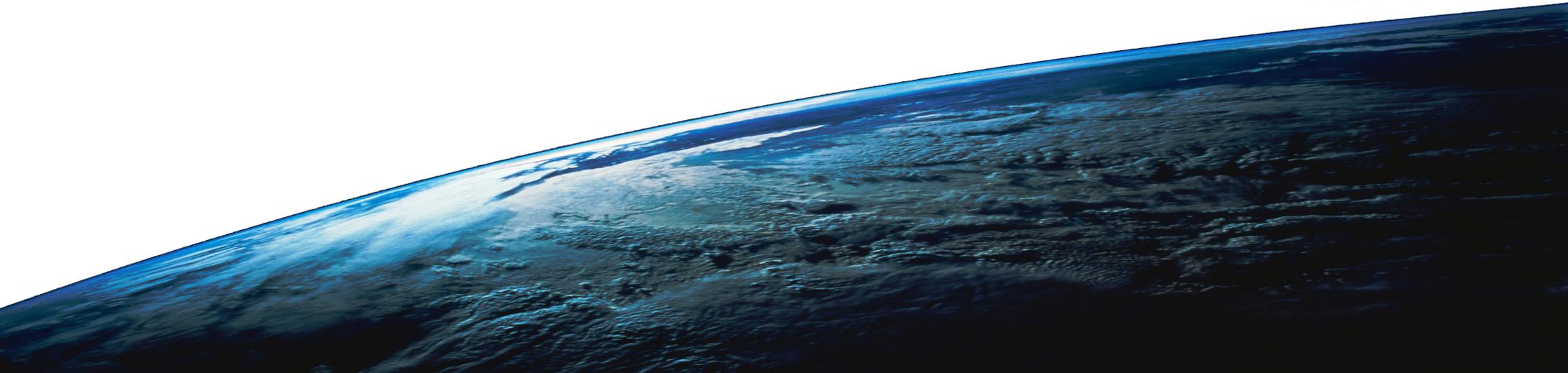


Институт космических исследований РАН

ИКИ РАН

**Оптико-электронные приборы ориентации и
навигации КА**

Бессонов Р.В.



Содержание доклада

- **Астроориентация**
 - Космические аппараты
 - Блоки выведения
 - Авиация
 - Морфлот
- **Местная вертикаль**
 - Горизонт земли с уровня моря
 - Горизонт земли из космос
- **Автономная оптическая навигация при орбитальных полетах**
- **Автономная оптическая навигация при посадке на планету**
- **Автономная оптическая навигация при стыковке КА**

Приборы звездной ориентации

Приборы на ПЗС-матрицах с длительной летной историей



БОКЗ-М

2002



БОКЗ-МФ

2006



БОКЗ-М60

2008



БОКЗ-М60/1000

2011

Приборы нового поколения на КМОП-матрицах



МикроБОКЗ

2014



мБОКЗ-2

2016



БОКЗ-ВТ

2017



БОКЗ-МР

2020

Факты:

□ Приборы БОКЗ функционируют на МКС в течении 22 лет.

□ Суммарное время наработки приборов БОКЗ в космосе составляет более 4 млн. часов.

□ Благодаря обработке показаний приборов БОКЗ-М60 на КА Ресурс-П достигнута точность геопривязки снимков высокого разрешения на уровне 3-4 м.

□ Приборы БОКЗ-М60 используются для определения параметров ориентации блока выведения Волга, в том числе на активном участке выведения.

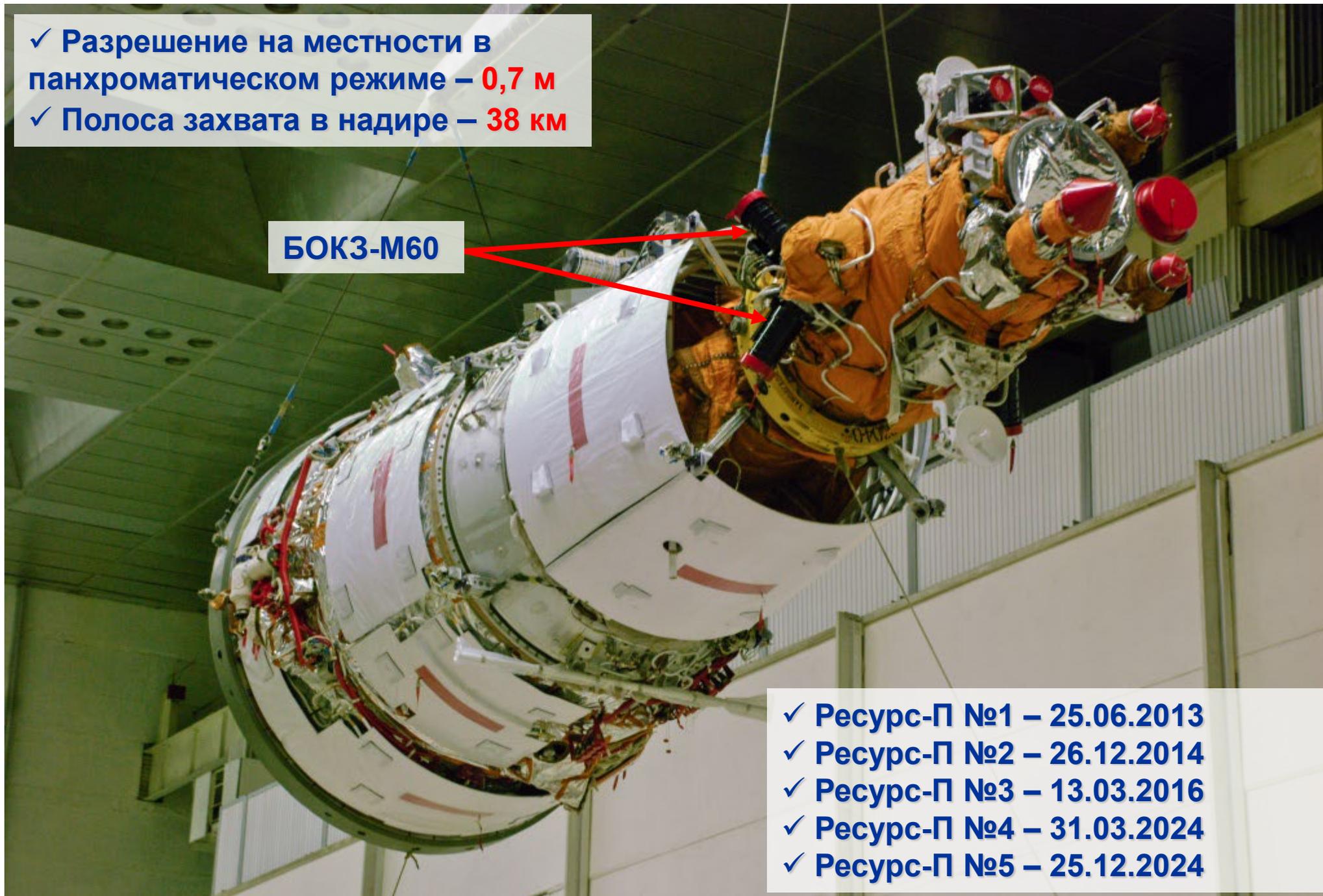
□ В приборе БОКЗ-ВТ достигнута случайная составляющая погрешности определения углов 0,2"

Космическая система «Ресурс-П»

- ✓ Разрешение на местности в панхроматическом режиме – **0,7 м**
- ✓ Полоса захвата в надире – **38 км**

БОКЗ-М60

- ✓ Ресурс-П №1 – 25.06.2013
- ✓ Ресурс-П №2 – 26.12.2014
- ✓ Ресурс-П №3 – 13.03.2016
- ✓ Ресурс-П №4 – 31.03.2024
- ✓ Ресурс-П №5 – 25.12.2024

