЗ-МФ и ОСД  
установлены на

- Перелетном модуле (ПМ)  
КА «Фобос-Грунт»
- Возвратной ракете (ВР)

по 2 прибора

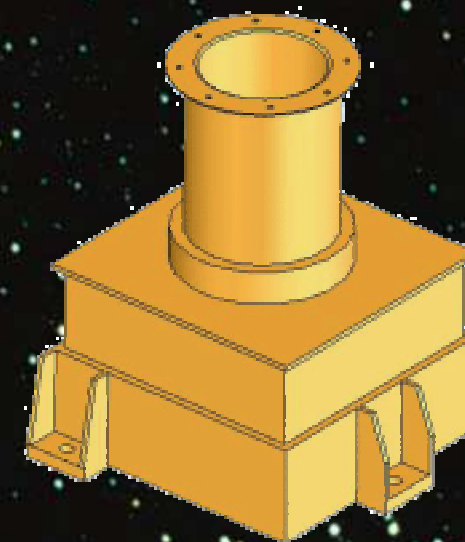
# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## ТВ-система навигации и наведения – Назначение

**ТСНН** предназначена для :

- припланетной навигации;
- выбора места посадки спускаемого аппарата на Фобос;
- поддержки процесса управления посадкой спускаемого аппарата на Фобос;
- детальной съемки поверхности Фобоса.

2,7 кг / 8 Вт



УТК  
ТСНН

2006

1,7 кг / 8 Вт



ШТК  
ТСНН

2006

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Размещение приборов на КА «Фобос-Грунт»

### Телевизионные камеры на основе ПЗС-структур

расположены на перелетном модуле КА попарно (УТК ТСНН и ШТК ТСНН) на противоположных сторонах несущей конструкции для обеспечения базиса стереосъемки 2 метра вместе с приборами ориентации по звездам БОКЗ-МФ



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Схемы работы ТСНН

**ТСНН** работает на следующих участках полета:

- на орбитах 1000–500 км и 50 км;
- на этапе сближения с Фобосом;
- на этапе посадки.

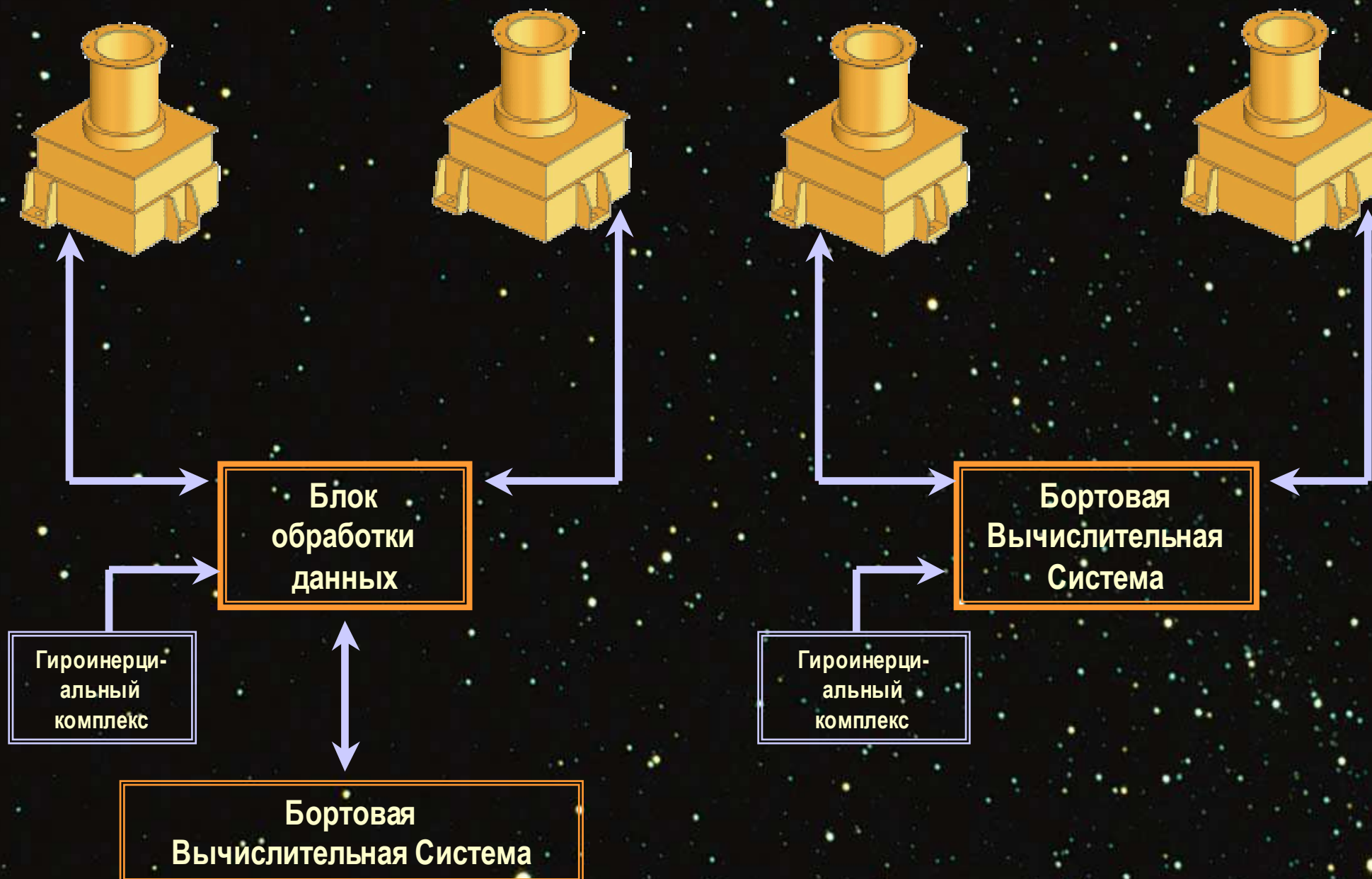
### Задачи :

