



# **Комплекс многозональной спутниковой съёмки на КА «Метеор-М»: особенности съёмочной аппаратуры, получения и предварительной обработки данных**

Полянский И. В.

Институт космических исследований РАН

2015

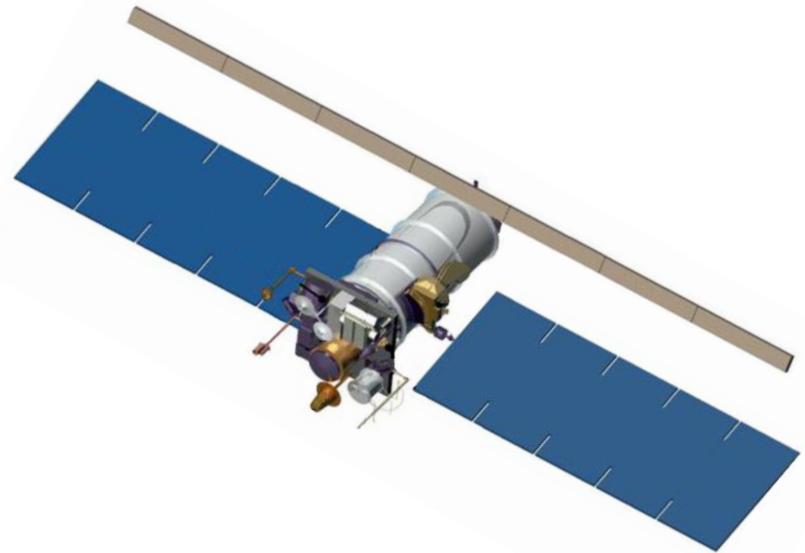
# Космический аппарат «Метеор-М»

## Назначение

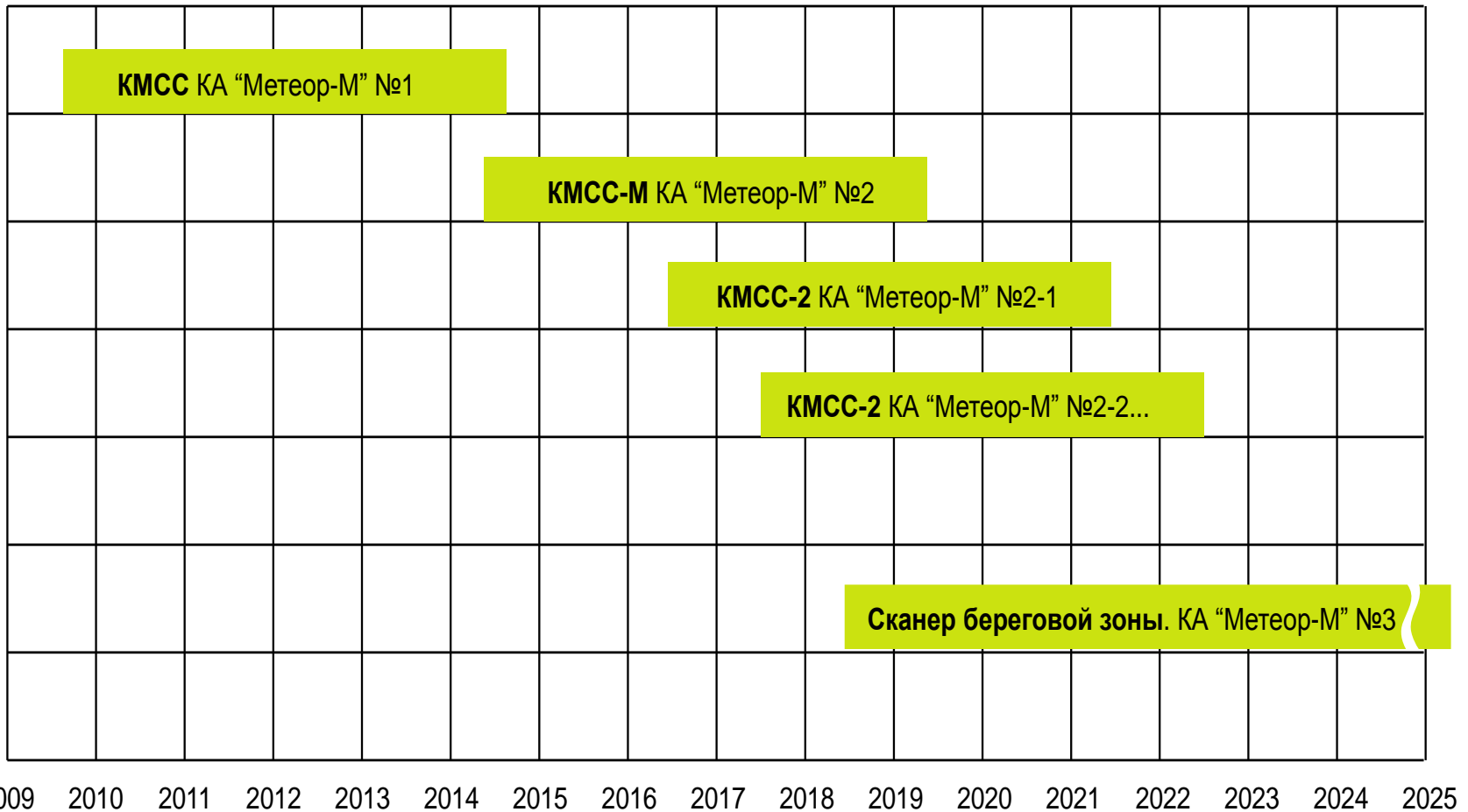
- получение исходных гидрометеорологических данных в глобальном масштабе для составления прогнозов погоды;
- контроль опасных погодных явлений и предупреждение об их приближении;
- контроль климатообразующих факторов и мониторинг изменений, происходящих на Земле;
- контроль радиационной и гелиогеофизической обстановки в околоземном космическом пространстве.

## Основные параметры КА

Масса	2357 кг
Рабочая орбита	ССО
• высота	830 км
• наклонение	98.8 град.
Точность ориентации	0,1 град.
Средства выведения	Союз-2/«Фрегат»
Срок активного существования	5...7 лет
Дата запуска	17.09.2009 г. №1 08.07.2014 г. №2



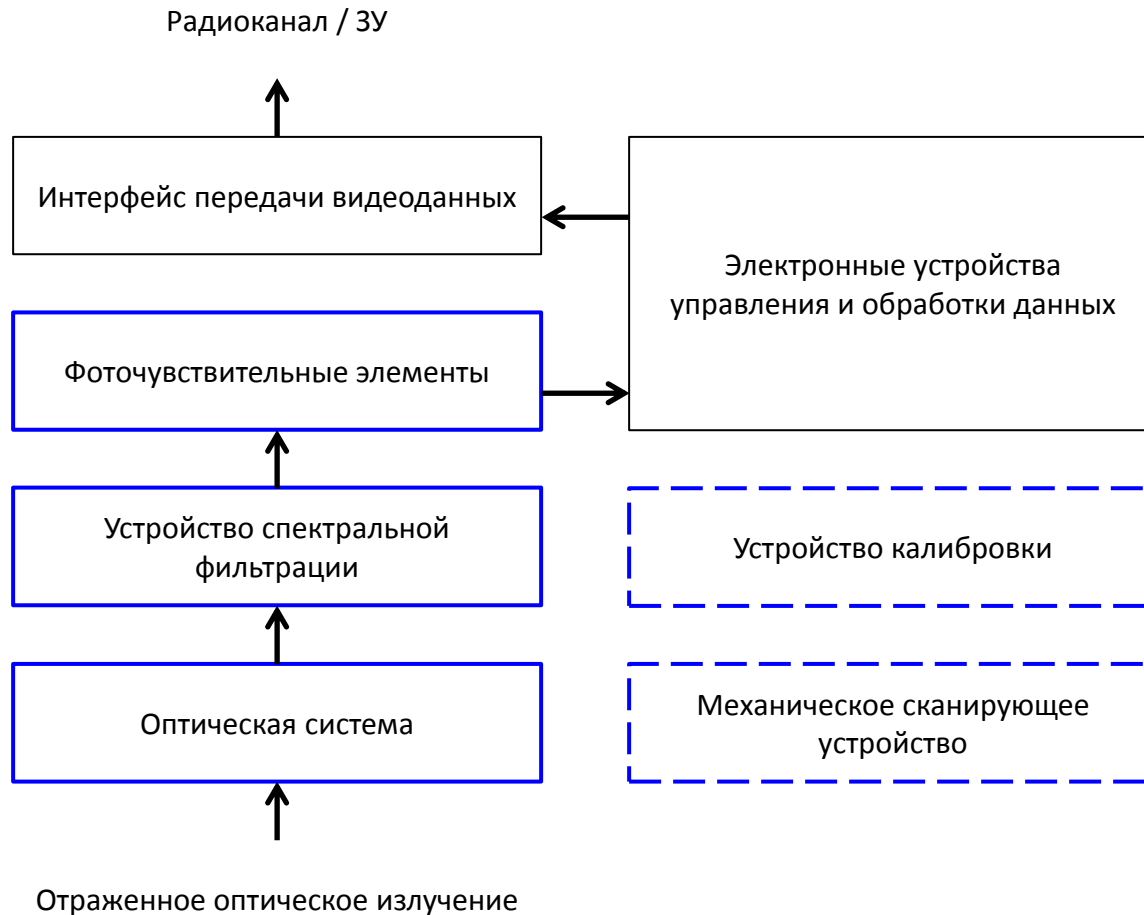
# Применение аппаратуры КМСС в составе космического комплекса «Метеор-3М»



# Ключевые моменты проектирования бортовой аппаратуры ДЗЗ

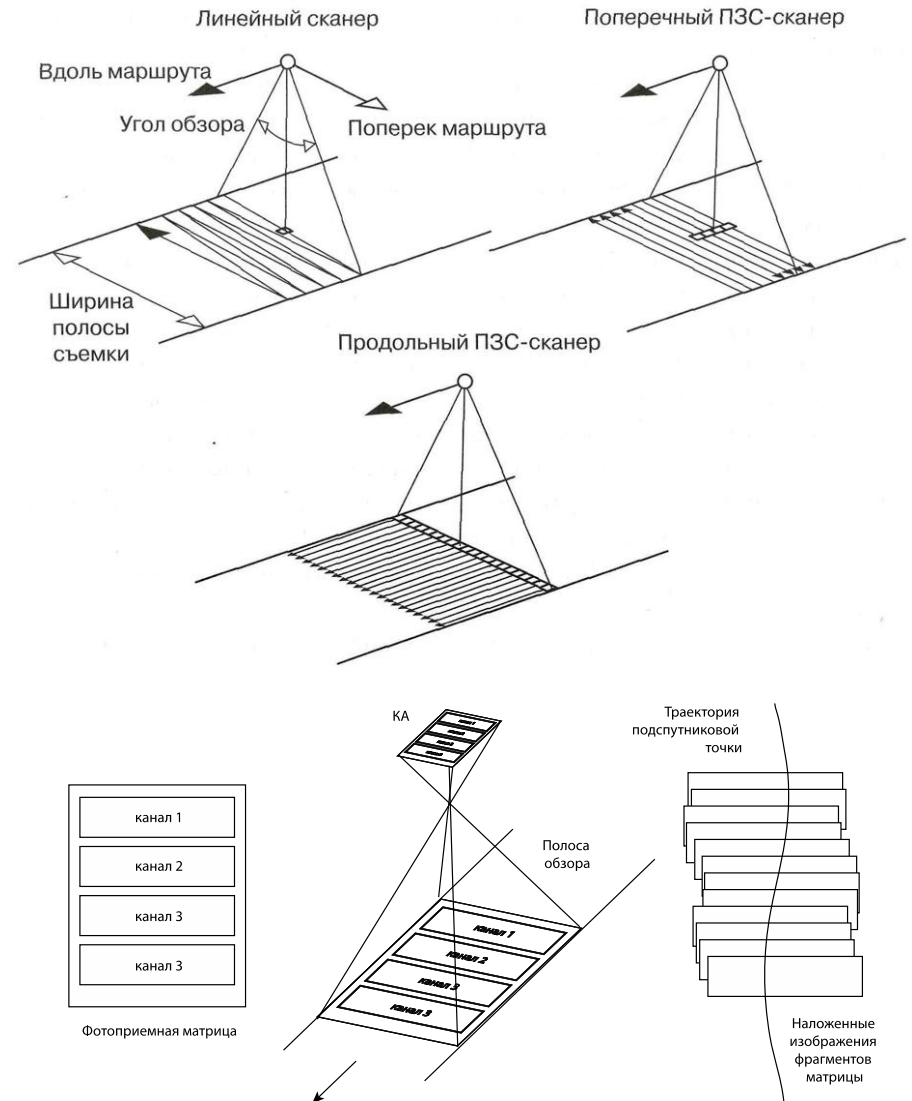
- Обеспечение съемки в широкой полосе захвата в нескольких спектральных каналах.
- Обеспечение максимальной детальности регистрируемых изображений в сочетании с широкой полосой съемки и с учетом ограниченной информационной емкости радиоканала.
- Обеспечение оптимального радиометрического разрешения и динамического диапазона цифровых изображений, определяемых целевыми задачами.
- Обеспечение стабильности характеристик съемочной аппаратуры при эксплуатации.
- Обеспечение надежности и срока службы съемочной аппаратуры.