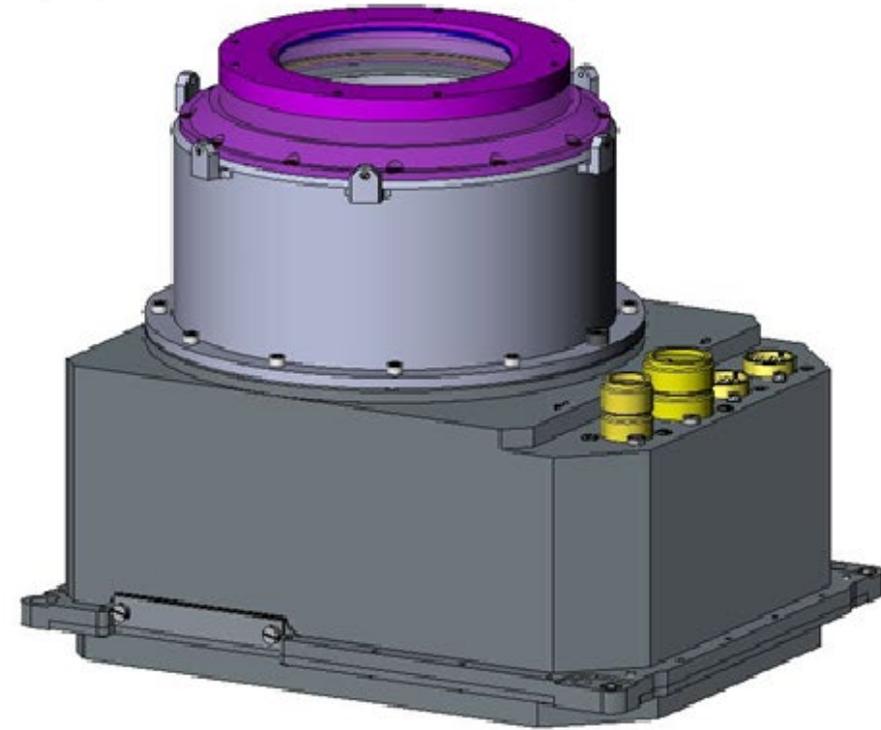




Приборы звездной ориентации нового поколения

Внутриатмосферное применение

Космическое применение



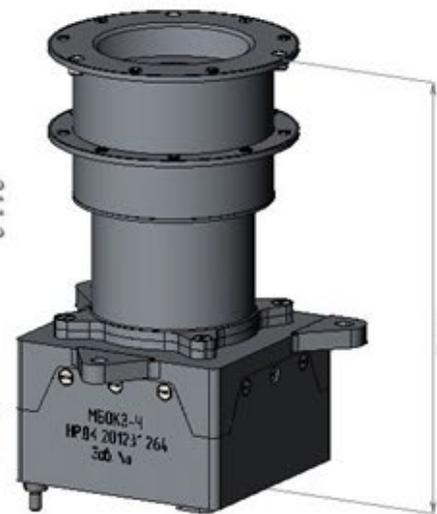
АК
25 Гц



БОКЗ-МР



АИС-2К



МикроБОКЗ
400 гр

295,5

211,3

140

Звезды днем

Звезда 2,5^m K0

Время с 5:30 по 6:30

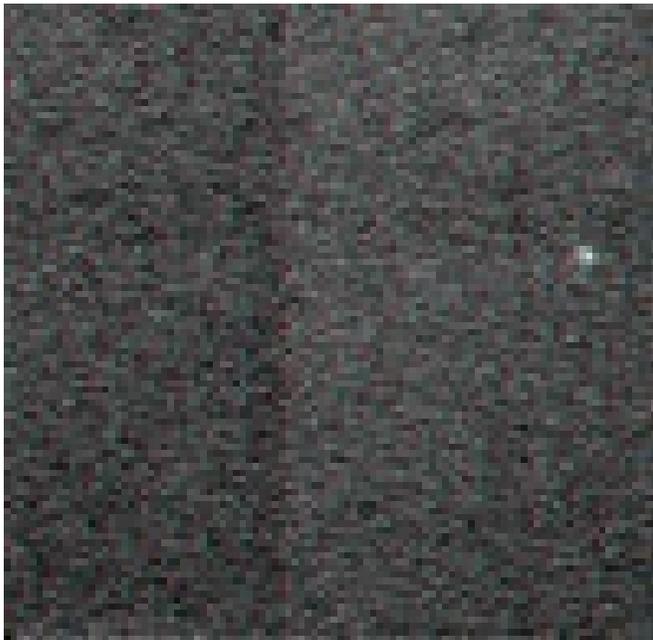
Одиночный кадр

Интегральная яркость

звезды = 5000 EMP

Шум = 160 EMP

Сигнал/Шум = 2



Звезда 3,8^m K0

Время с 5:00 по 6:40

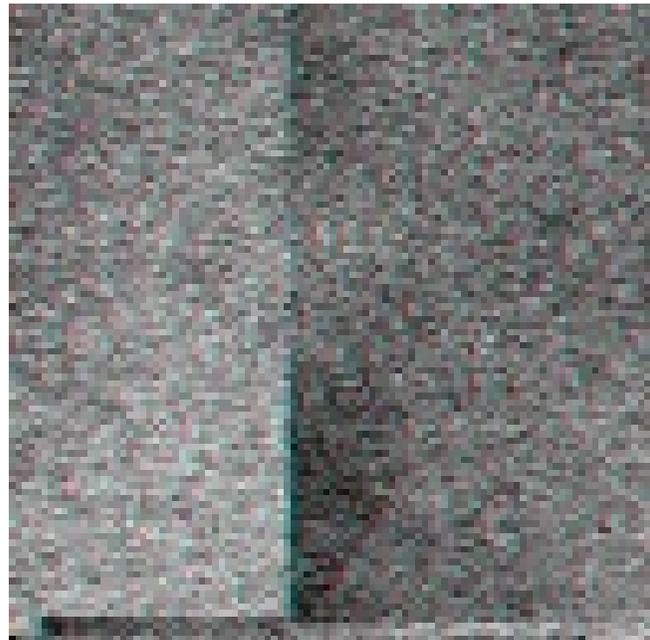
Одиночный кадр

Интегральная яркость

звезды = 1500 EMP

Шум = 160 EMP

Сигнал/Шум = 0.6



Звезда 3,8^m K0

Время с 5:00 по 6:40

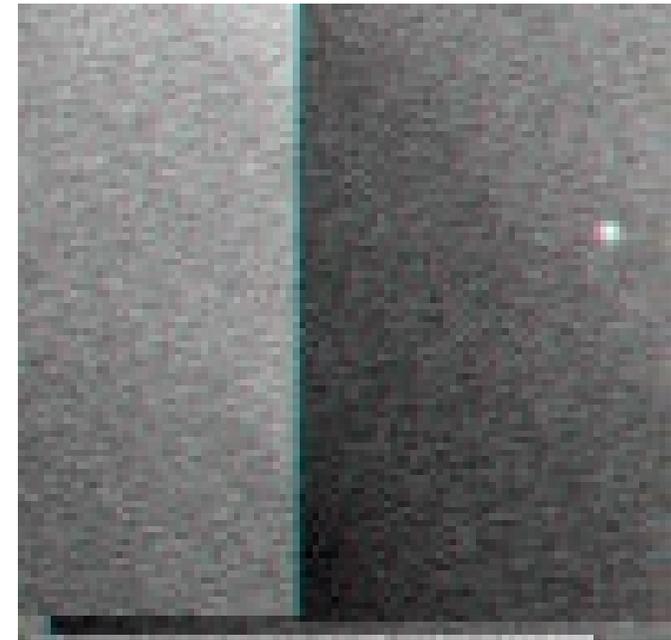
Сумма 30 кадров

Интегральная яркость

звезды = 1500 EMP

Шум = 29 EMP

Сигнал/Шум = 3.4



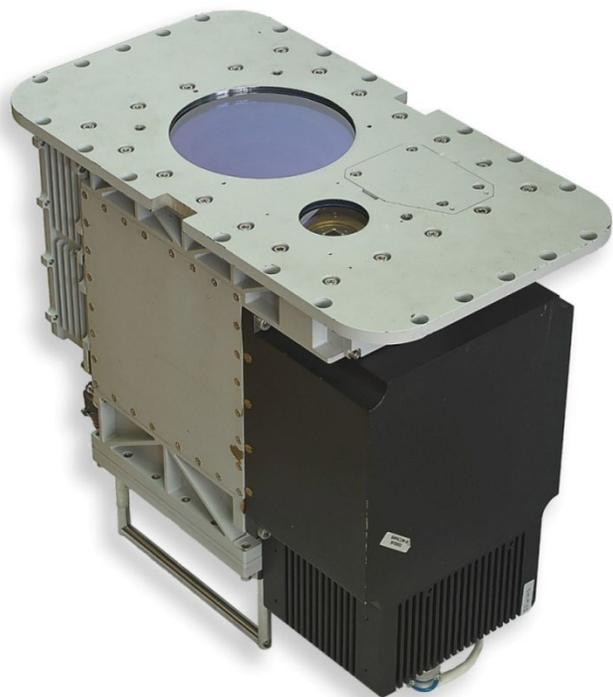
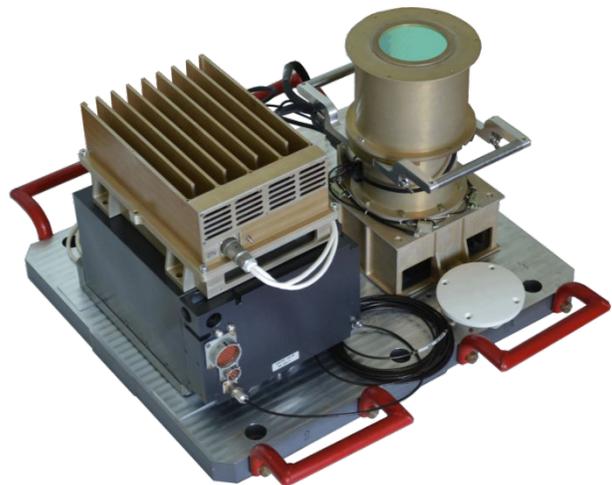
Звезда 2,5^m ярче 3,8^m в 3.3 раза

Шум уменьшается в корень раз
от количества кадров

$$160/\sqrt{30}=29$$

Астроинерциальные навигационные системы (АИНС)