- ✓ Съемка и передача изображения
- ✓ Стереосъемка и он-лайн обработка данных при уточнении места посадки
- ✓ Передача результатов обработки



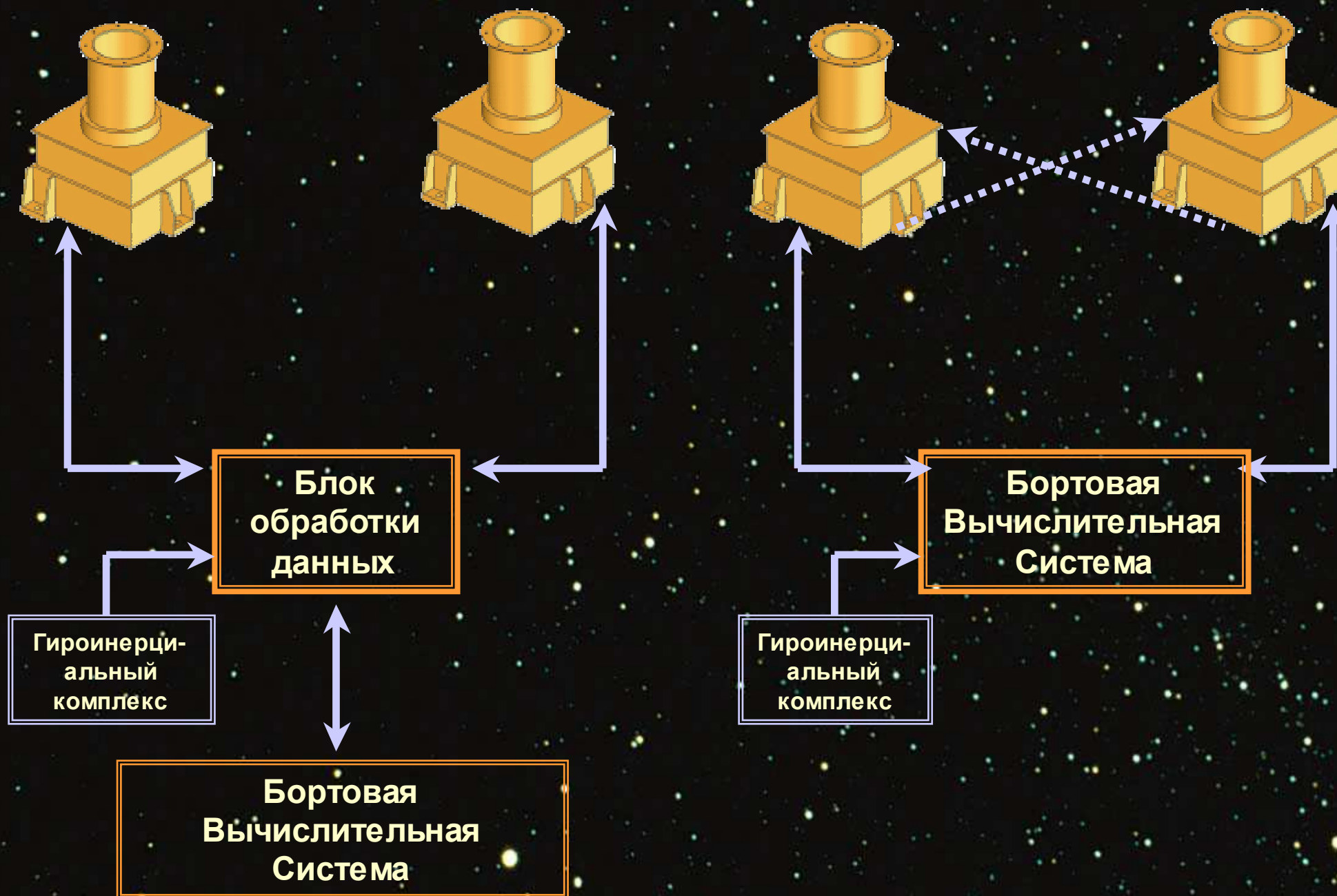
# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Принцип работы ТСНН