# Обобщенная схема построения бортовой аппаратуры ДЗЗ

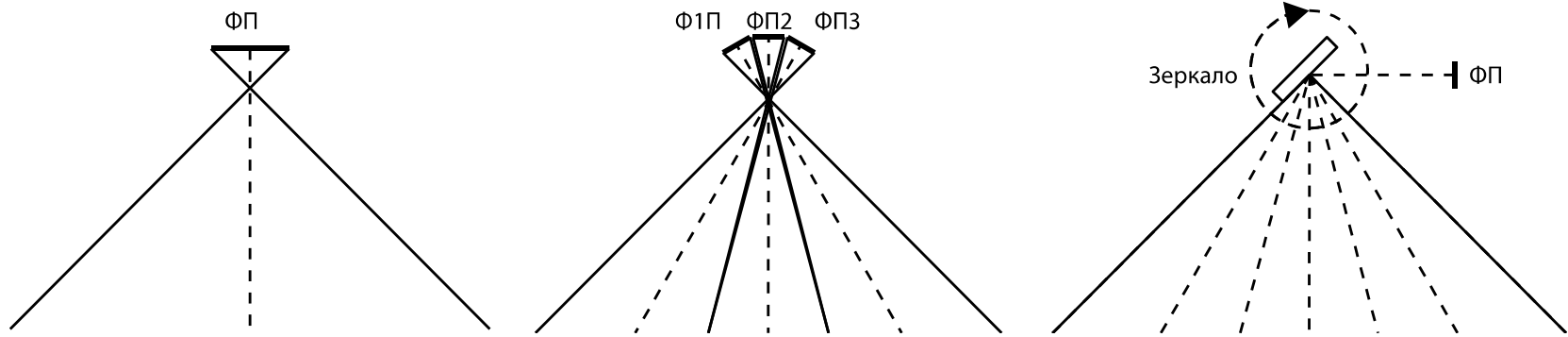


# Методы съемки, применяемые в аппаратуре ДЗЗ

- Поперечное сканирование одно- или многоэлементным датчиком изображения (whisk-broom);
- Продольное сканирование многоэлементным линейным датчиком изображения (push-broom);
- Продольное сканирование многоэлементным площадным датчиком изображения (push-frame);

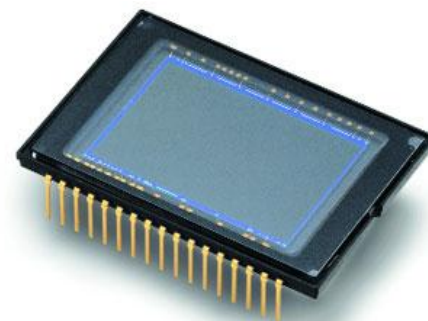
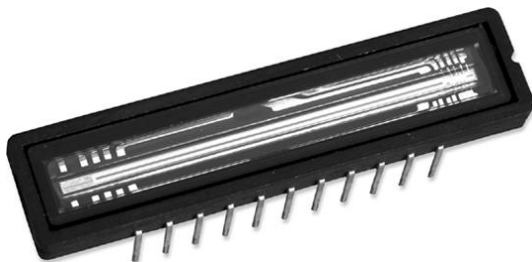
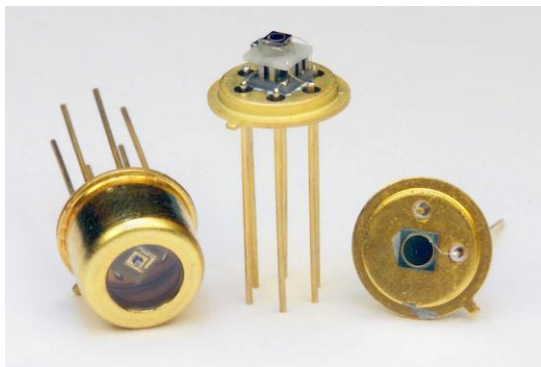


# Съемка в широкой полосе захвата



	Сверхширокоугольный объектив	Несколько широкоугольных объективов	Механическая поперечная развертка
+	Простота	Простота, стоимость	Любой угол, калибровка
-	Неравномерное пропускание и освещенность, хроматизм, ...	Перспективные искажения, невозможность или сложность калибровки	Наличие подвижных элементов, высокая скорость бега изображения
?	Не применимо	Применимо в мониторинговых СС	Применимо в радиометрических СС. низкого разрешения
М	--	push-broom	whisk-broom

# Фоточувствительные элементы



	Фотодиоды	Линейки ПЗС	Матрицы ПЗС со строчным переносом
+	Чувствительность, стабильность	Чувствительность, информативность	Информативность, скорость
–	Очень высокая скорость бега изображения	Практически нет	Низкая чувствительность, неравномерность переноса, нестойкость
?	Применимо в радиометрических СС низкого разрешения	Широко применимо	Применимо в мониторинговых СС
М	Whisk-broom	Push-broom, whisk-broom,	Push-frame



# Назначение и состав КМСС-М

- Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС-М) предназначен для получения изображений суши и водной поверхности в шести зонах видимого и ближнего ИК диапазонов спектра электромагнитных волн в полосе захвата 900 км с пространственным разрешением от 60 м.
- Целевое назначение аппаратуры – оперативный мониторинг состояния земной поверхности с целью обнаружения и контроля состояния природных и техногенных процессов и объектов в широкой полосе наблюдения.
- Принцип действия основан на построчной регистрации движущегося оптического изображения посредством трех линейных чувствительных элементов на ПЗС.
- В состав КМСС-М входят:
  - Два МСУ-100М (КАМ201 и КАМ202),
  - Один МСУ-50М (КАМ250).





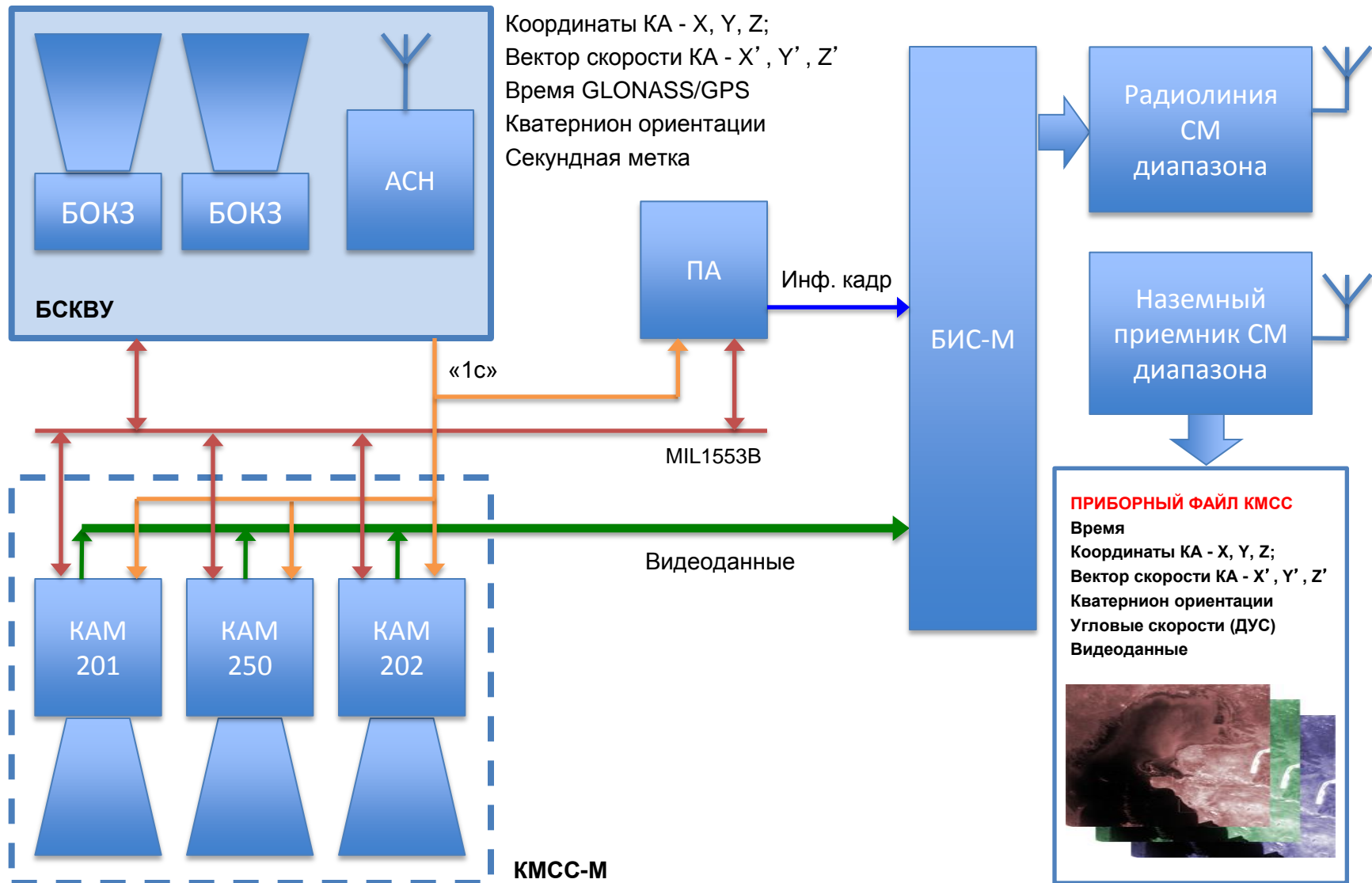
# Основные ТТХ КМСС-М

Параметры / Камера	МСУ-100М	МСУ-50М
Датчик изображения	3 линейных ПЗС	
Число элементов в строке	7926	
Фокусное расстояние, мм/отн. отверстие объектива	100/5	50/6
Захват, км (H = 830 км)	480 x 2	927
Разрешение на поверхности, м (H = 830 км)	60	120
Спектральные зоны, нм	535-575 630-680 700-900	370-450 450-510 580-690
Частота строк, Гц	156,25	
Информационный поток, Мбит/сек	30	
Разрядность изображения, бит	8	

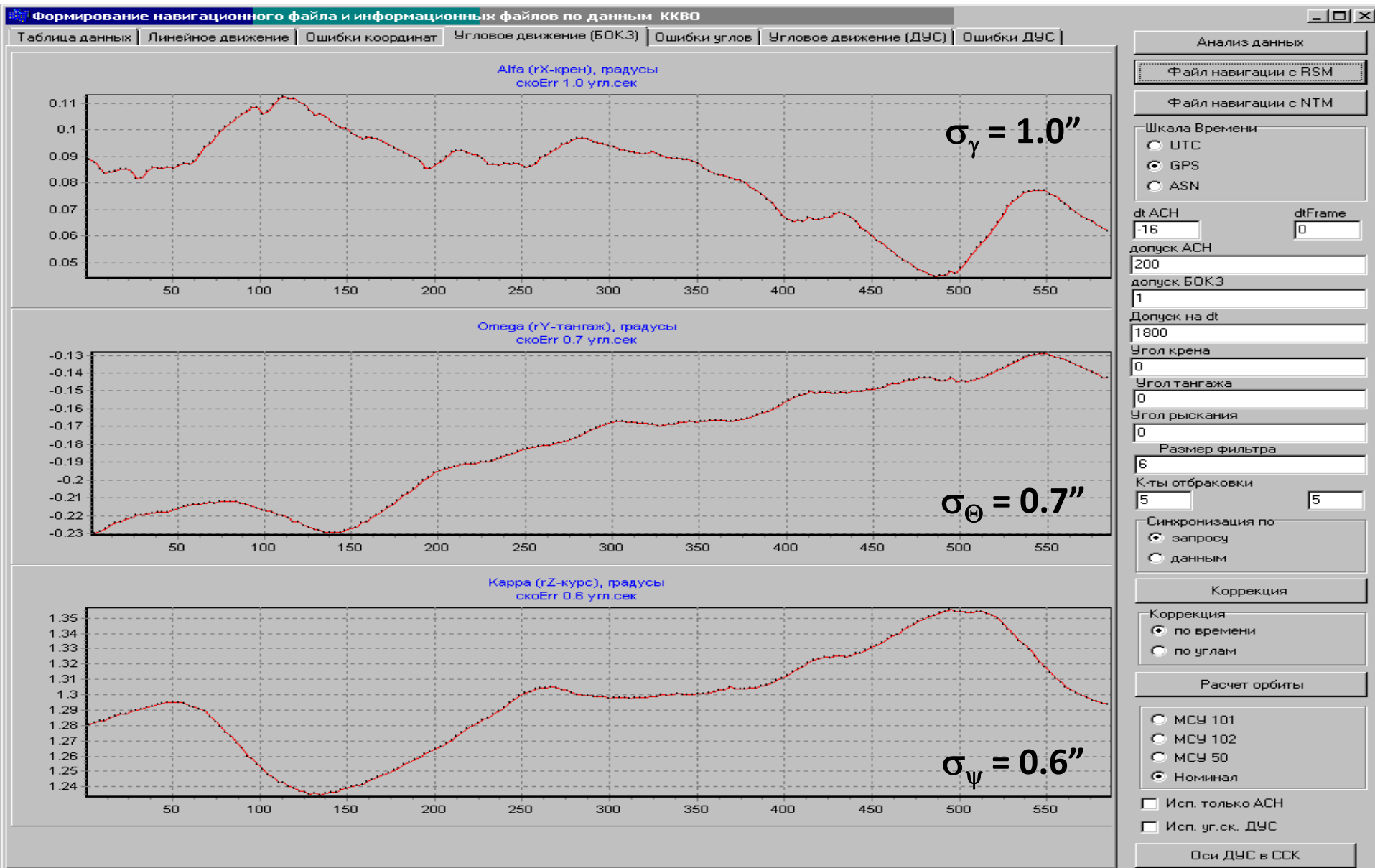
# Результаты опытной эксплуатации КМСС на КА Метеор-М №1