Выше 8 км (выше облаков) –
бесплатформенное исполнение

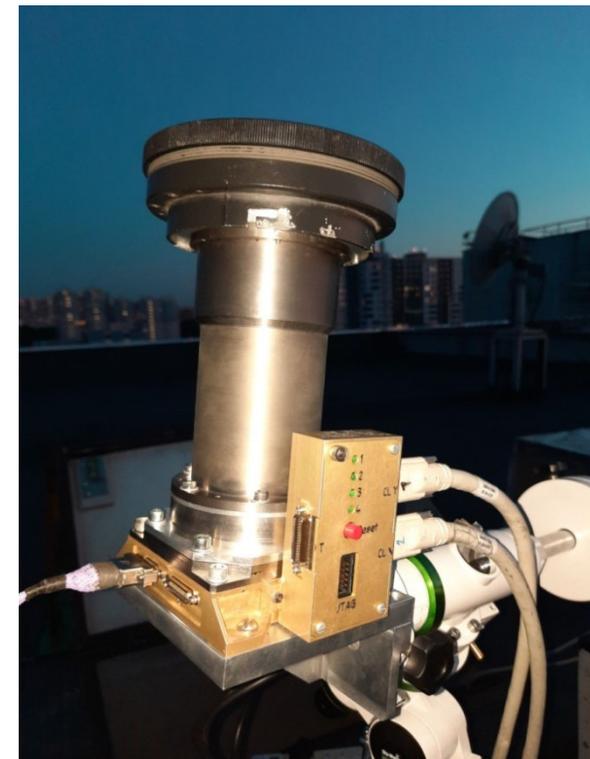


Совместно с НПК
«Электрооптика»
1 кадр в 9 с



для «Темп-Авиа»
25 кадров в 1 с

С уровня моря –
с наведением

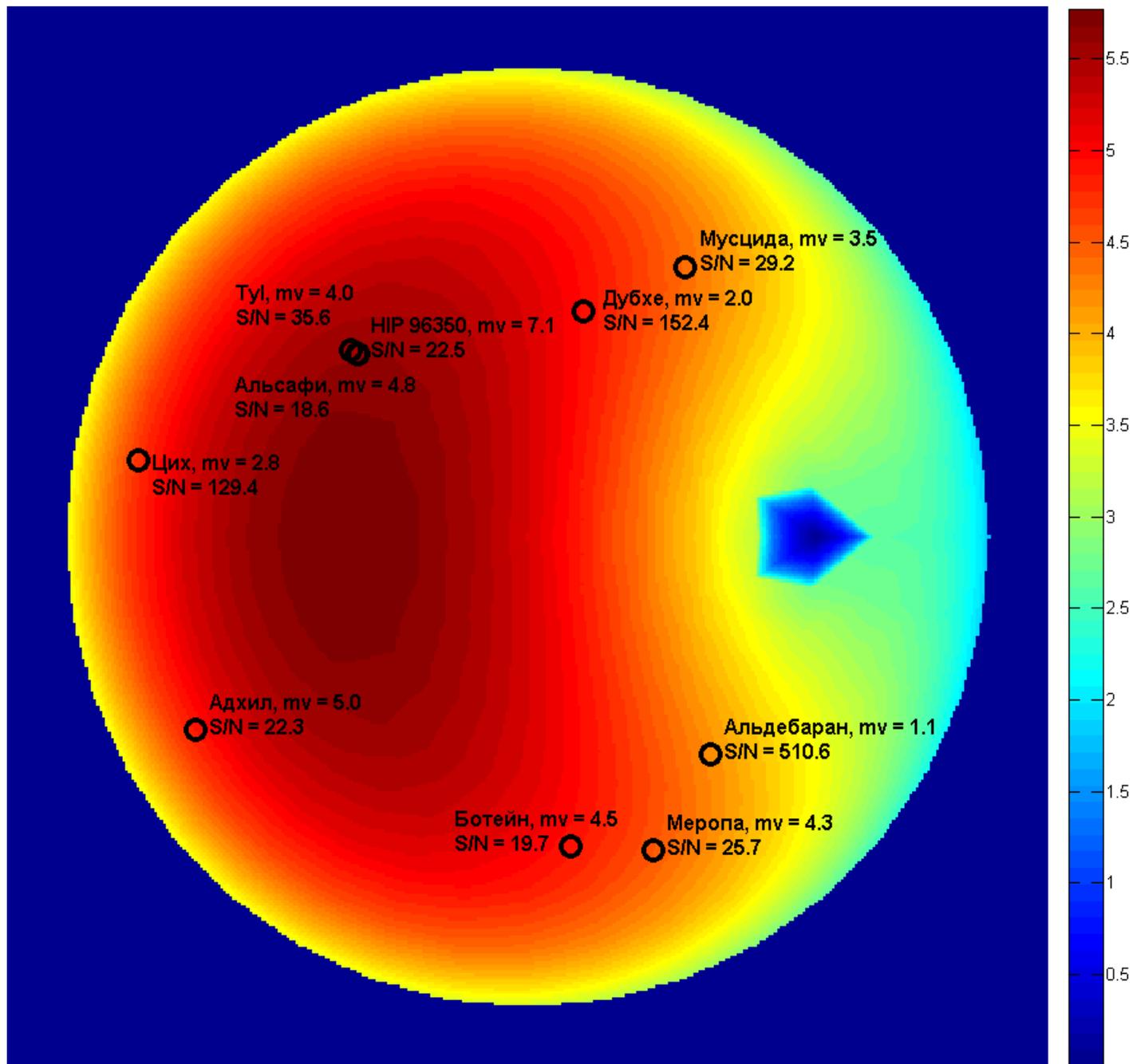


В рамках НИР «Астра»
37 кадров в 1 с

Список исследованных объектов

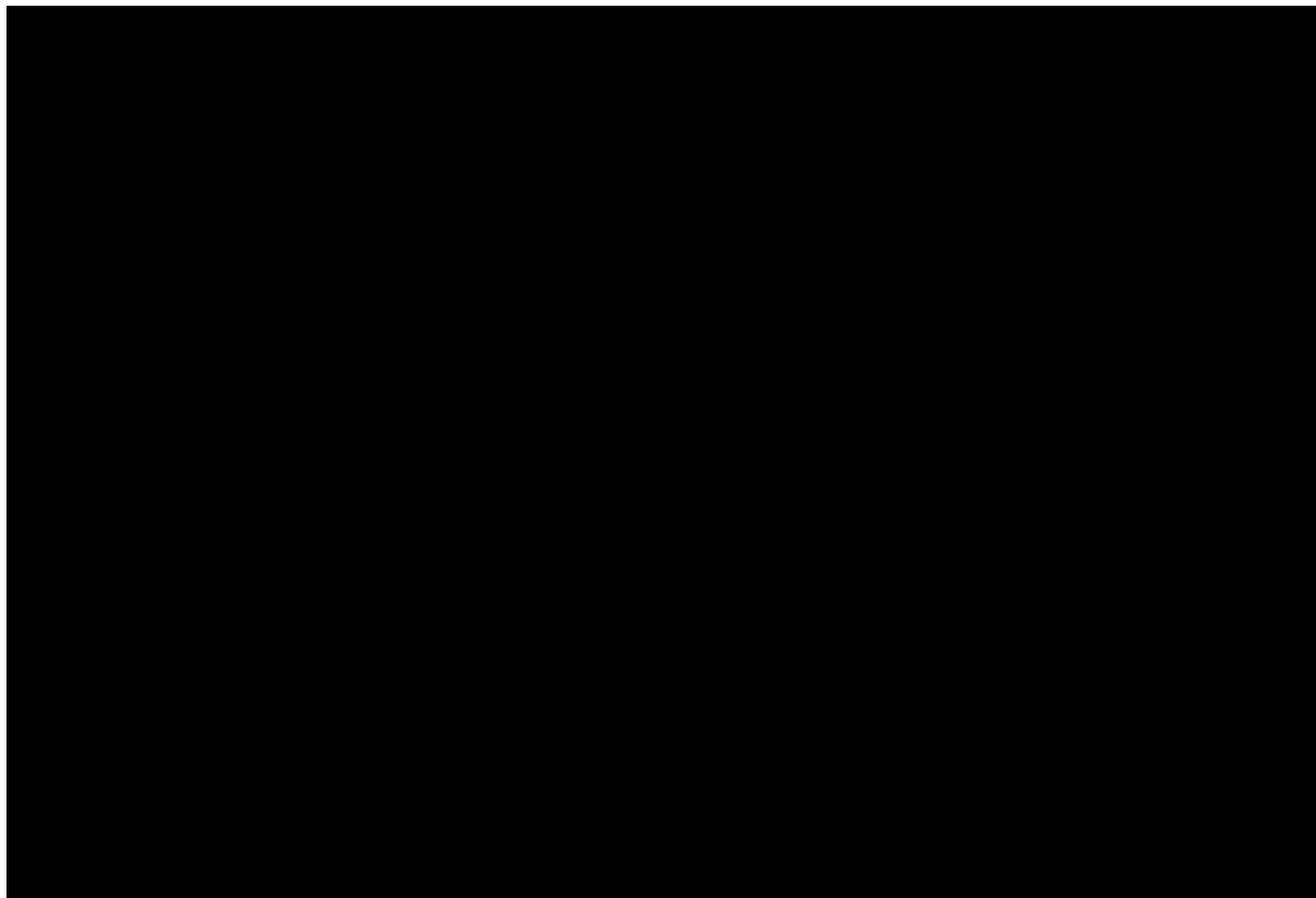
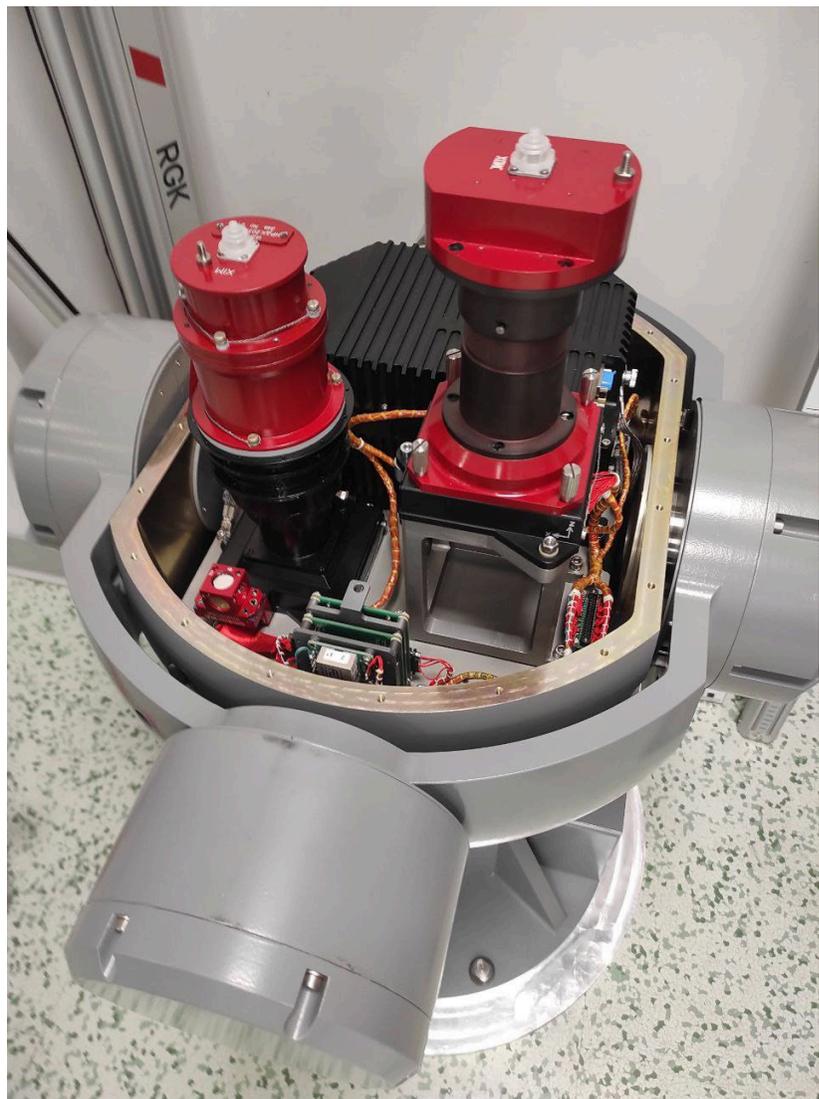
Звезда	Звездная величина	Высота Солнца на начало измерений, градусы	Высота Солнца на конец измерений, градусы
Вега	0	1,99	39,72
Альдебаран	1,1		41,84
Алиот	1,7	-0,93	39,19
Дубхе	2	1,66	39,32
Мицар/Алькор	2.4/4.8	-1,33	39,05
Ицар/34 Воо	2.7/4.8	1,34	7,07
Сih	2,8		41,58
Сегинус	3	1,45	13,78
Альциона	3	22,6	39,59
Эдасих	3,5	-1,42	38,65
Мусцида	3,5		41,05
Танийя Бореалис	3,5		41,32
Тыл	4	-1,52	38,38
Менкиб	4		39,99
Меропа	4,3		40,26
Ботейн	4,5		40,66
Альсафи/HIP 96350	4.8/7.1	-1,62	38,38
Адхил	5		40,92

Аналитический расчет наблюдаемости



Проницающая
способность камеры в
звездных величинах при
высоте Солнца над
горизонтом, равным 40°

Астровизирующее устройство в составе гиросtabilизированной АИНС



Рабочий макет 3 (РМ-3)