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Принцип работы ТСНН





# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## ТСНН – основные характеристики

- ✓ Узкоугольная телевизионная камера ТСНН-УТК
- ✓ Широкоугольная телевизионная камера ТСНН-ШТК
- ✓ Звездный датчик БОКЗ-МФ

Параметры	ТСНН		БОКЗ-МФ
	УТК	ШТК	
Фокусное расстояние, мм	500	18	32
Отн. отверстие	1 : 7	1 : 1	1 : 1,7
Спектр. зоны	панхром.	панхром.	панхром.
Размер элемента ПЗС, мкм	7.4	7.4	20
Кол-во активных элементов	1004 x 1004	1004 x 1004	512 x 512
Угл. разрешение, угл.сек	3.05	84.8	129
Поле зрения, град.	0.85	23.3	18.0
Мин. угол к Солнцу, град	80	60	36
Радиометр. разрешение, бит	12	12	12
Масса, кг	2.7	1.7	2.0
Энергопотребление, Вт	8	8	8
Кол-во приборов	2	2	2

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## Функциональные особенности

**ТСНН и БОКЗ-МФ** представляют собой :

- оптико-электронные камеры с разнофокусными модулями на ПЗС-структурах и мощным сигнальным процессором

### Обработка информации

Вычислительные и логические операции реализуются собственным программно-алгоритмическим обеспечением в онлайн режиме

# Оптико-электронные комплексы ДЗ

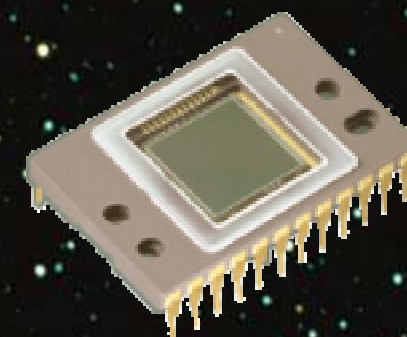
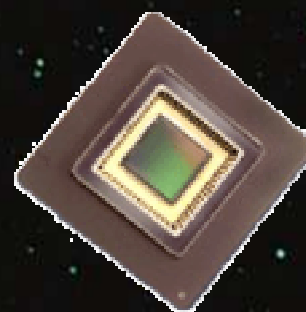
## ТСНН – блок-схема



# Оптико-электронные комплексы ДЗ

## ТСНН – характеристики ПЗС-матриц

	УТК / ШТК ТСНН	БОКЗ-МФ
Тип матрицы	со строчно-кадровым переносом	с кадровым считыванием
Число активных элементов	1004 x 1004	512 x 512
Размер элементов, $\mu\text{м}$	7,4 x 7,4	20 x 20
Размер светочувствительной области, мм	7,43 x 7,43	10,24 x 10,24