- Комплекс успешно функционирует начиная с 10.2009 в штатном режиме эксплуатации.
- Площадь ежесуточно снимаемой территории (Европейская часть РФ, Сибирь, Дальний Восток) составляет до 35 млн. кв. км, объем передаваемой информации – до 50 Гбайт.
- Основные области применения целевых данных:
  - Мониторинг ледовой обстановки
  - Контроль состояния и динамики снежного покрова
  - Наблюдение чрезвычайных ситуаций и их экологических последствий: лесные пожары, паводки и наводнения, атмосферные катастрофические явления, извержения вулканов, крупные антропогенные катастрофы.
  - Контроль состояния и динамики лесного покрова, нелегальные вырубki,
  - Мониторинг процессов опустынивания и обезлесивания

# Схема координатно-временного обеспечения на КА «Метеор-М» №2



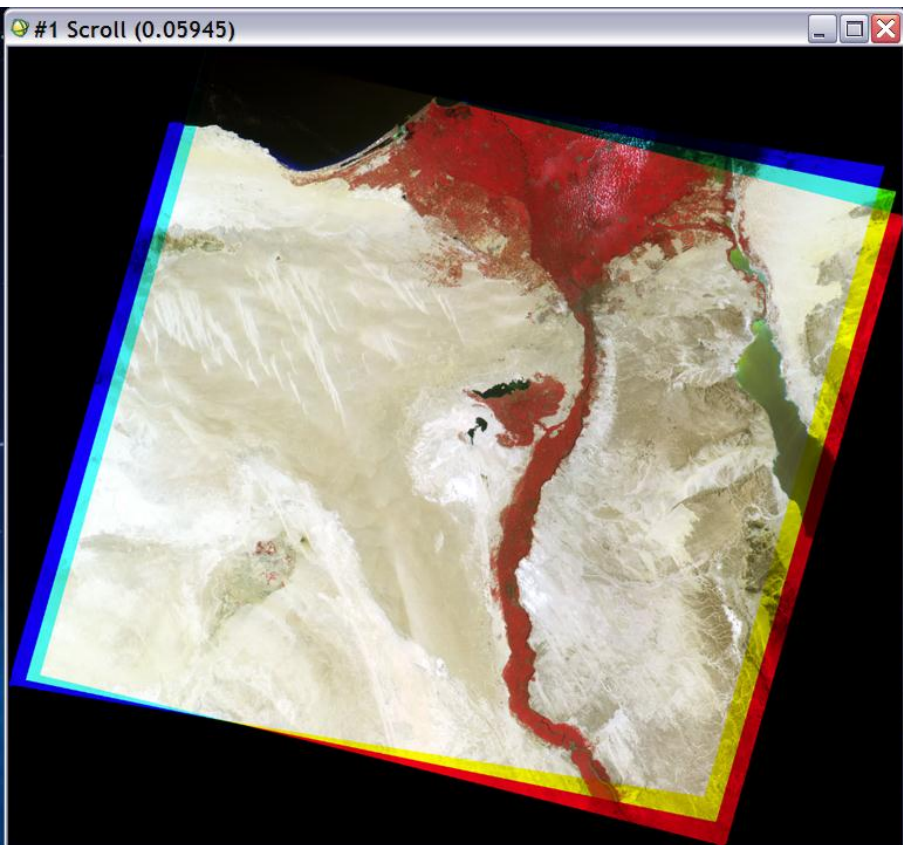
# Работа 2-х БОКЗ-М в составе БСКВУ



# Работы, проводимые в ходе летных испытаний КМСС-М

- Проверки функционирования всех систем и приборов.
- Съёмка полигонных участков – Эгейское море, Египет, Канзас/Оклахома (США), Крым и др.
- Измерение захвата на местности, проекции пиксела, оценка разрешающей способности – проведены предварительные измерения для камер МСУ-100М №2 и МСУ-50М, результаты положительные.
- Набор опорных точек по наземным ориентирам для уточнения матриц перехода от ПСК МСУ к ССК КА и файлов геометрической калибровки.
- Корректировка файлов геометрической калибровки.
- Съёмка полигонов (Ливия, Гренландия и Антарктида) для уточнения радиометрических коэффициентов.

# Тестовый снимок МСУ-100М (№02) (Съемка 521 виток ВИД, сброс 527 виток)



File Type Units Area Options

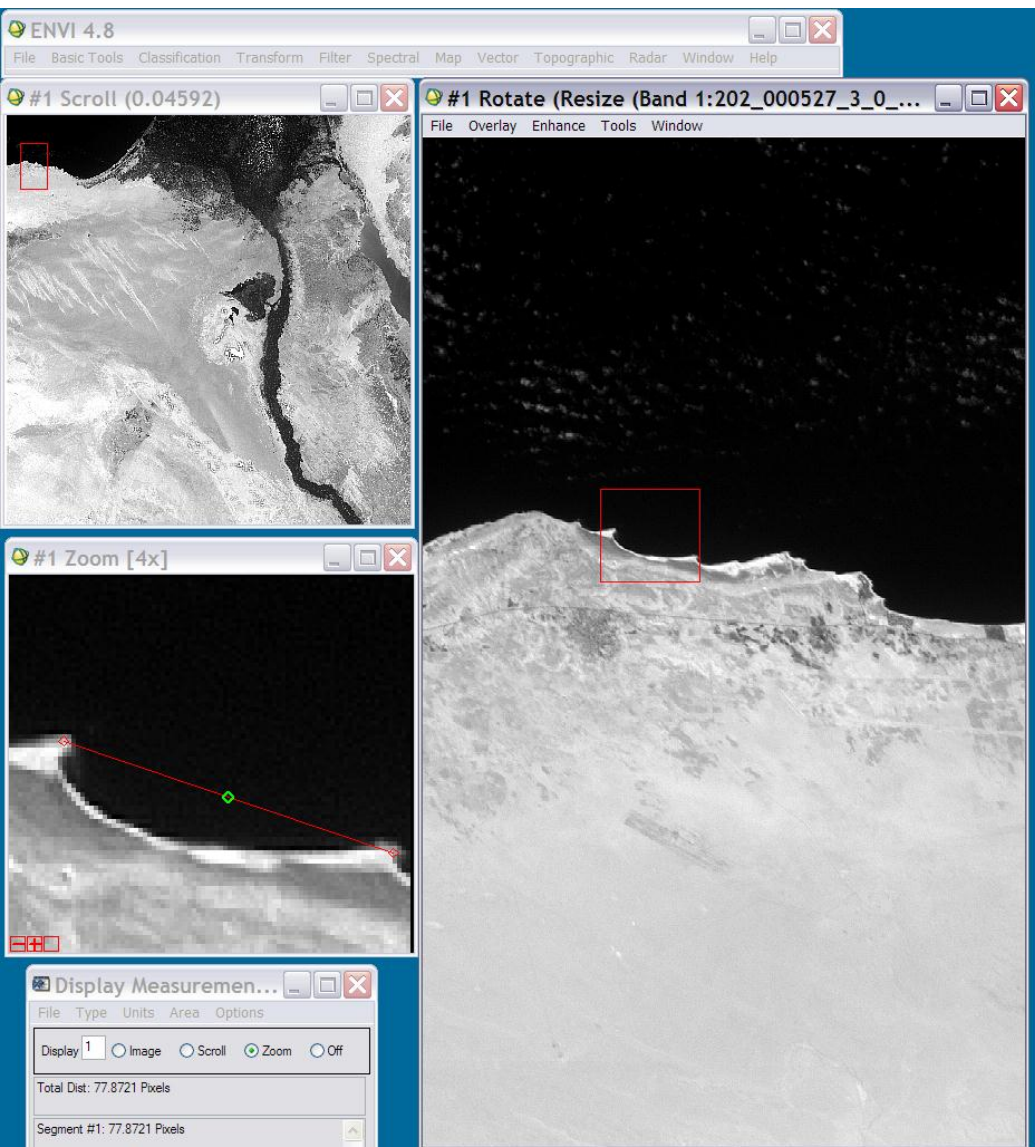
Display  Image  Scroll  Zoom  Off

Vertical scrollbar

Horizontal scrollbar



# Проекция пиксела МСУ-100М (№02) Канал №2, центральный

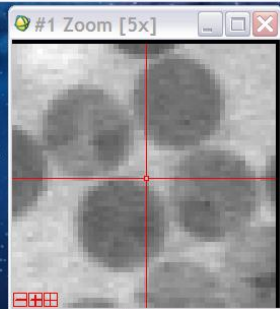


В надире  
(~ 300 пикс. строки)

Расстояние между  
опорными точками  
(по Google Earth)  
~ 4171 м

Дистанция в пикселах  
~ 77,8 пикс.

Размер проекции  
 $4171/77,8 = 53,6 \text{ м}$



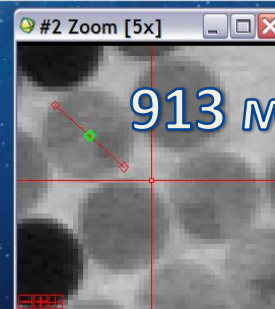
Display Measuremen...