Тепловая ИК камера $f=35\text{мм}$, поле зрения 15 градусов



день



закат



ночь



Камера видимого диапазона $f=35\text{мм}$, поле зрения 18 градусов

Обработка линии горизонта



18:02

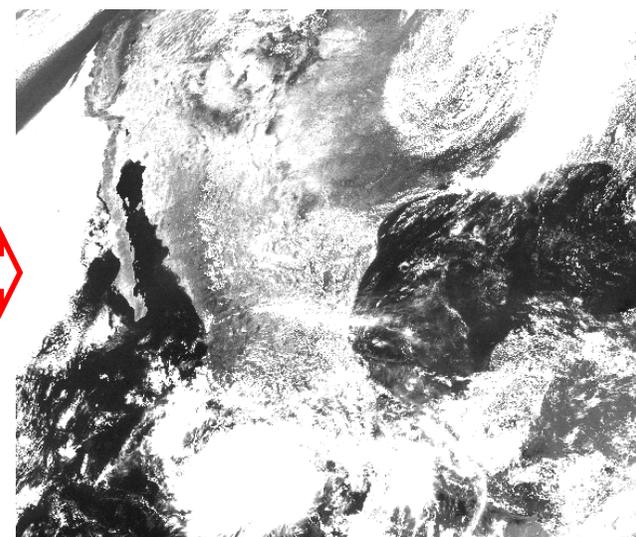
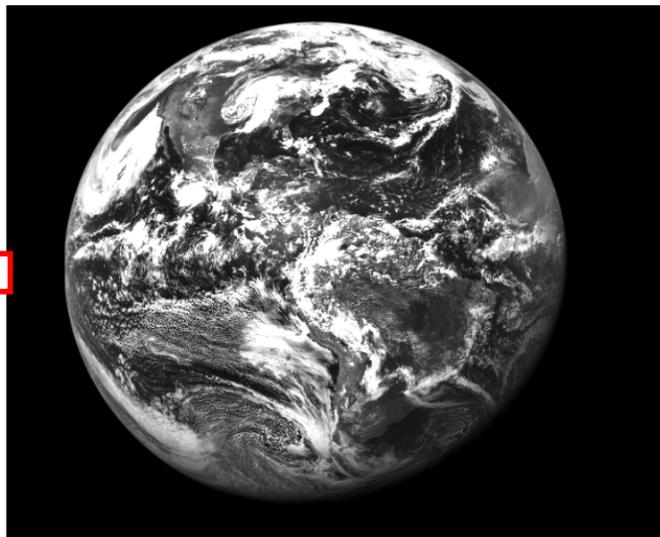
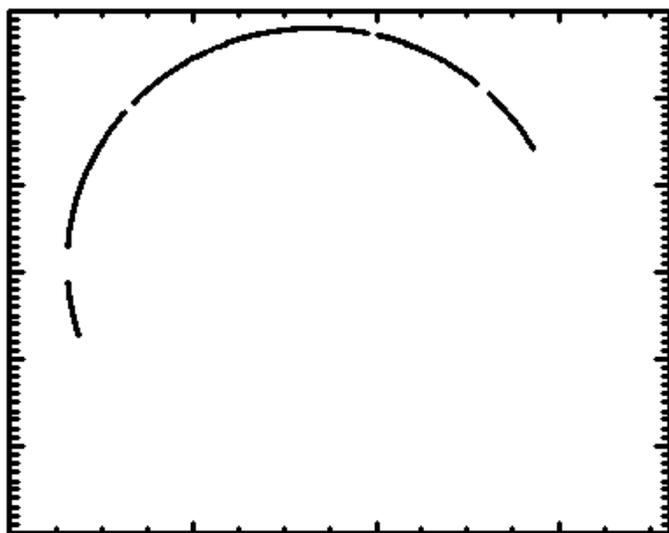
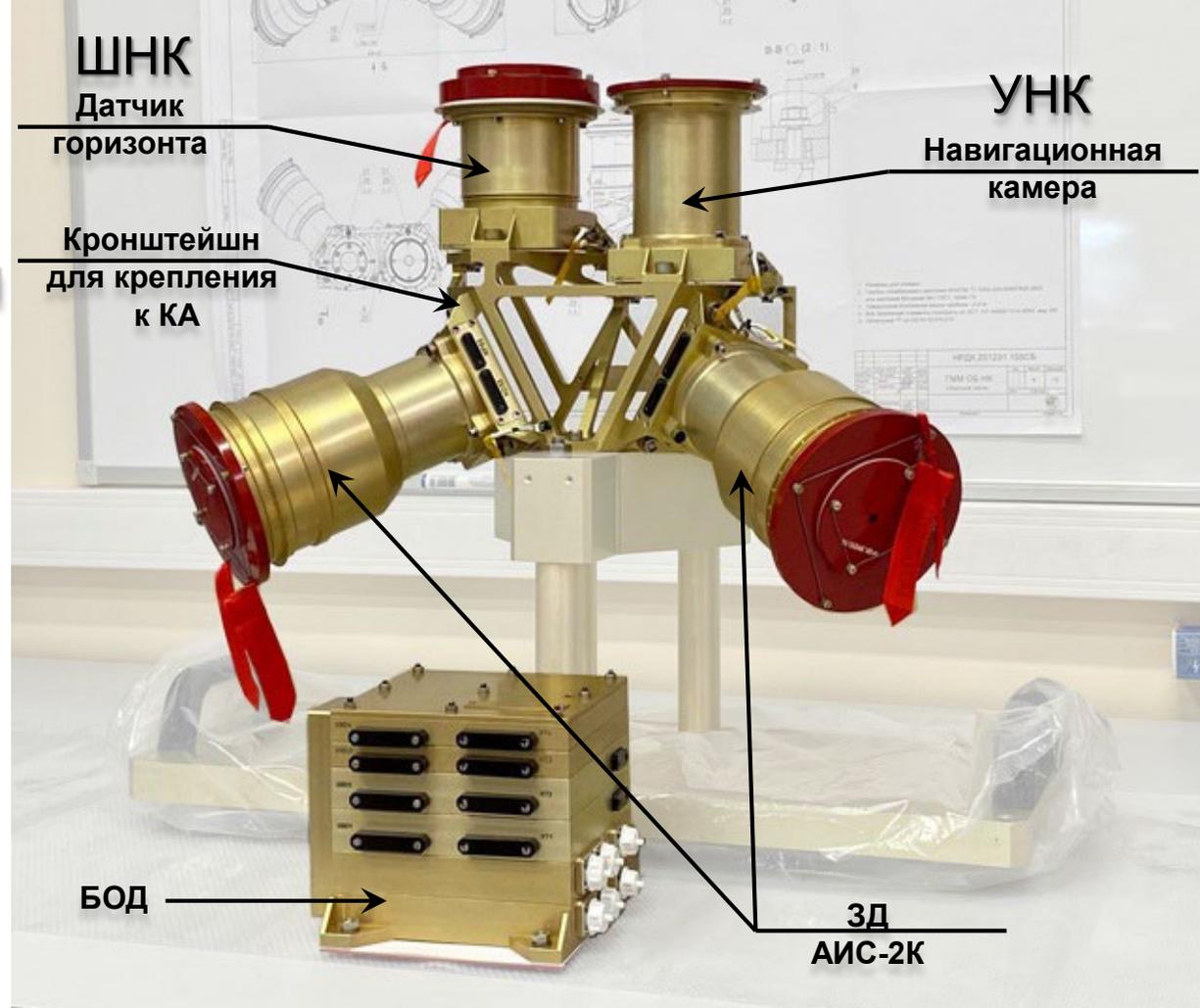


21:30

Снимки горизонта тепловой ИК камерой

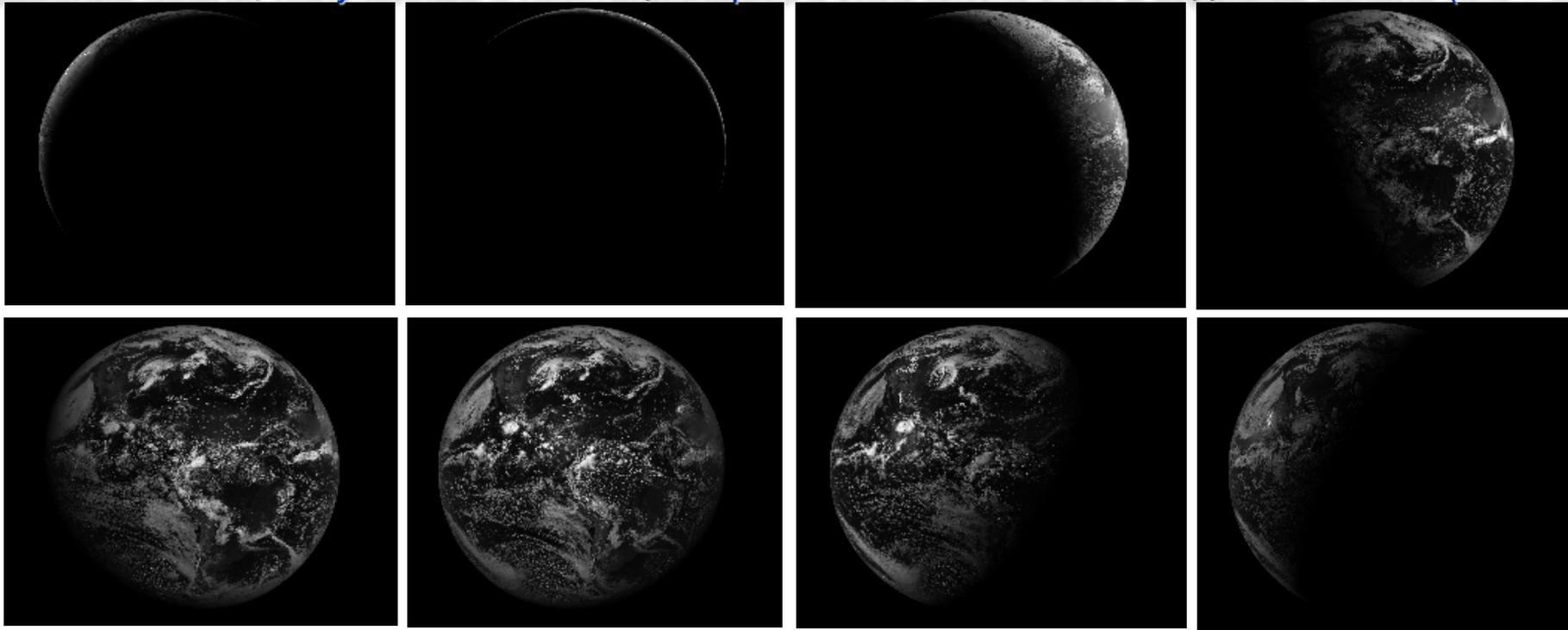
Автономная навигационная система для пилотируемого корабля нового поколения

Поле звезд, горизонт планеты и естественные ориентиры на планете



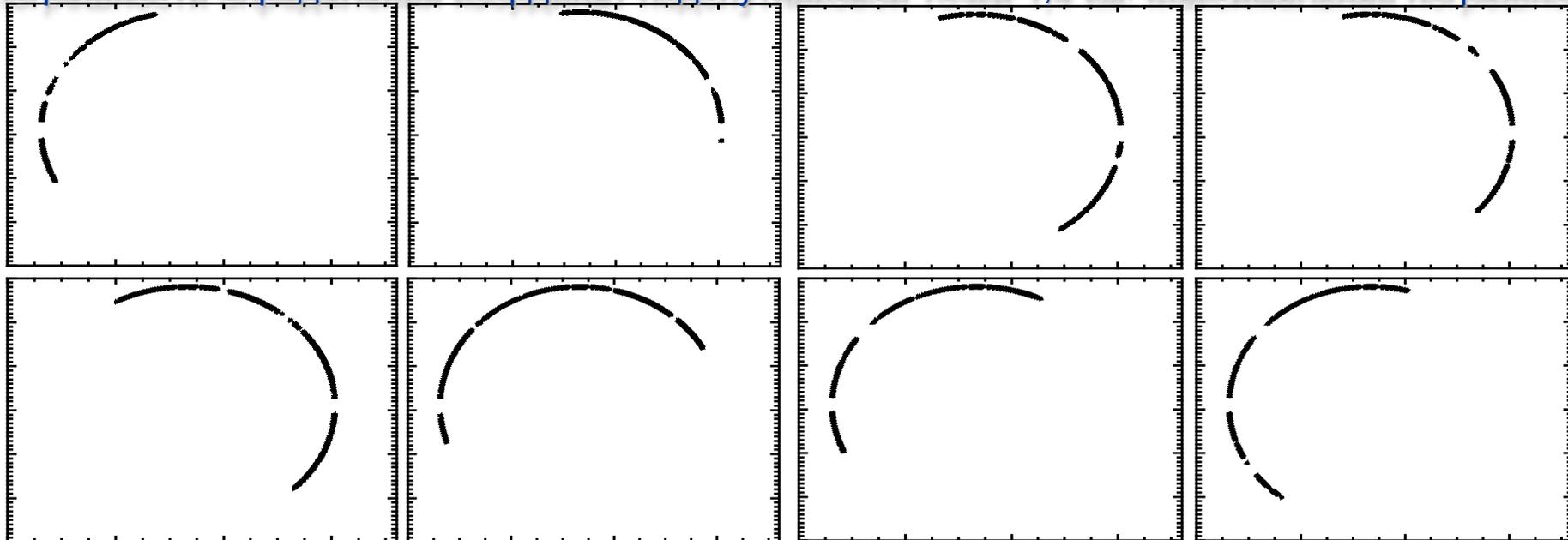
Навигация по горизонту на орбите вокруг Земли