# Стенд для отработки ТВ-камер ТСНН

## Внешний вид – этап отладки

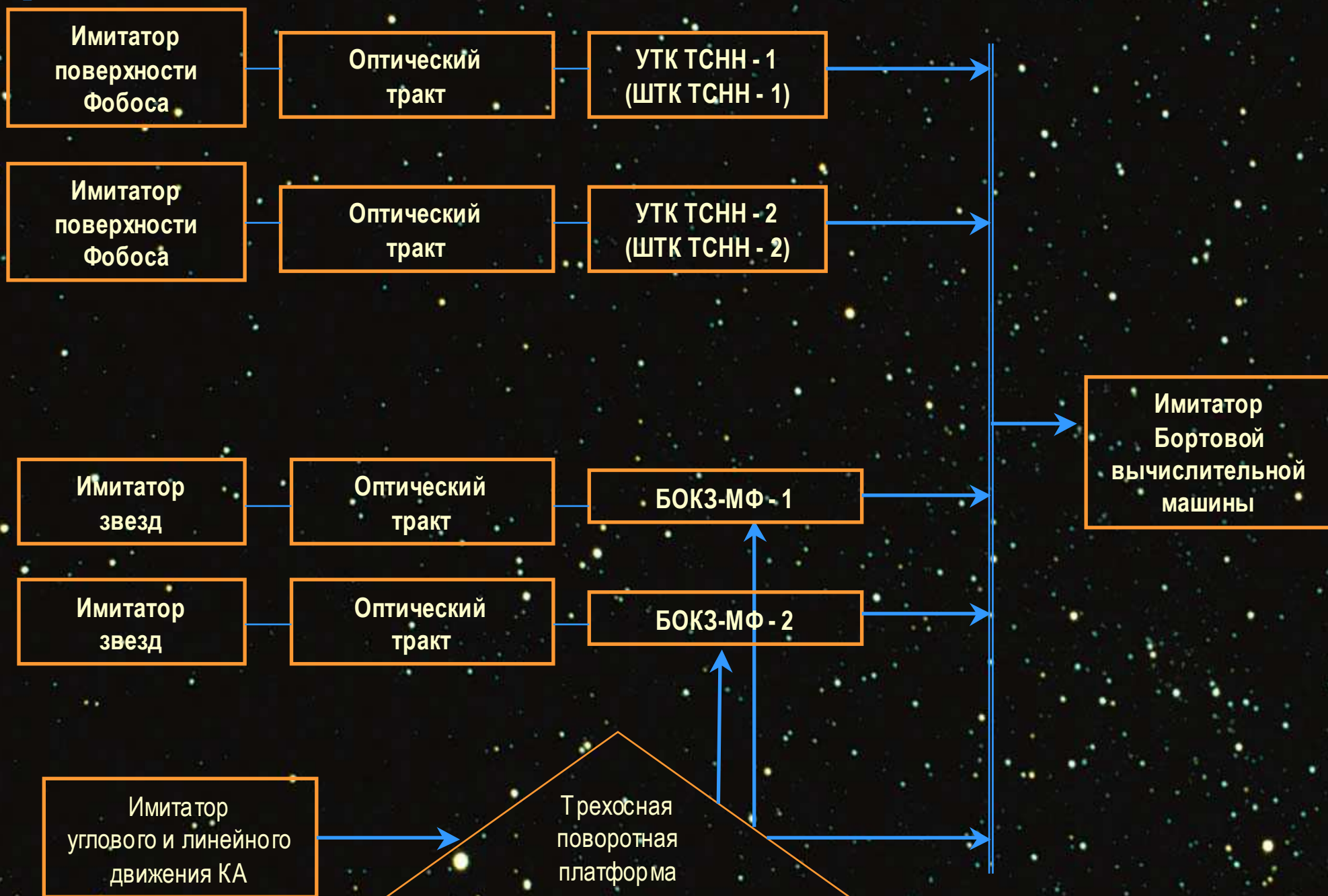
- ✓ Имитатор Фобоса
- ✓ Имитатор небесной сферы
- ✓ Имитатор помех
- ✓ Имитатор объектов в динамике



## Решаемые задачи

- ✓ Имитация излучения участков звездного неба
- ✓ Воспроизведение геометрических и энергетических характеристик Фобоса на фоне соответствующего участка звездного неба
- ✓ Имитация собственного движения Фобоса с учетом дальности (500 км, 150–50 км, 50–10 км и 10–0 км) до этого объекта от КА «Фобос-Грунт»
- ✓ Воспроизведение геометрических и энергетических характеристик одиночных звезд и участков звездного неба
- ✓ Имитация движения произвольно расположенных одиночных звезд и участков звездного неба
- ✓ Имитация световых помех и фона при одновременной имитации излучения произвольно расположенных одиночных звезд и участков звездного неба

# Комплексный стенд посадки/ отработки ТСНН



Благодарю  
за внимание