File Type Units Area Options

Display  Image  Scroll  Zoom  Off

Total Dist: 913.4935 Meters

Segment #1: 913.4935 Meters



Линейка

Линия Путь Pro

Измерить расстояние между двумя точками на земле

Длина по карте: 906,31 Метры

Длина по поверхности планеты: 906,33

Направление: 109,89 градусы

Переход с помощью мыши

Сохранить Очистить

Линейка

Линия Путь Pro

Измерить расстояние между двумя точками на земле

Длина по карте: 40,66 Метры

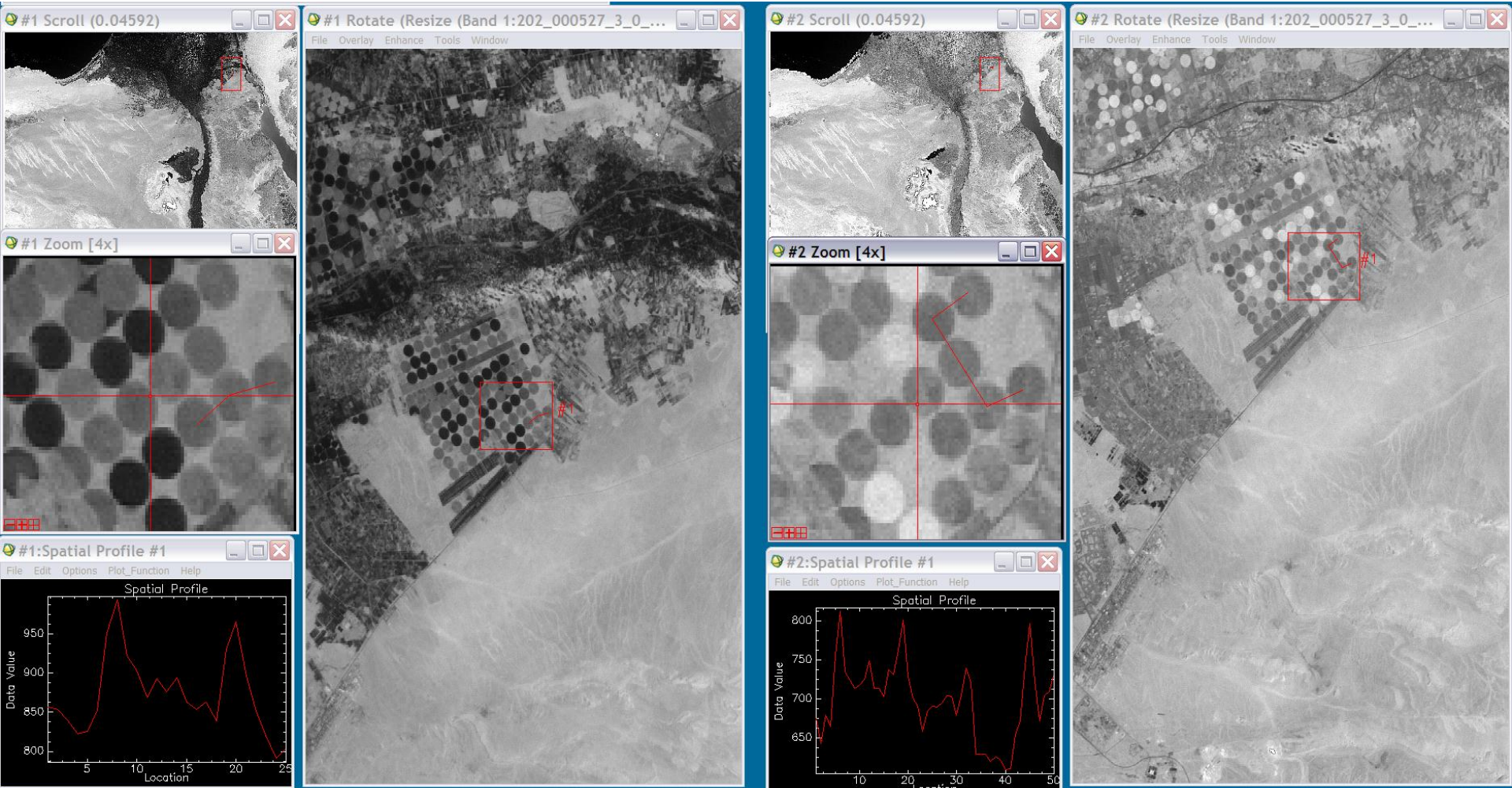
Длина по поверхности планеты: 40,66

Направление: 160,80 градусы

Переход с помощью мыши

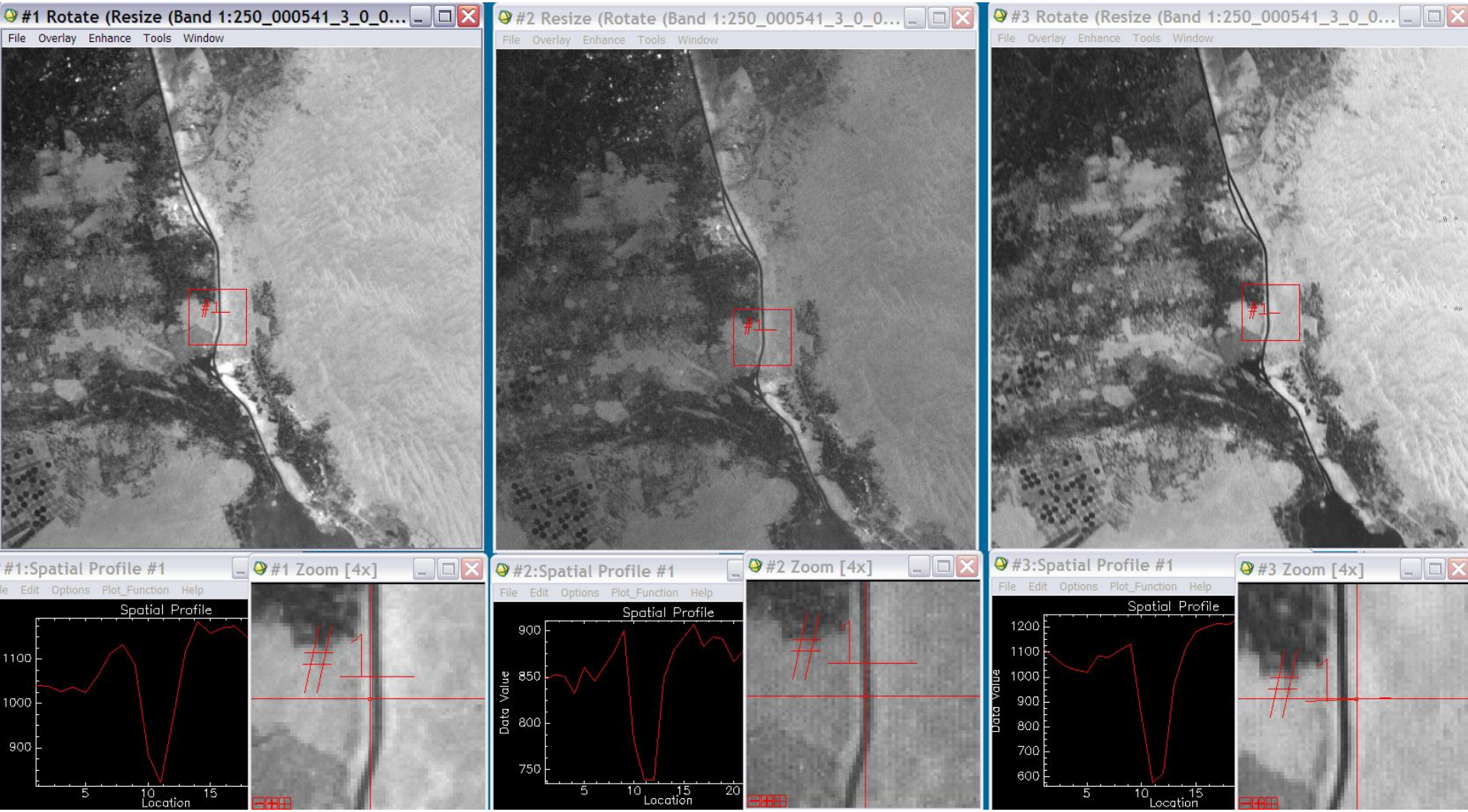
Сохранить Очистить

# Оценка разрешения МСУ-100М (№02)



Расстояние между кругами 50 м, проекция 62 м, Модуляция > 8%

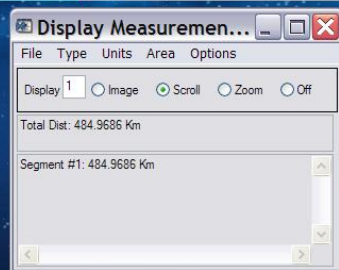
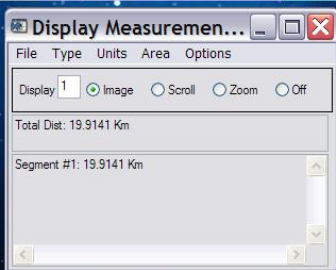
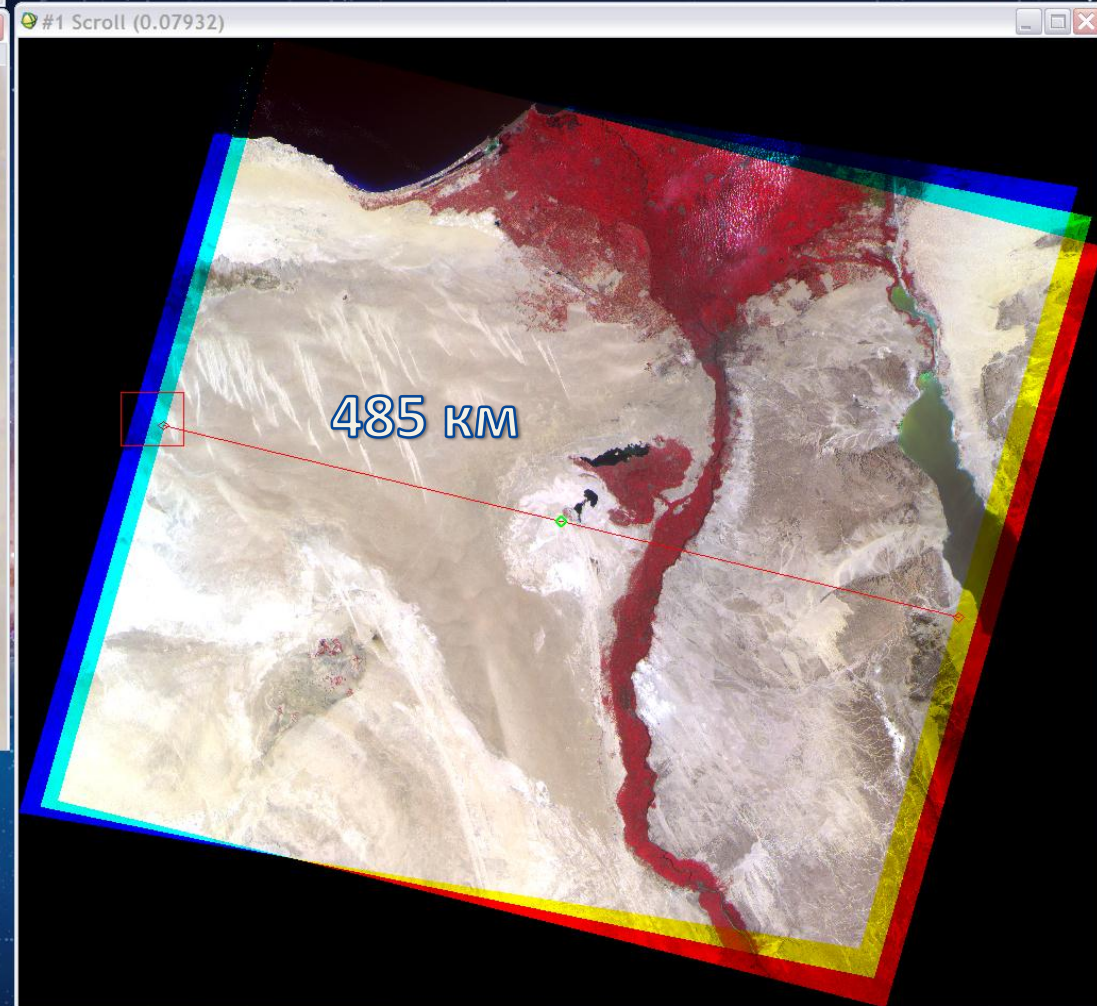
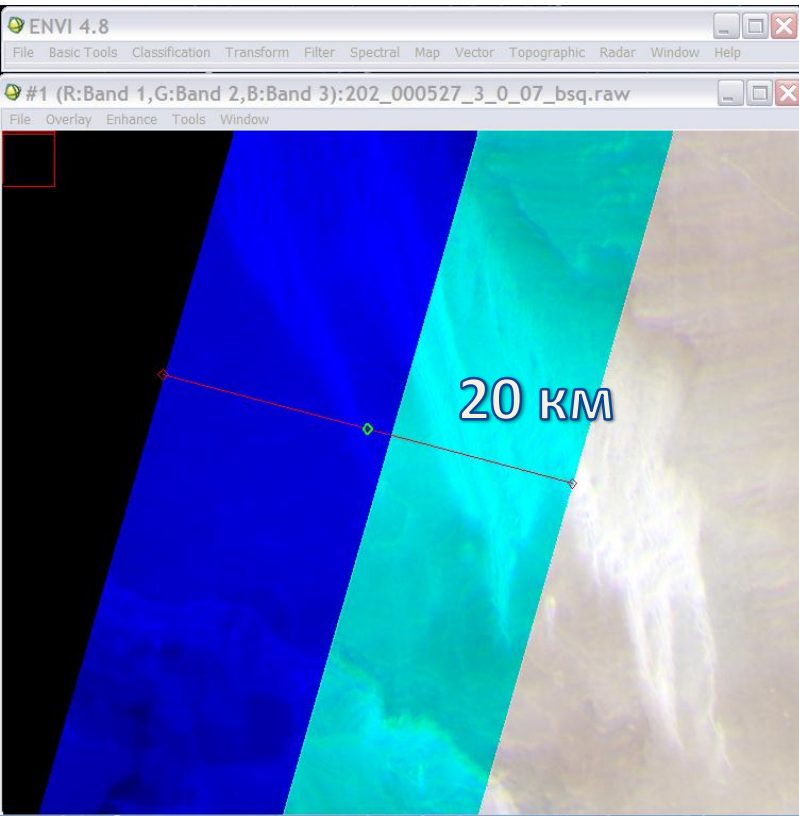
# Оценка разрешения МСУ-50М