Изображения Земли, полученные с геостационарного ИСЗ GOES-East в видимом канале (0.5 – 0.7 мкм)

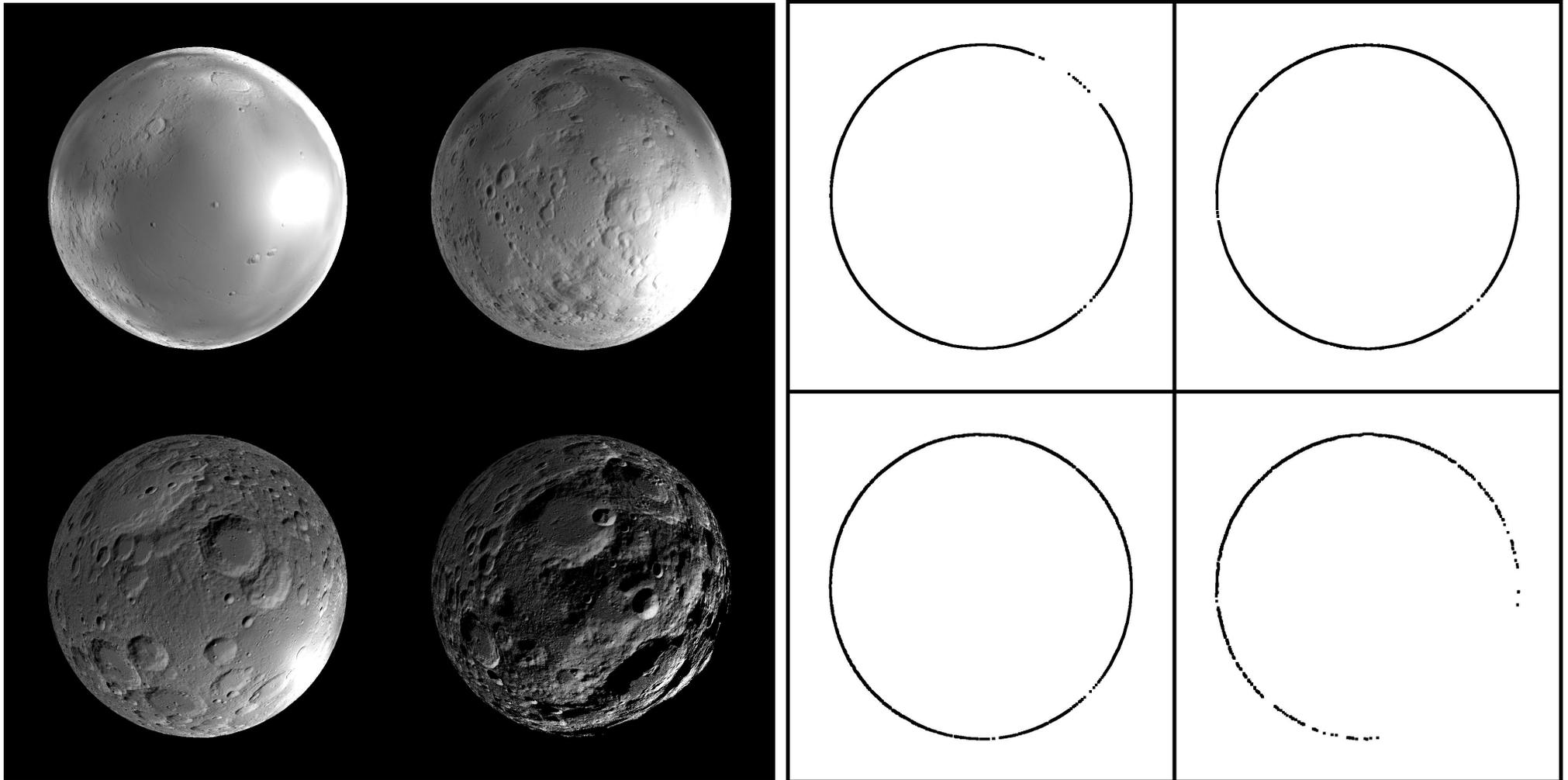


Условный горизонт Земли, детектированный на кадрах.

СКО погрешности определения координат подспутниковой точки 1,4 км. Максимальная погрешность 3 км.



Навигация по горизонту на орбите вокруг Луны

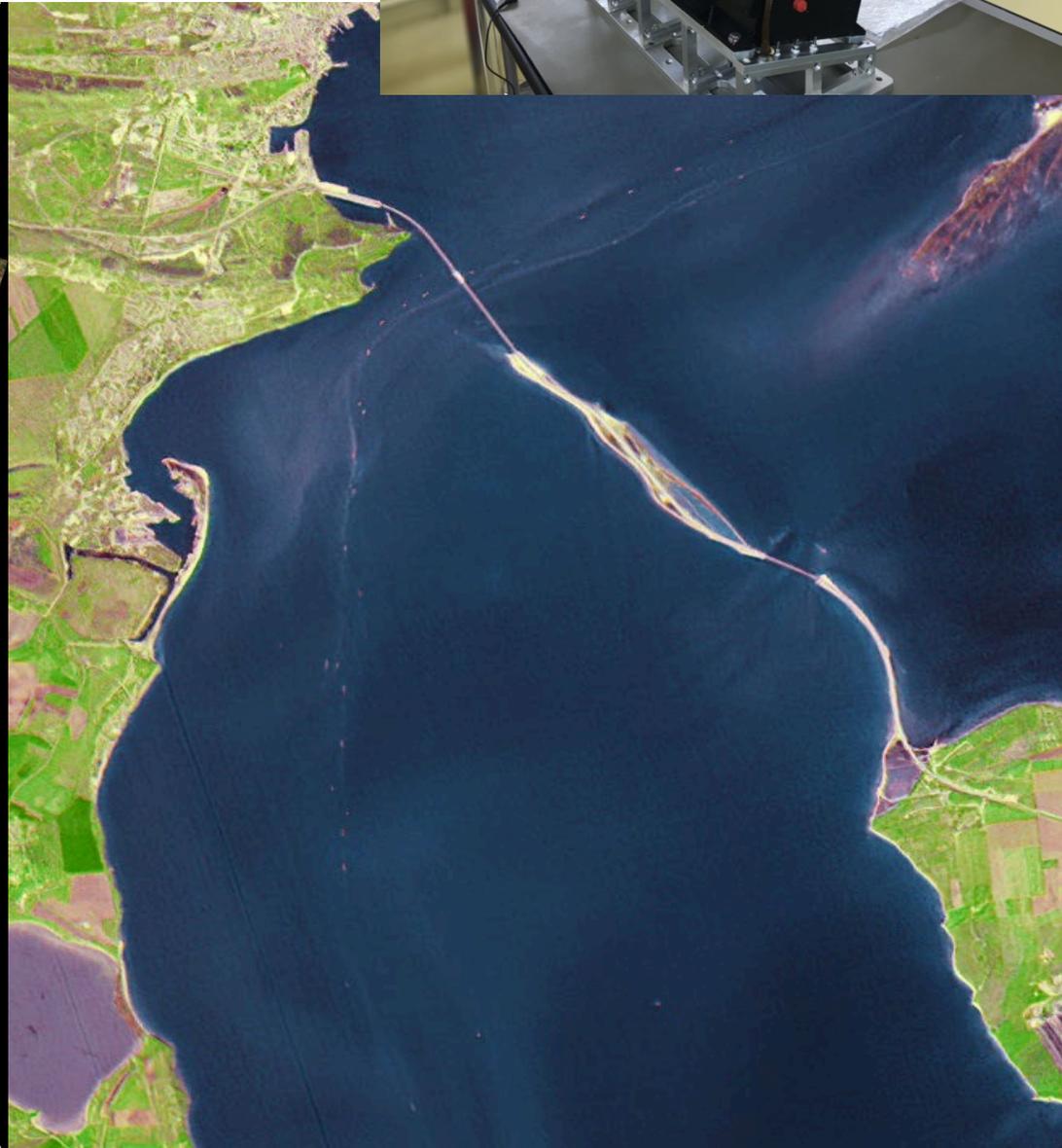
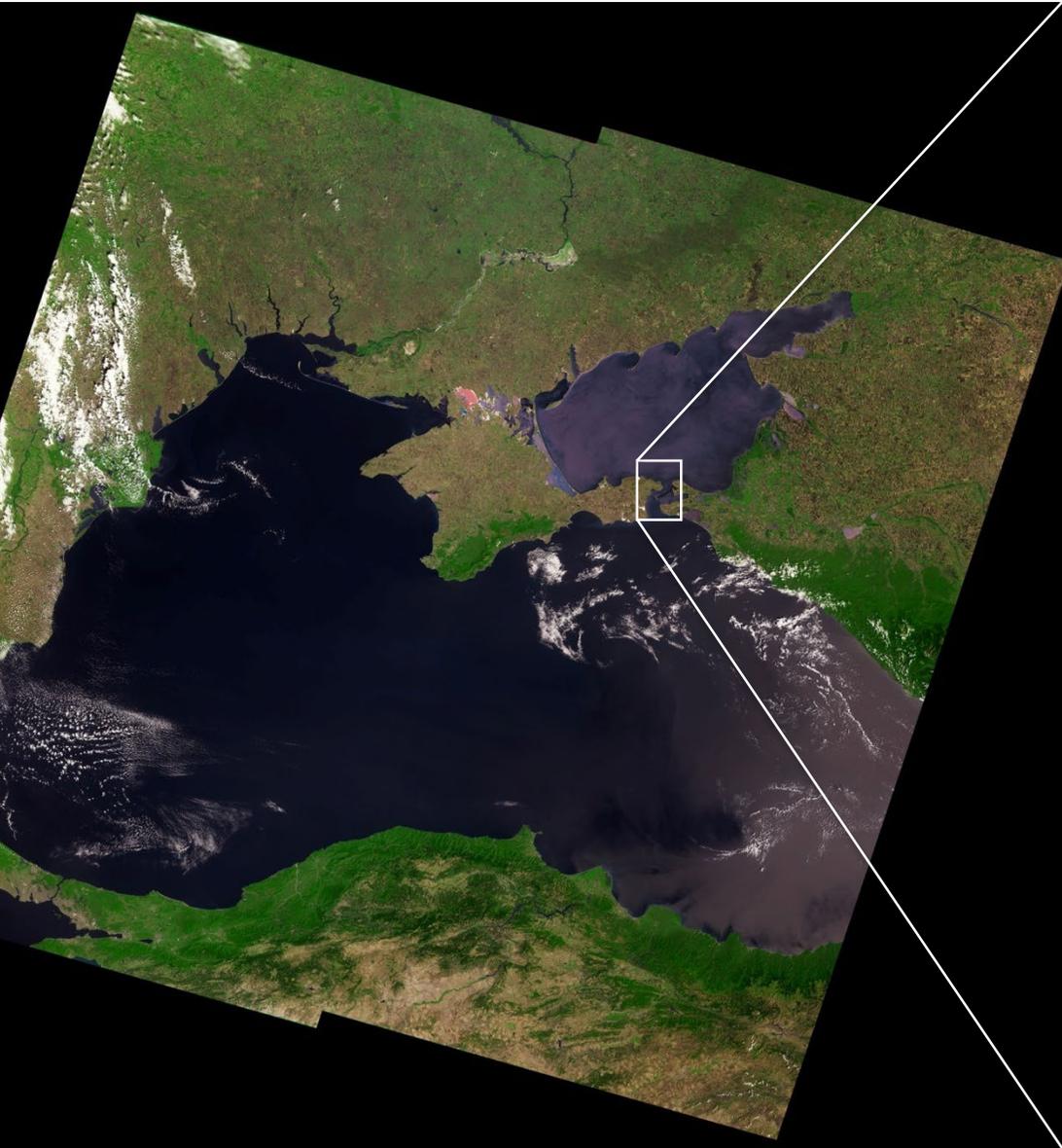


Модельные (LOLA256P) изображения Луны при съемке ШНК (поле зрения 180°) с высоты 100 км на широтах 0, 25, 50 и 75° ю.ш. и детектированные по ним дуги горизонта

- СКО погрешности определения координат подспутниковой точки 2-5 км.
Максимальная погрешность 3-9 км.
- СКО погрешности определения координат высоты орбиты ~ 2 км.
Максимальная погрешность ~ 3 км.