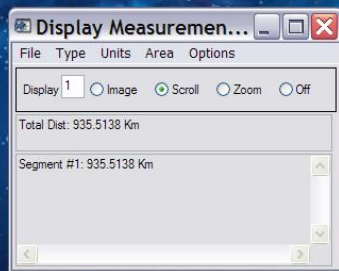
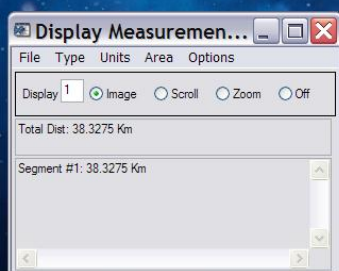
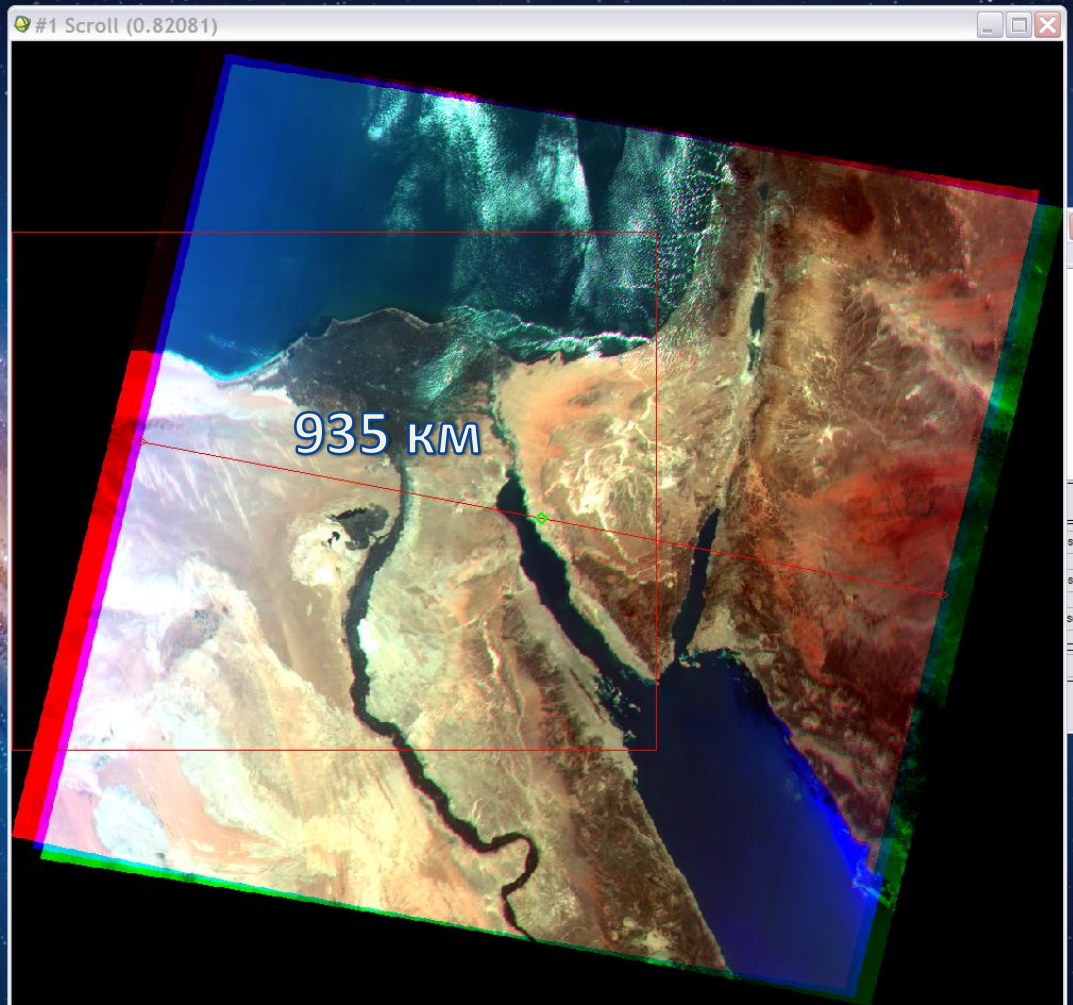
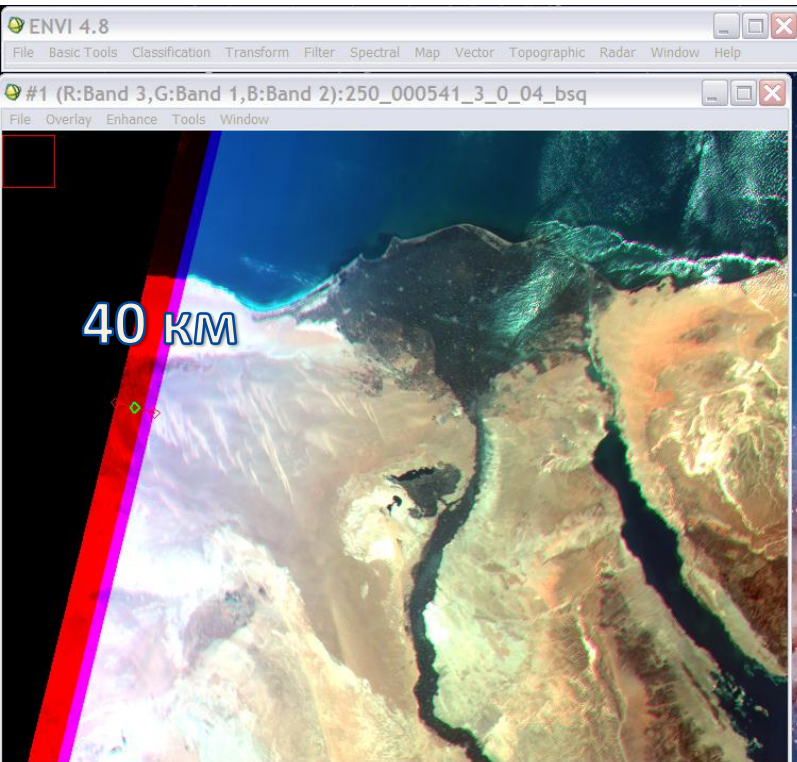
Ширина канала 300 м, проекция 115 м

Модуляция 9...10%

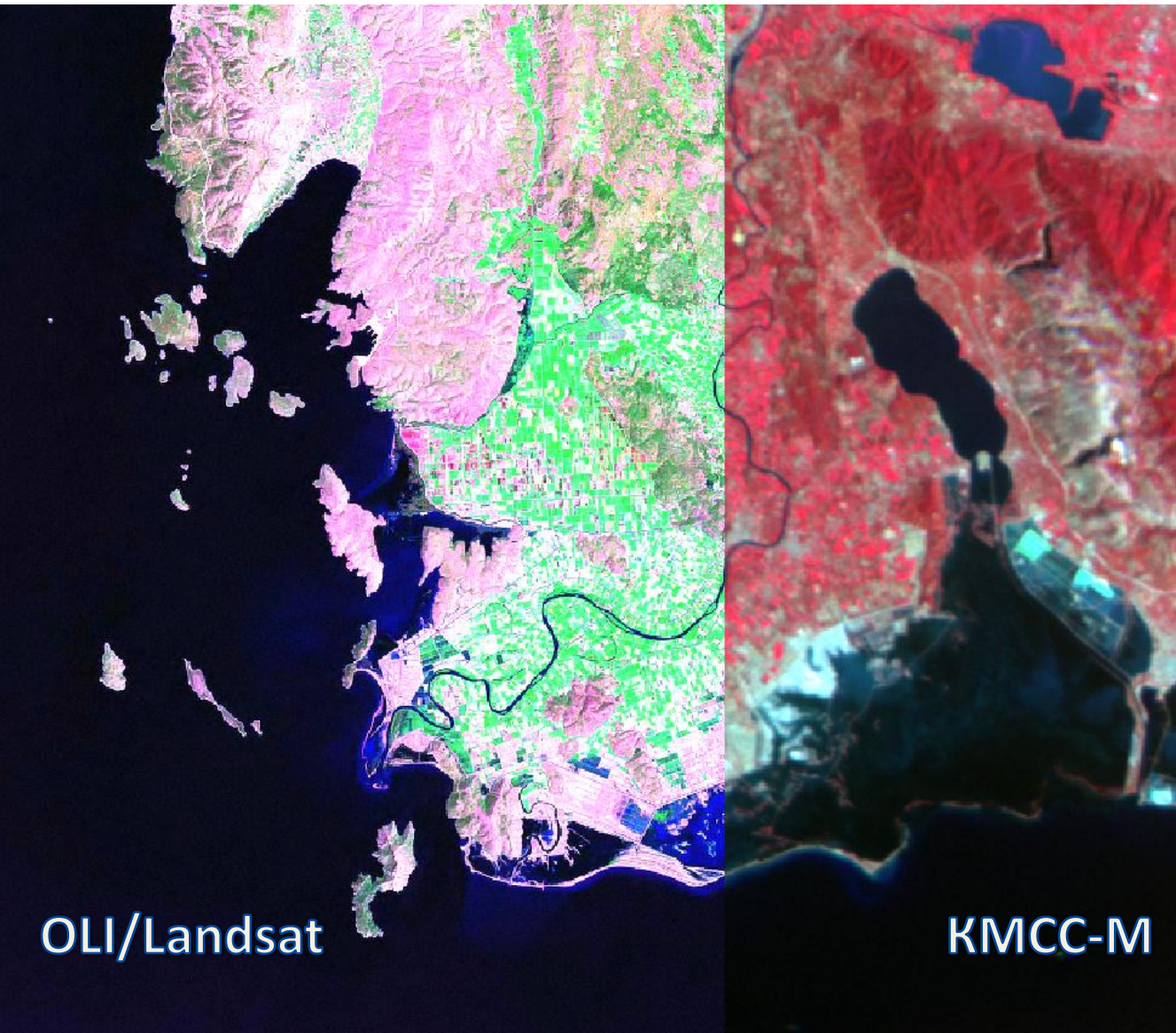
# Полоса захвата МСУ-100М (№02)



# Полоса захвата МСУ-50М



# Точность географической привязки



Совмещение каналов не более 1 пикс.

Географическая привязка – ок. 1 пикс.