Пример изображения КМСС-М

- Захват 950 км
- Разрешение 60 м
- Съемка 150 млн. кв. км в год
- Работа на КА серии «Метеор-М» с 2009 года



Навигация по контрольным точкам на орбите вокруг Земли

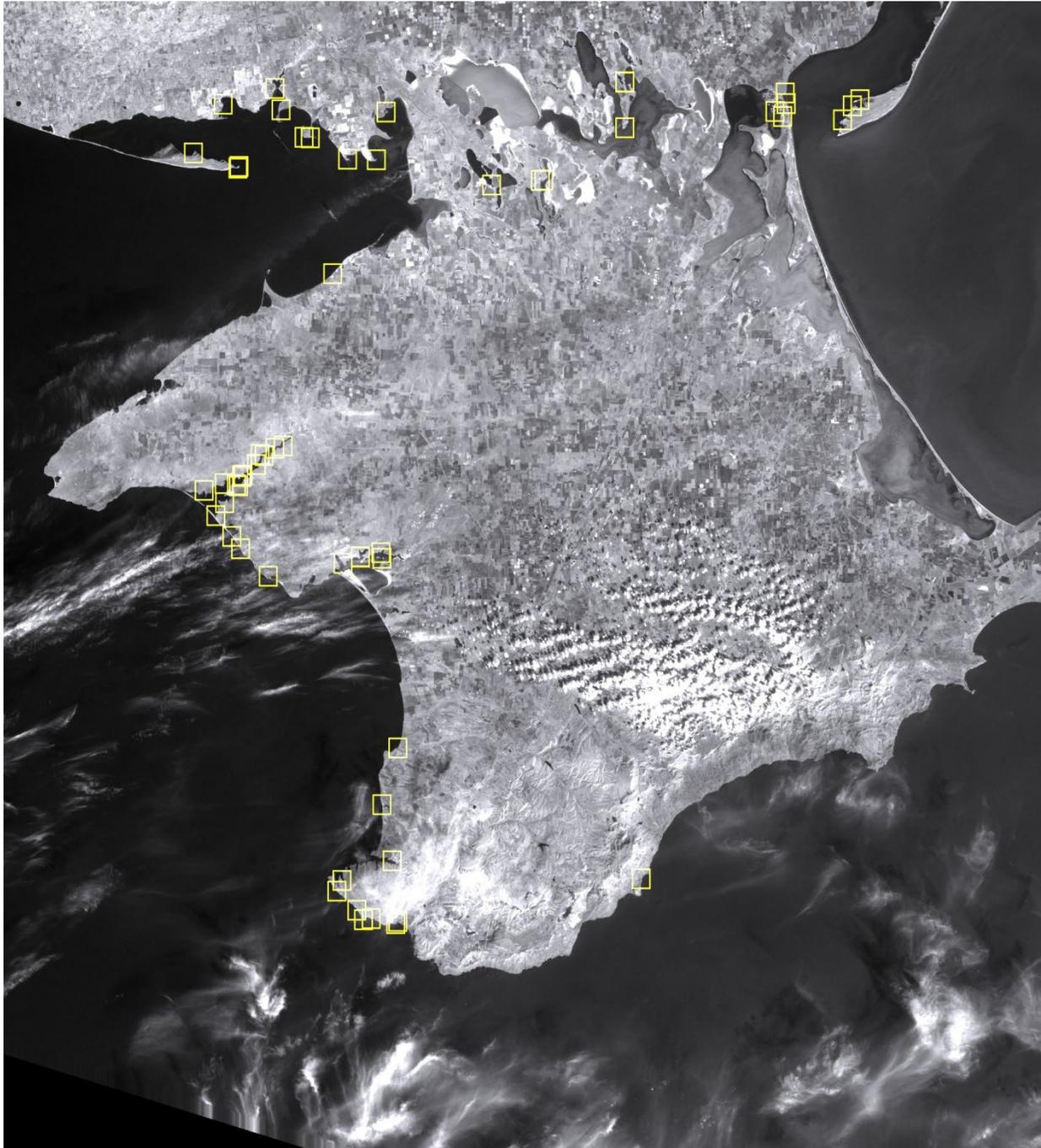


Ошибки оценки положения КА:

- по широте: 34.8 м
- по долготе: 22.7 м
- по высоте: 733 м
- кол-во КТ: 103

Модельное (КМСС) изображение Каховского водохранилища, УНК с полем зрения 18° (H = 820 км)

Навигация по контрольным точкам на орбите вокруг Земли

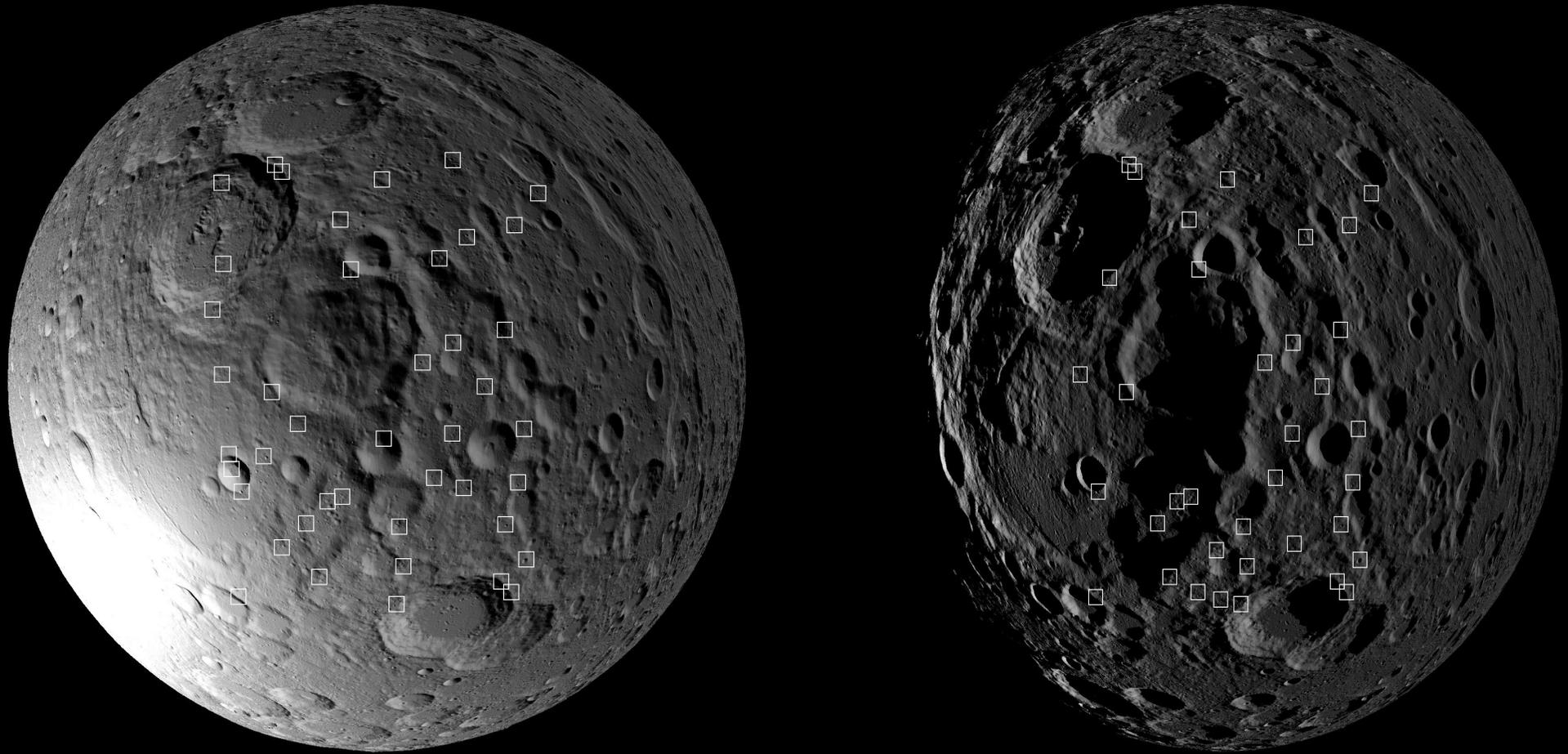


Ошибки оценки положения КА:

- по широте: 21.5 м
- по долготе: 5.6 м
- по высоте: 564 м
- кол-во КТ: 64

Модельное (КМСС) изображение Крыма, УНК с полем зрения 18° (H = 820 км)

Навигация по контрольным точкам на орбите вокруг Луны

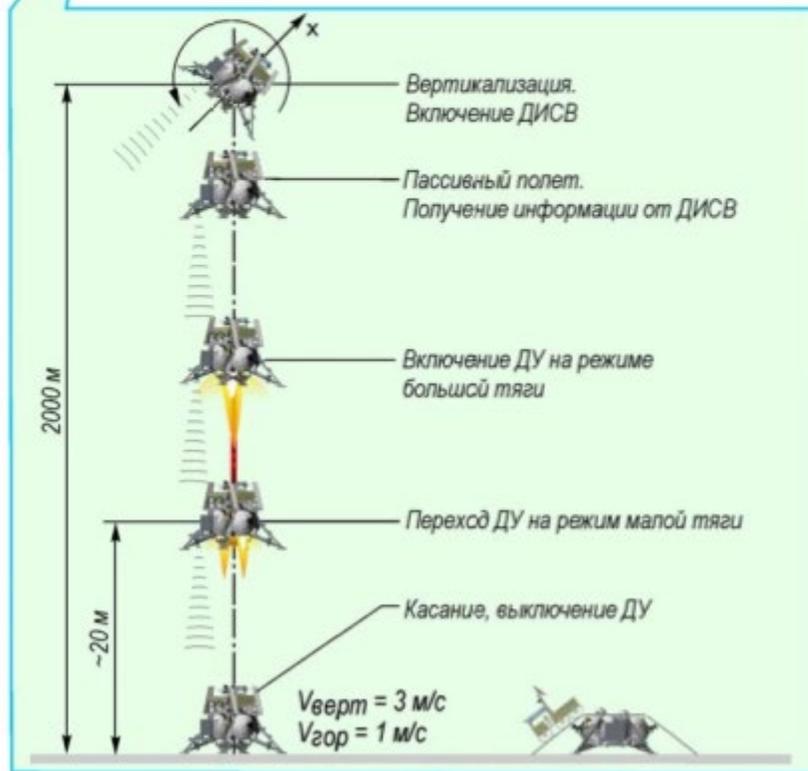
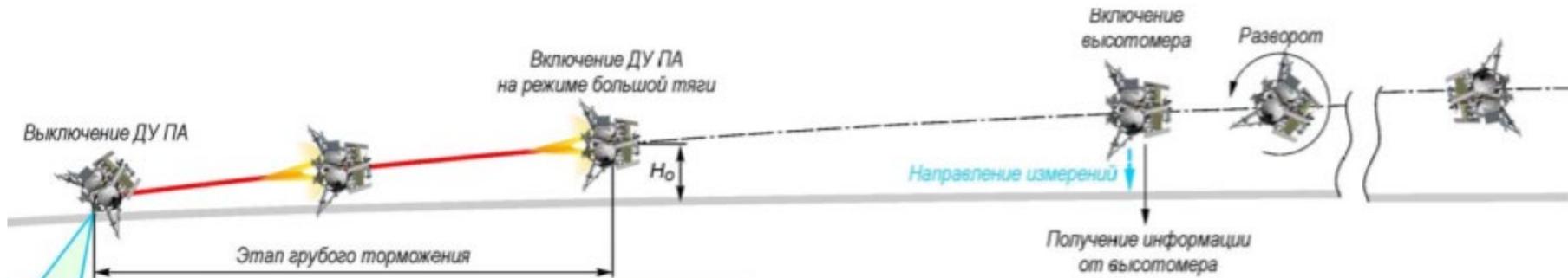


Модельные (LOLA256P) изображения Луны при съемке ШНК (поле зрения 180°) с высоты 100 км

- высота Солнца в подспутниковой точке 30° , ошибки оценки положения КА: по широте – 2.0 м, по долготе – 11.9 м, по высоте – 60.1 м
- высота Солнца в подспутниковой точке 7° , ошибки оценки положения КА: по широте – 0,7 м, по долготе – 29.3 м, по высоте – 18.1 м

Задачи автономной оптической навигации при посадке на Луну. «Луна-27»

- На траектории подлета к месту посадки – уточнение траектории снижения для приведения КА к району посадки с точностью ~100 м.
- На заключительном этапе снижения (вертикальном спуске) – выбор безопасной площадки и резервирующие измерения горизонтальной скорости КА (в дополнение к измерениям высоты, вертикальной и горизонтальной скорости ДИСД).

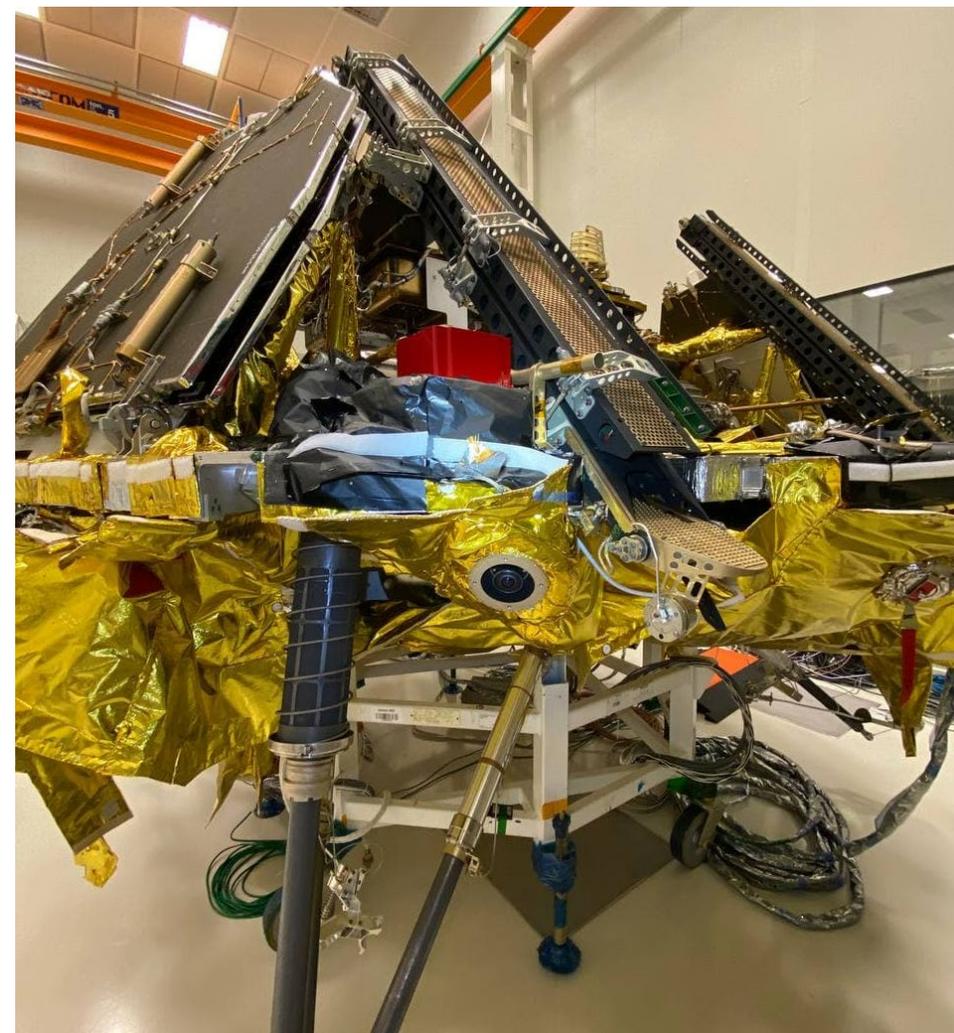


Научные результаты

Разработаны методы и алгоритмы построения сферических HDR видеопанорам, и проведения стереоизмерений координат и траекторий объектов при мультикамерной съемке, что позволяет создавать системы технического зрения широкого спектра применения

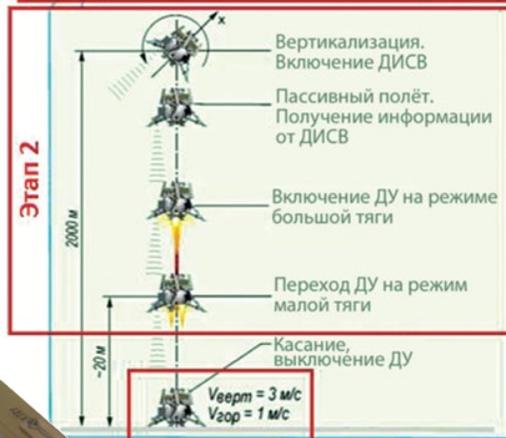
Практические результаты

- ✓ Созданы системы технического зрения для миссий «Луна-25», «ЭкзоМарс», «Луна-27».
- Системы решают задачи съемки сферических видеопанорам и стерео съемки в режиме HDR
- ✓ Единственные фотографии с миссии «Луна-25» получены съемочной системой ИКИ РАН

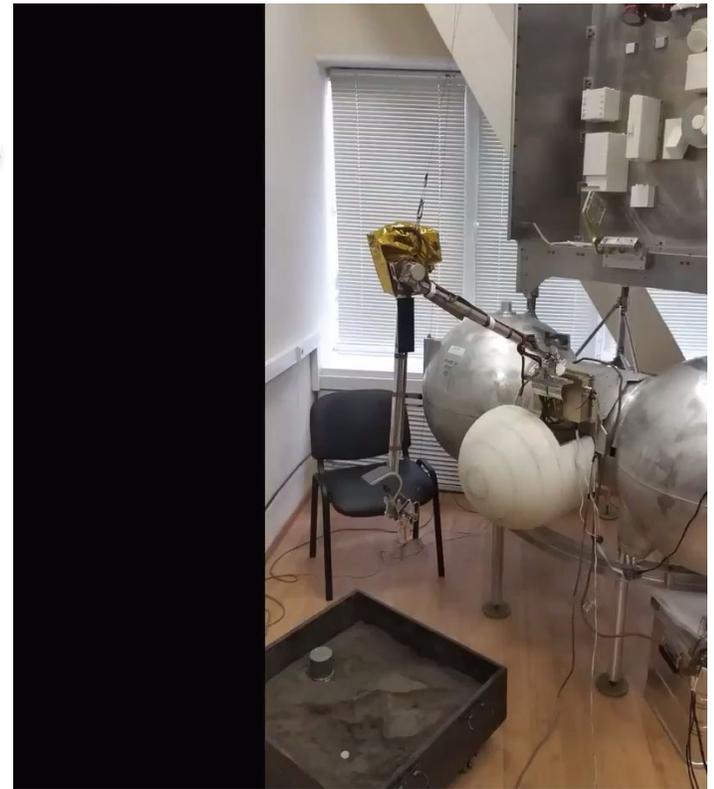


Система технического зрения «СТС-Л» для «Луна-25» и «Луна-27»

- Съёмка видеоряда обзорной камерой КАМ-О на этапе горизонтального полета (этап 1)
- Съёмка видео панорамы (4 КАМ-О) и стерео видеосъёмка (2 КАМ-С) этапа вертикального спуска (этап 2)
- Съёмка HDR-панорам лунного дня после посадки (этап 3)
- Поддержка работы манипулятора (этап 3)