*Примечание:  
Обработка маршрута производилась в автоматическом режиме.*

OLI/Landsat

КМСС-М

# Результаты проверок характеристик целевой информации КМСС-М

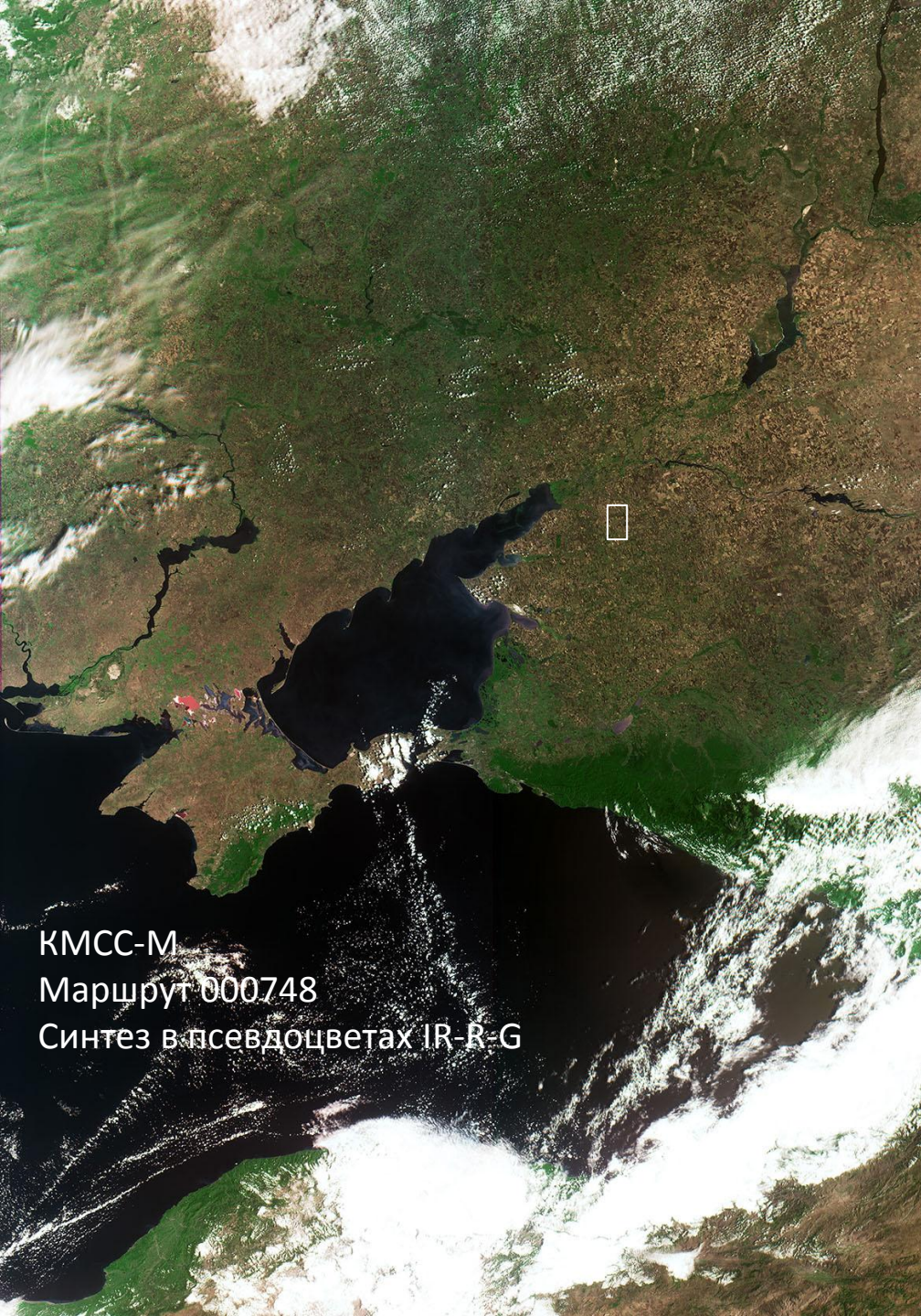


Параметр	Требования ТЗ		Измеренные значения		
	МСУ-100	МСУ-50	МСУ-100 № 1	МСУ-100 № 2	МСУ-50
Размер проекции элемента разрешения (пиксела) на земную поверхность в надире, м	не более 56	не более 116	54	54	114
Формируемая полоса обзора, км (прим. 1)	не менее 503	не менее 946	505	505	955
Пространственное разрешение ( $2\sigma$ ), пикс. / при глубине модуляции, %	не предъявляется		1,3 / 28	1,3 / 28	1,4 / 18
СКО ошибки временной привязки целевой информации	не предъявляется		$0,6 \cdot 10^{-3}$ сек	$0,6 \cdot 10^{-3}$ сек	$0,6 \cdot 10^{-3}$ сек
СКО ошибки географической привязки целевой информации, м (прим. 2)	не предъявляется		55	54	114

## Примечания:

- 1) При угле разворота оси X КА относительно вектора скорости не более  $1^\circ$ .
- 2) Значения получены при работающей системе БСКВУ и двух звездных датчиках.





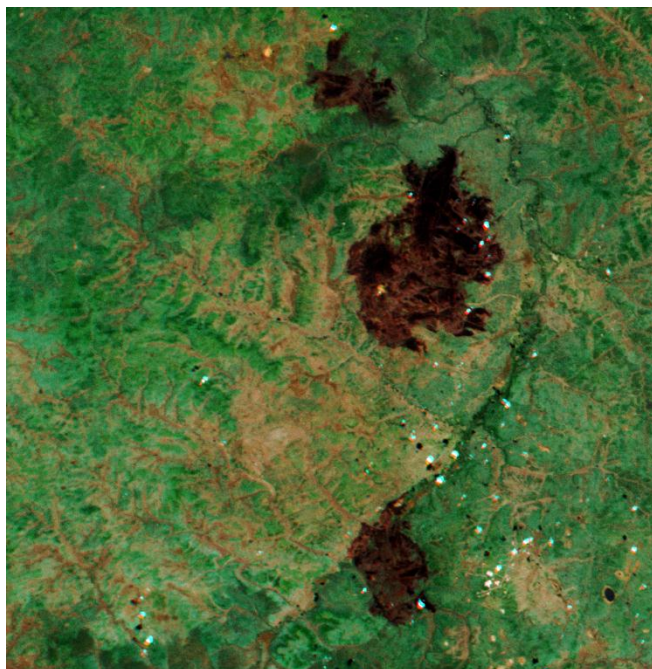
КМСС-М  
Маршрут 000748  
Синтез в псевдоцветах IR-R-G



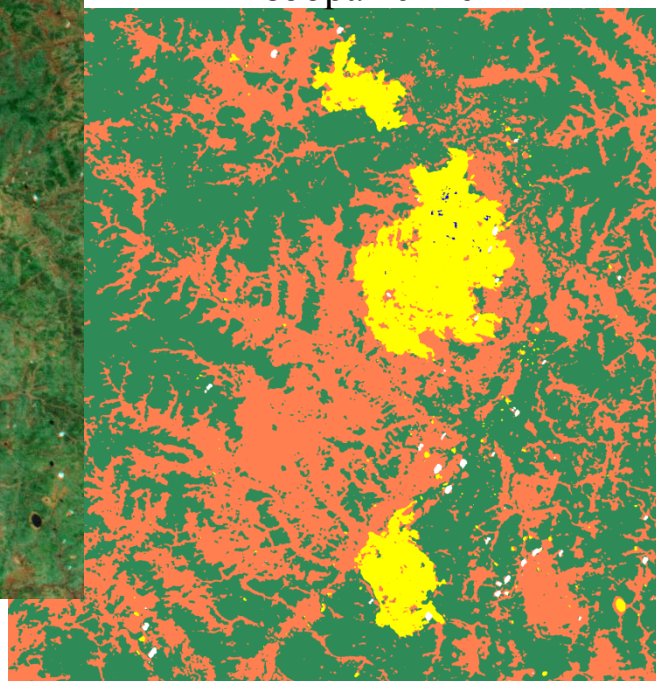
# Принципиальные возможности тематической обработки данных КМСС. Оценка площадей выгоревших территорий (Якутия)



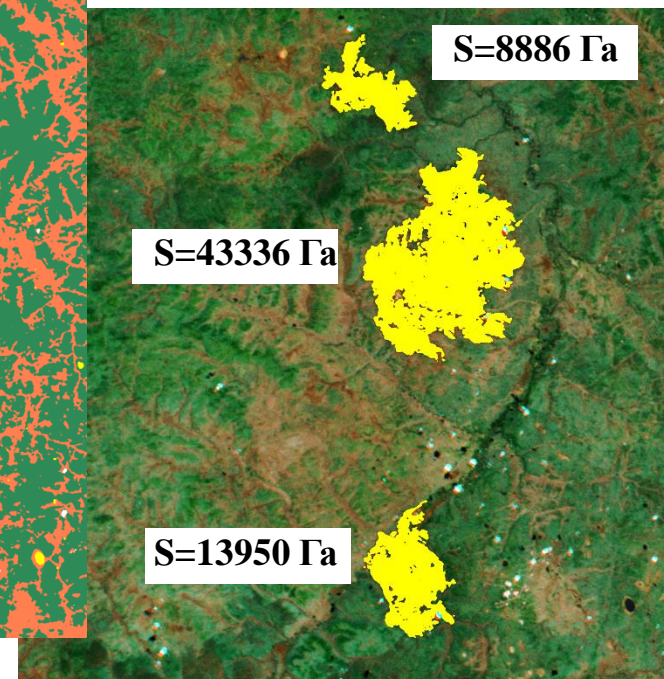
Исходное изображение



Классифицированное  
изображение



Совмещенное изображение



*Для подтверждения достоверности результатов тематической обработки требуется  
валидация выходных продуктов*

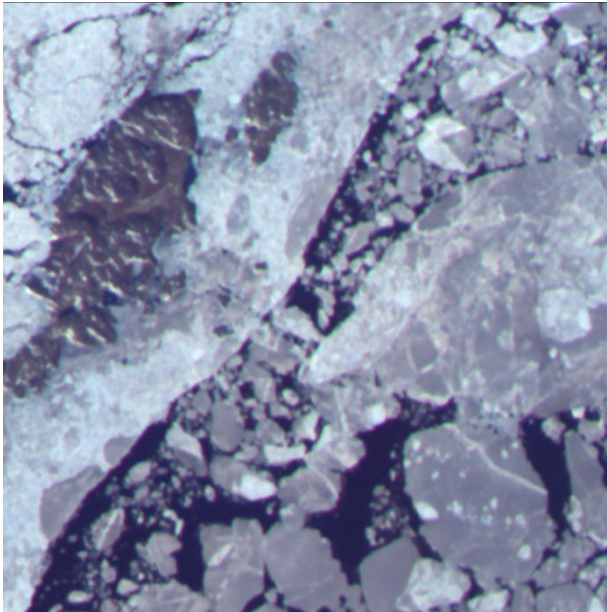
 - выгоревшие территории     - растительность     - открытая почва



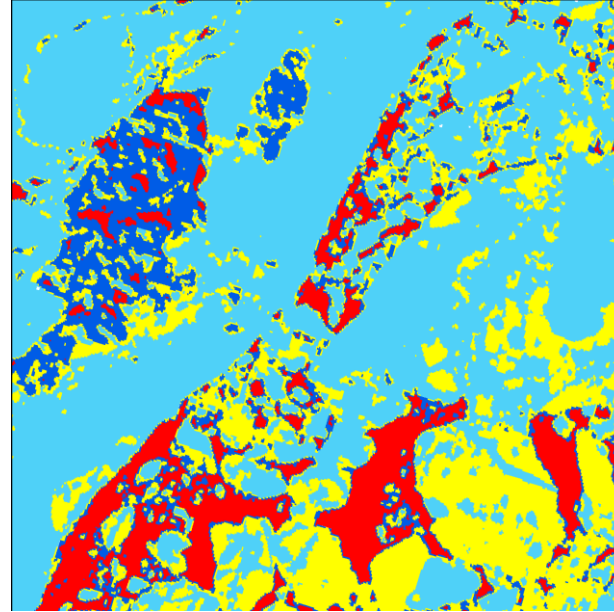
# Принципиальные возможности тематической обработки данных КМСС. Ледовая обстановка (Шпицберген)



Исходное изображение



Классифицированное изображение



-  - торосы
-  - участки суши
-  - нилас
-  - открытая вода

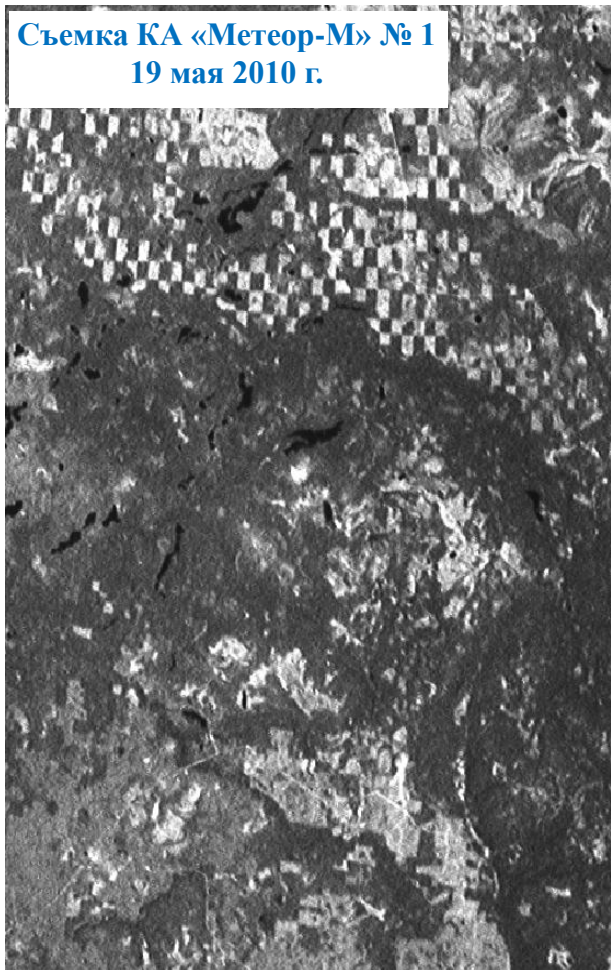
*Для подтверждения достоверности результатов тематической обработки требуется валидация выходных продуктов*