Этап 3



Блок сбора данных
СД



Обзорные камеры
4 x КАМ-О

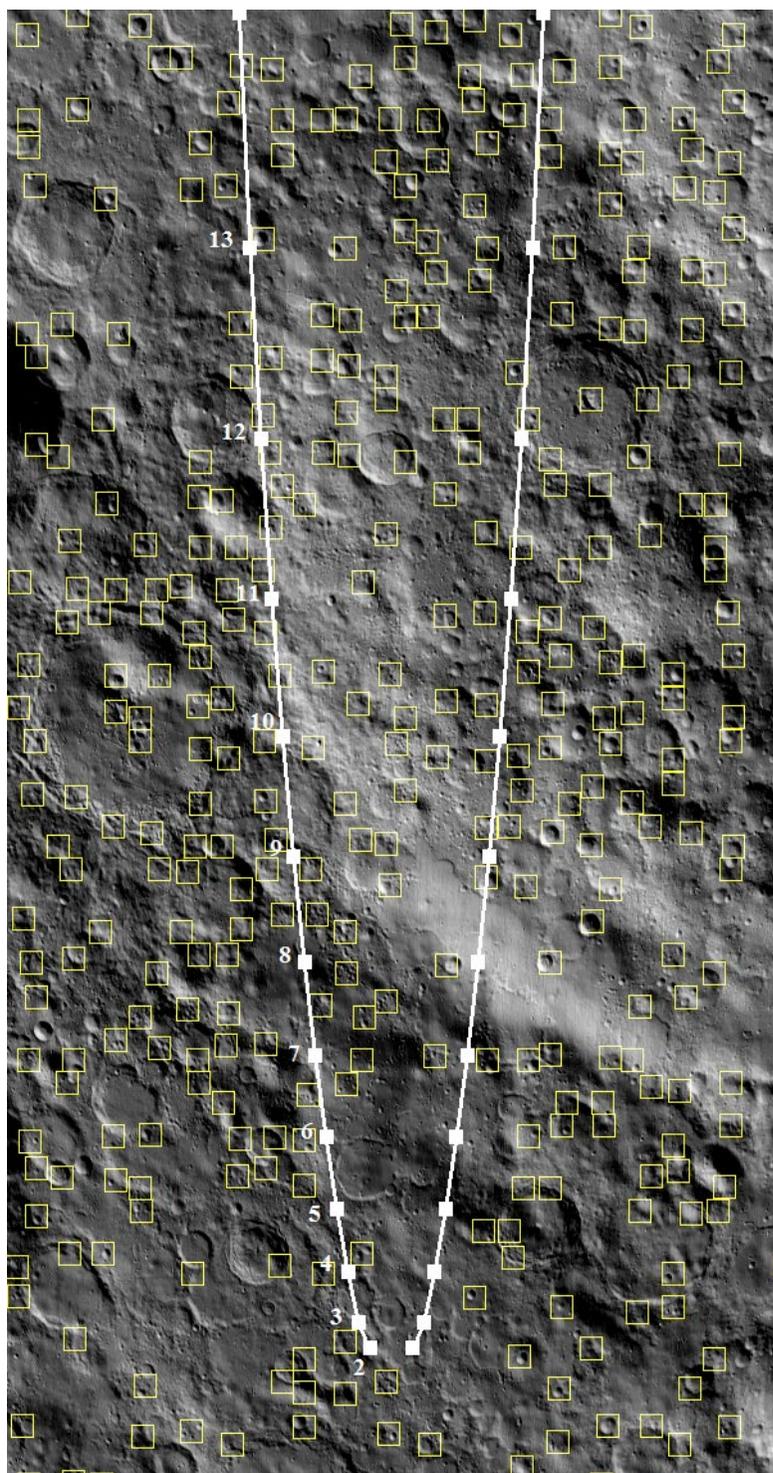
Поле зрения 135 град



Стерео камеры
4 x КАМ-С

Поле зрения 50 град

Система автономной оптической навигации при посадке «Луна-27»



✓ Разрабатывается система автономной оптической навигации для высокоточной безопасной посадки миссии «Луна-27»

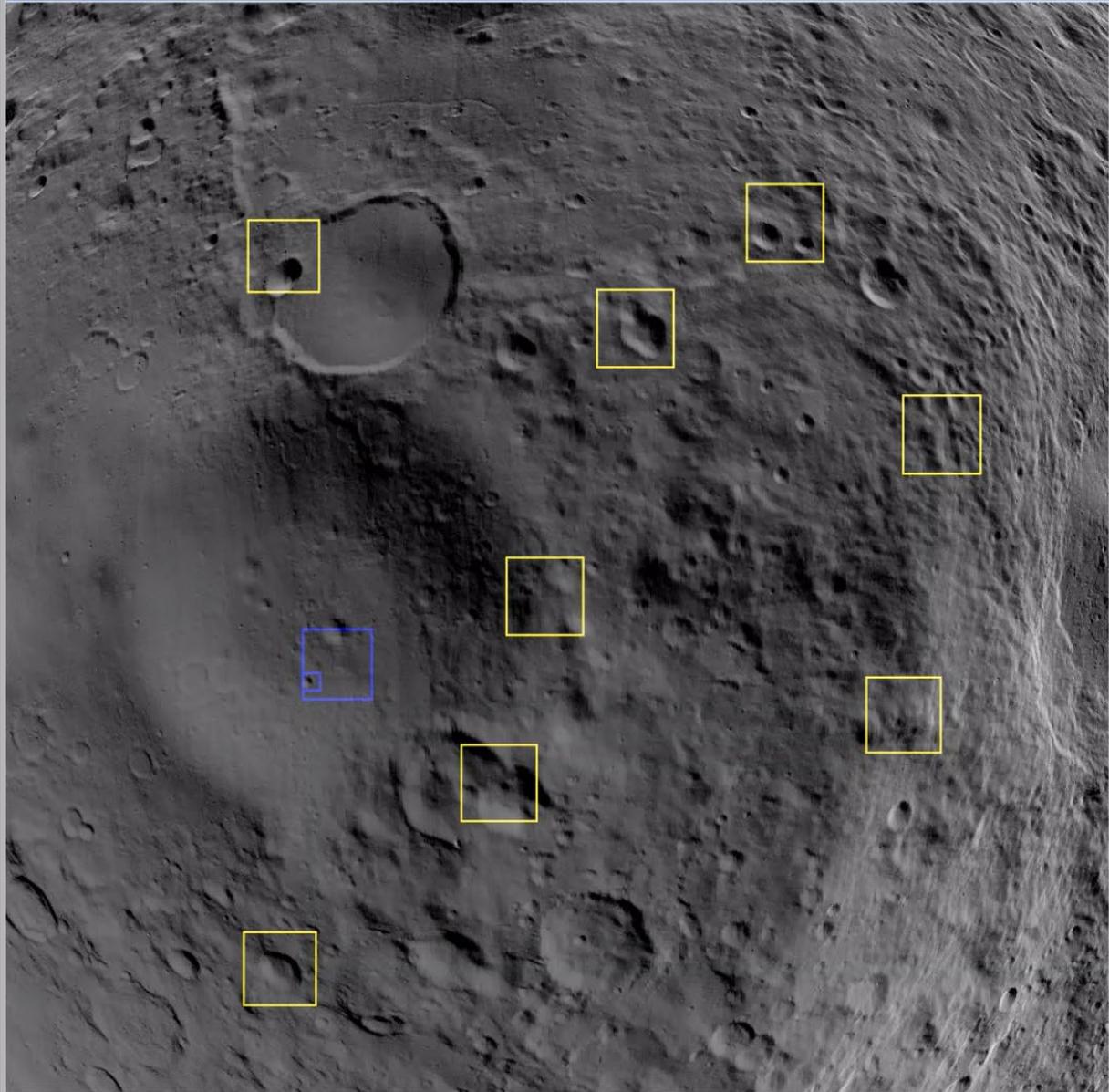
✓ Карта ориентиров построена на основании LOLA256P (разрешение 118 м): не менее 2 КТ попадает в поле зрения $\pm 45^\circ$ до высоты ~ 7 км



Практические результаты

Для орбитальной миссии «Луна-26» создана стереосистема, по снимкам которой должна быть построена топографическая карта Луны с разрешением 5–10 м, что более чем на порядок лучше существующей топографической модели Луны LOLA256P, полученной с помощью аппарата NASA LRO





Каталог 256P

Интервал, с

1

Stop

Finish

Running...

```
it = 31
lat_sc0, deg = -59.391138
lon_sc0, deg = 43.5721
Hsc0, m = 17299.0

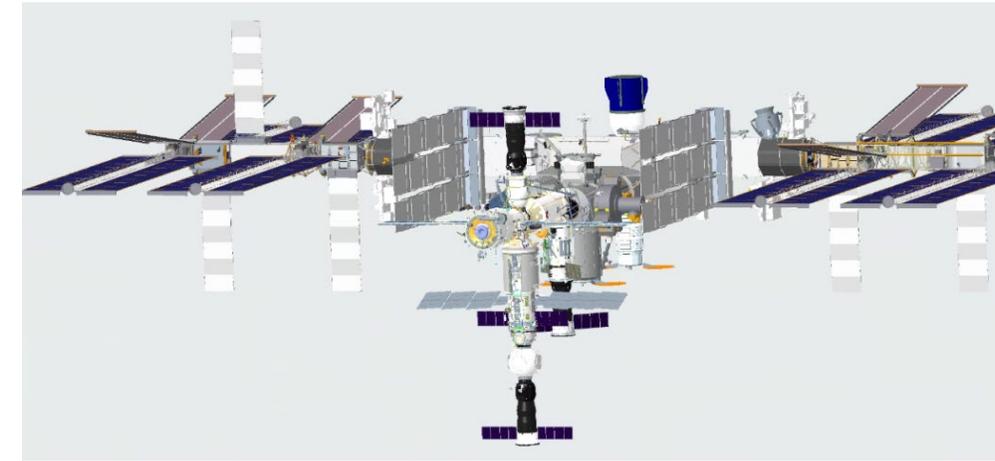
defined = 1
np = 8
np1 = 0
lat_sc_est, deg = -59.391588
lon_sc_est, deg = 43.574002
Hsc_est, m = 17254.9

dlat, m = -13.6
dlon, m = 29.4
dHsc, m = -44.1
```

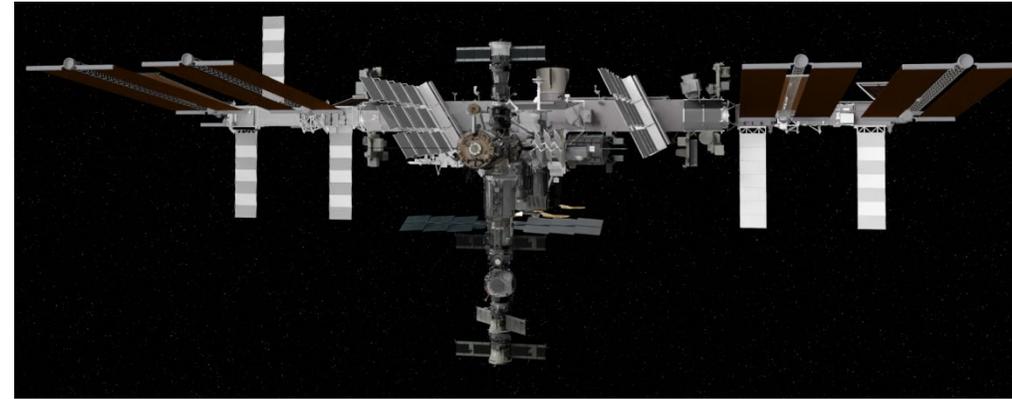
Научные результаты

Разработаны методы и алгоритмы решения задачи относительной навигации с некооперируемым космическим аппаратом (без специальных мишеней)

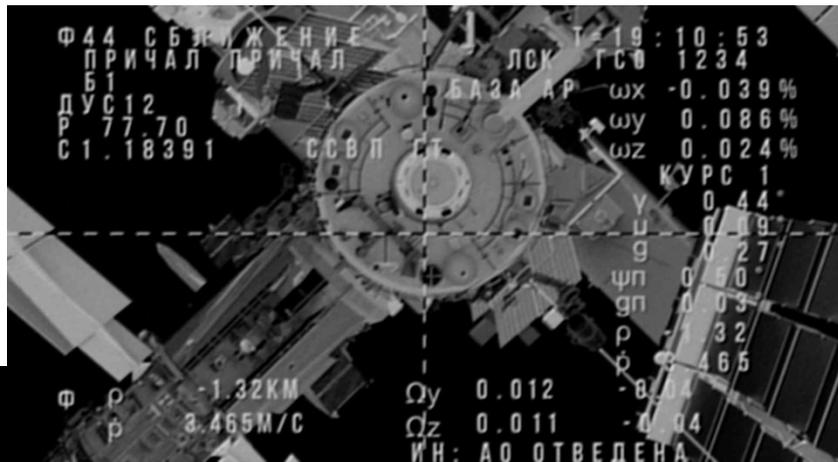
3D-модель МКС



Прорисовка текстур и материалов



Наложение фона, света, шума камеры. Обучение нейронной сети



Мультикамерные системы для измерения положения и траектории движения объектов

**Благодарю
за внимание**