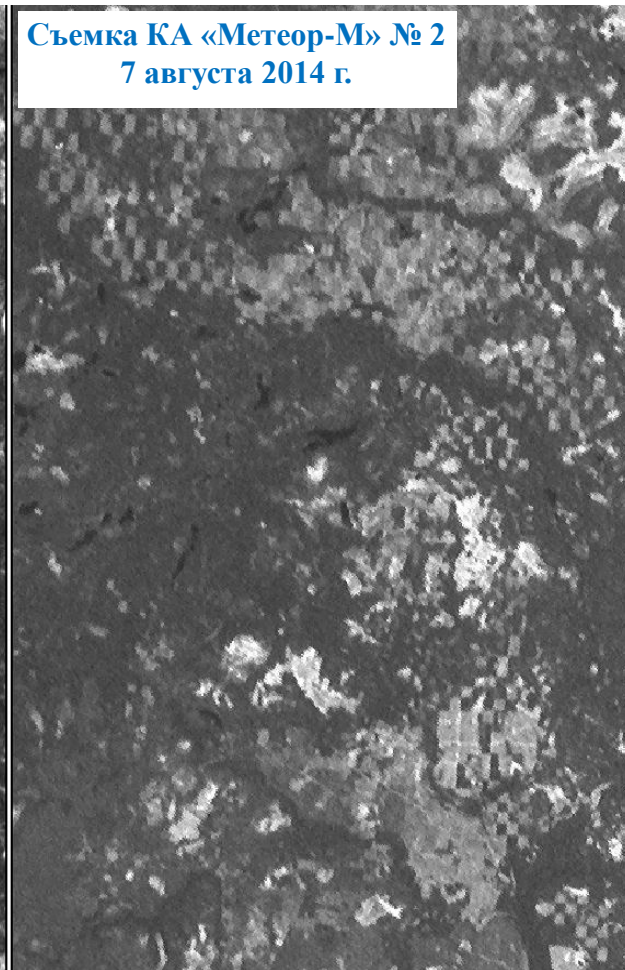
# Принципиальные возможности тематической обработки данных КМСС. Выявление новых вырубок (Архангельская область)



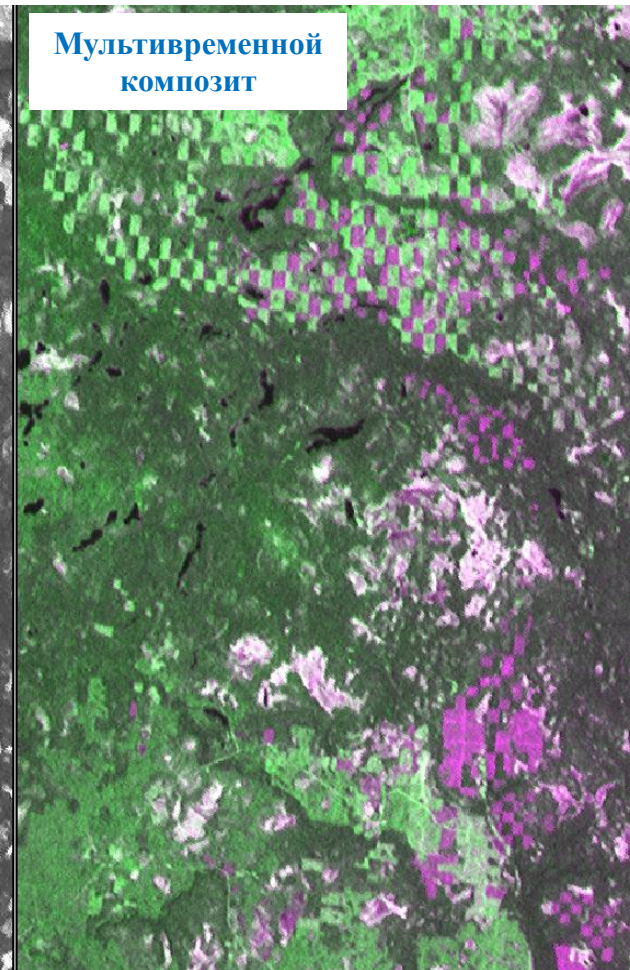
Съемка КА «Метеор-М» № 1  
19 мая 2010 г.



Съемка КА «Метеор-М» № 2  
7 августа 2014 г.



Мультивременной  
композит



*Для подтверждения достоверности результатов тематической обработки требуется  
валидация выходных продуктов*



Информация принята и обработана Оператором КС ДЗЗ  
(НЦ ОМЗ ОАО "Российские космические системы")



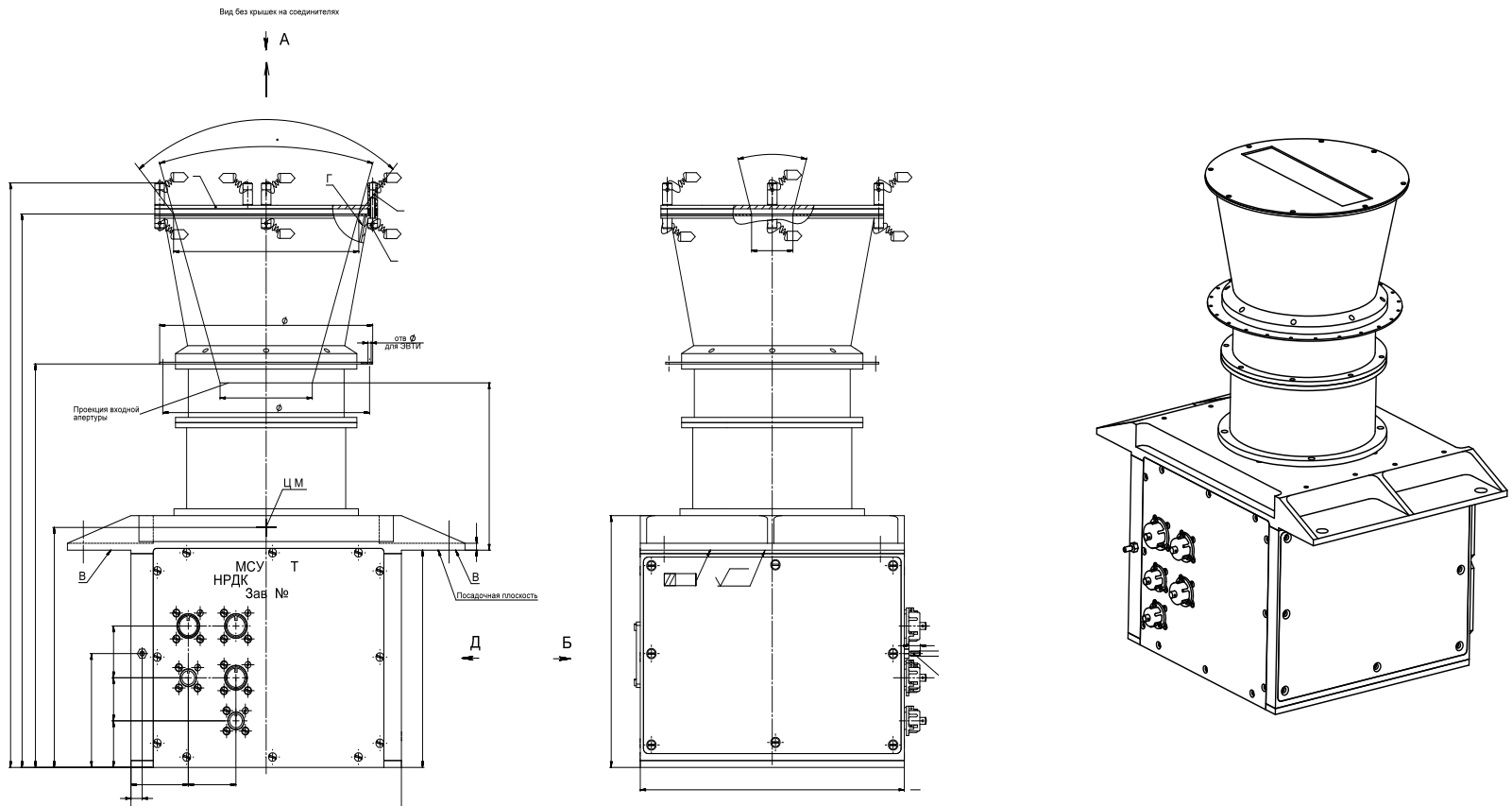
Вырубки за период 2010-2014гг.

# Ограничения КМСС

- Разнесенная во времени съемка в различных спектральных каналах:
  - зависимость качества синтеза мультиспектральных изображений от стабилизации оптической оси и точности определения навигационных параметров и времени.
- Динамический диапазон 8 бит / канал:
  - ограничения в диапазоне регистрируемых яркостей, необходимость сезонных переключений параметров камер.
- Переменный угол падения светового пучка на интерференционные фильтры:
  - Неравномерность границ спектральной чувствительности по полю изображения и, как следствие, ограничения в достижимой точности радиометрических измерений
- Устаревшая элементная база иностранного производства:
  - невозможность воспроизводства по существующей КД.

# Пути модернизации

- Комплекс КМСС-2 для КА «Метеор-М» № 2.1 (2.2) будет построен на базе многозональных съемочных устройств МСУ-100ТМ, не имеющих вышеперечисленных ограничений.



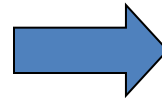
# Особенности МСУ-100ТМ

## Требование

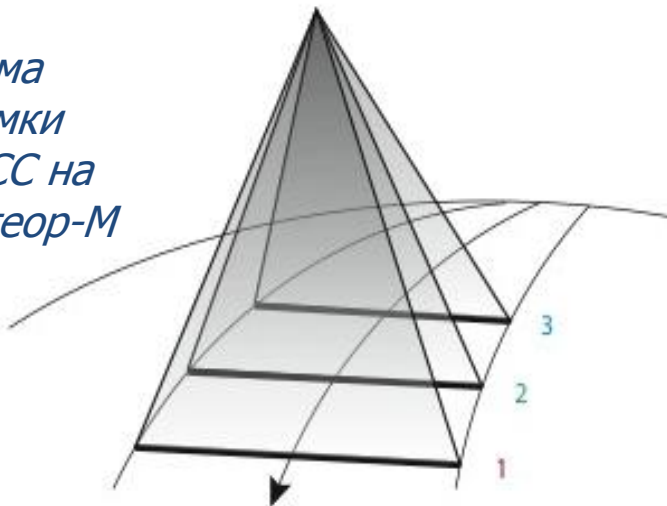
- Высокая точность синтеза многозонального изображения
- Повышение точности географической привязки

## Решение

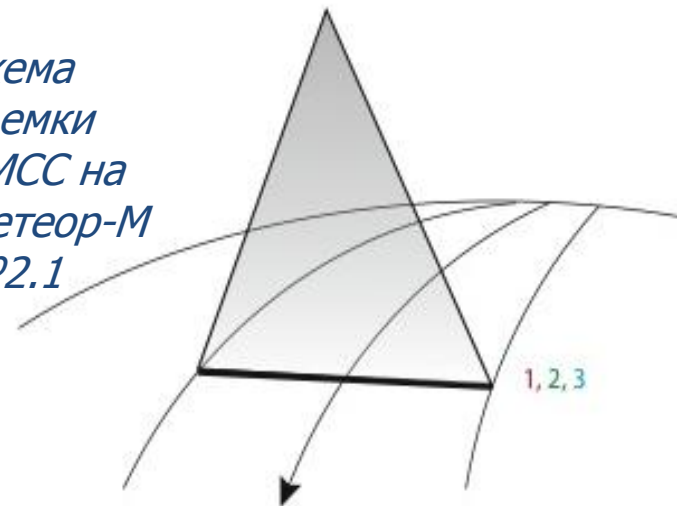
- Совмещенные оптические оси спектральных каналов
- Аппаратная привязка к шкале времени



*Схема  
съемки  
КМСС на  
Метеор-М  
№2*



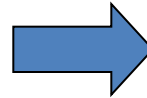
*Схема  
съемки  
КМСС на  
Метеор-М  
№2.1*



# Особенности МСУ-100ТМ

## Требование

- Высокая точность синтеза многозонального изображения
- Повышение радиометрической точности
- Узкие спектральные зоны
- Широкий угол поля зрения

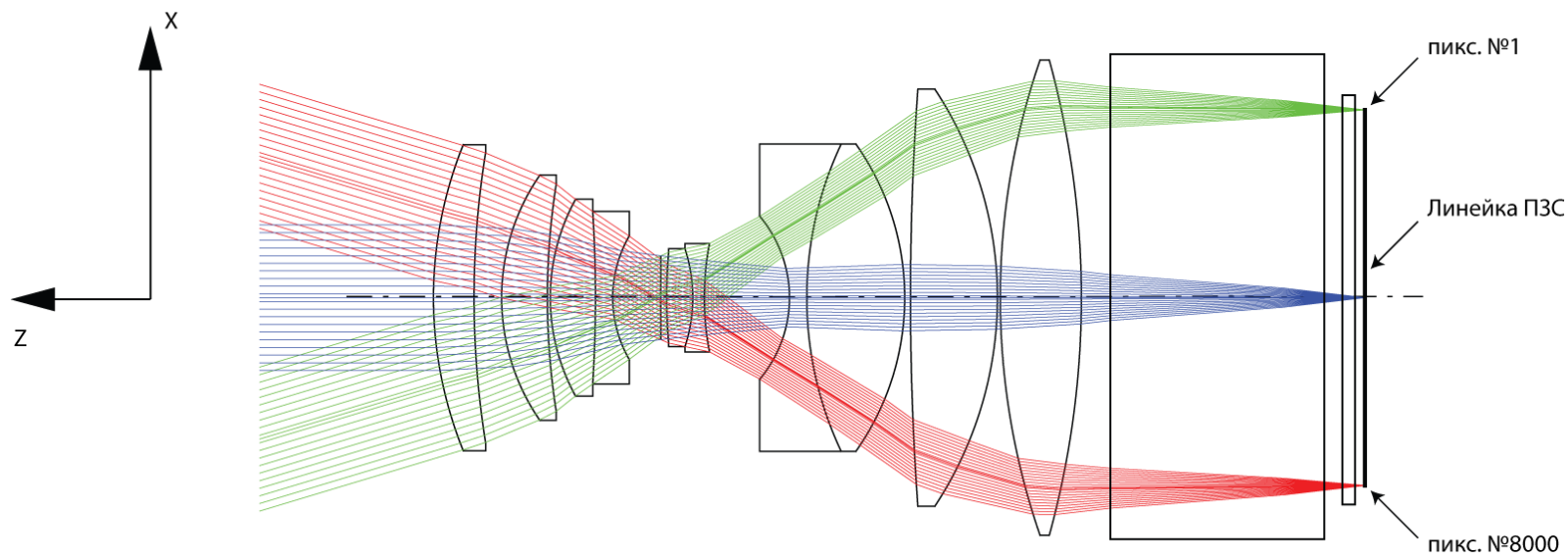
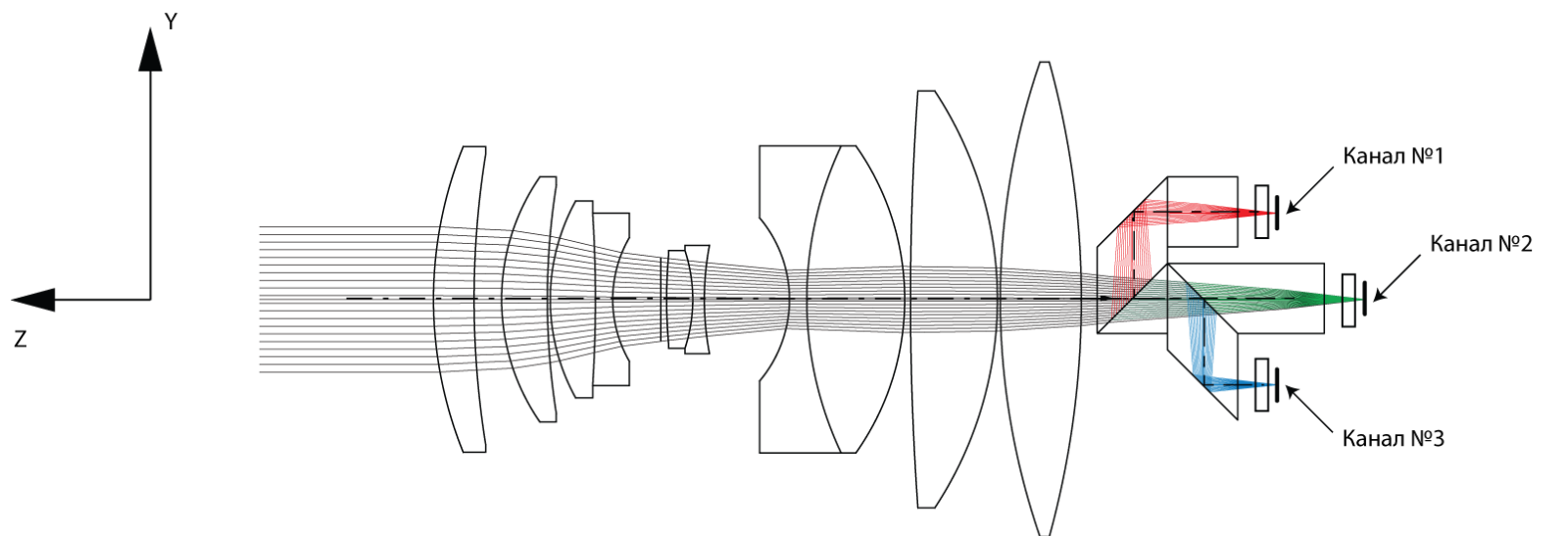


## Решение

- Призменная спектроделительная система
- Интерференционные фильтры в телецентрическом ходе лучей
- Увеличенный пиксел (9 мкм)
- Большая зарядовая емкость фотоэлемента (400000e-)

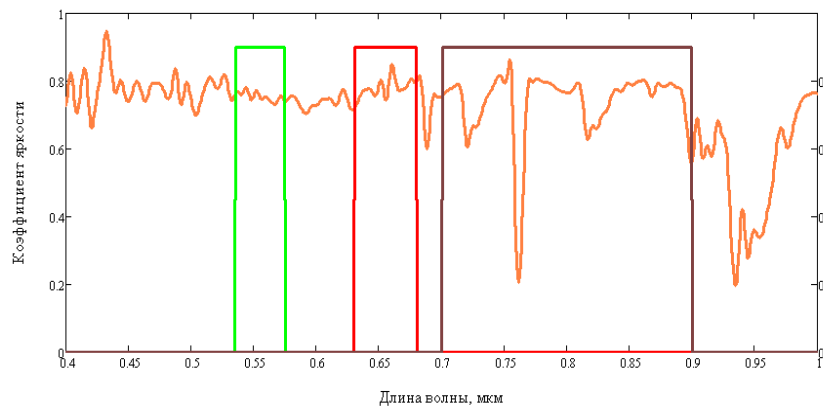


# Особенности МСУ-100ТМ

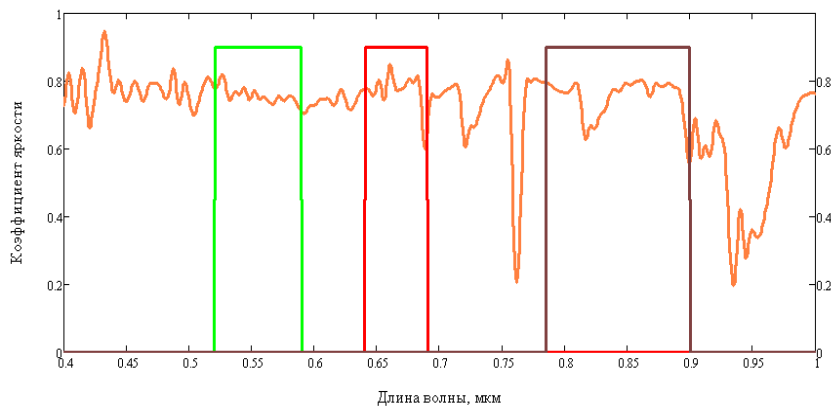


# Спектральные каналы

Параметры / Камера	МСУ-100			МСУ-100ТМ		
	Зел.	Кр.	Бл. ИК	Зел.	Кр.	Бл. ИК
№ канала	3	2	1	3	2	1
Длина волны в максимуме, нм	555	655	800	555	665	843
Нижняя граница, нм	535±5	630±5	760±10	520±5	640±5	785±5
Верхняя граница, нм	575±5	680±5	≥ 900	590±5	690±5	900±5
Ширина рабочей зоны, нм	40±10	50±10	≥ 200	70±10	50±10	115±10



МСУ-100



МСУ-100ТМ

# КМСС-2 на базе МСУ-100ТМ

## Сравнение характеристик

Параметры / Камера	МСУ-100 (М-№1, 2)	МСУ-100ТМ (М-№2.1,2.2)
Датчики изображения	3 линейных ПЗС	3 линейных ПЗС
Число элементов в строке	7926	7984
Угловое поле зрения камеры, °	31	32
Число камер на борту	2	2
Захват 2-х камер, км (Н = 830 км)	980	1000
Проекция элемента в надире, м (Н = 830 км)	54	55
Разрядность изображения, бит	8	10
Отношение С/Ш, не хуже	200	200
Информационный поток одной камеры, Мбит/с	<b>30,08</b>	<b>30,08</b>

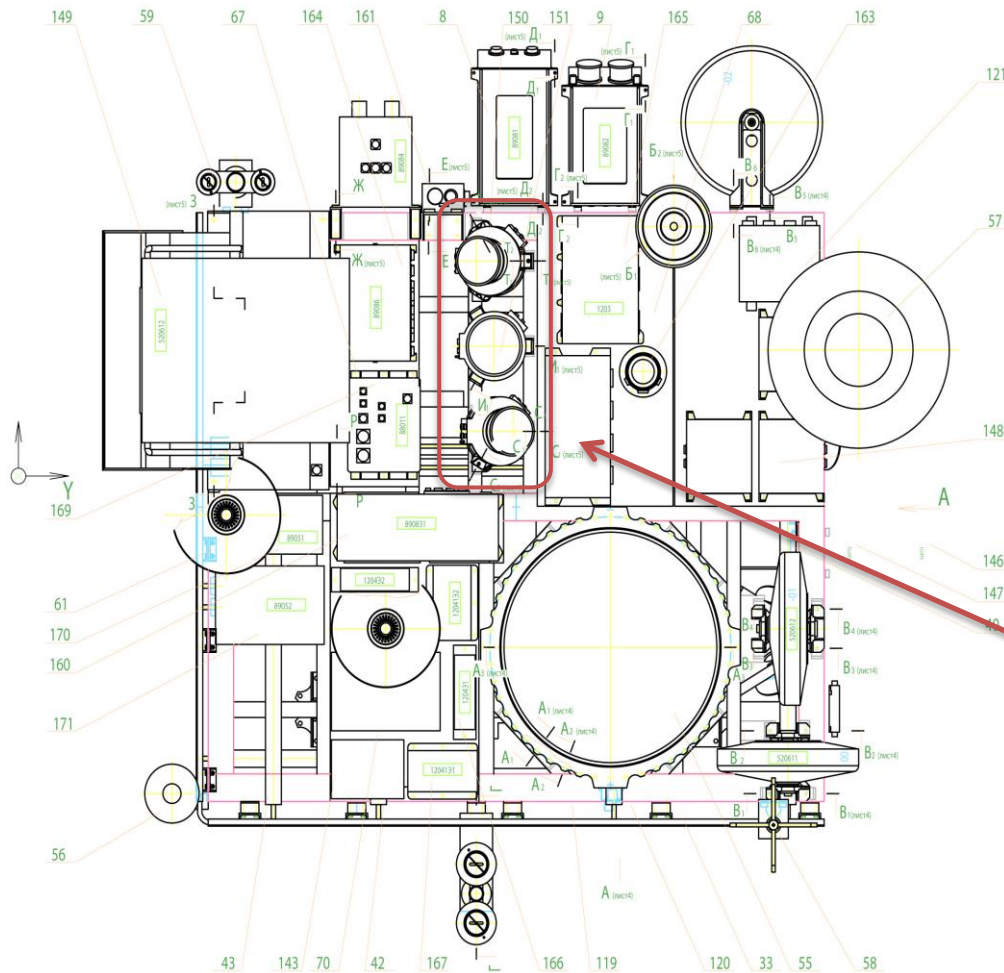
# КМСС-2 на базе МСУ-100ТМ

## Сравнение характеристик

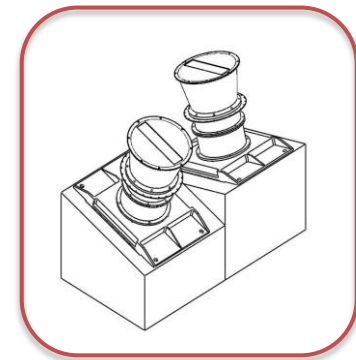
<b>Параметры / Камера</b>	<b>КМСС (М-№1, 2)</b>	<b>КМСС-2 (М-№2.1,2.2)</b>
Масса камеры, не более, кг	3,2	5,5
Масса комплекса, не более, кг	10	11
Габариты прибора, мм	200x220x230	320x250x190
Габариты комплекса, мм	250x240x800	320x250x450
Энергопотребление прибора, не более, Вт	7	10
Энергопотребление комплекса, не более, Вт	21	20

# Компоновка ПП «Метеор-М»

## Приборная платформа



□ Комплекс многозональной спутниковой съемки (КМСС) среднего разрешения



# КМСС-2 пример изображения



# Направления дальнейшего развития приборов ДЗЗ

- В настоящее время в ИКИ РАН ведутся опытно-конструкторские работы по созданию новых съемочных устройств для дистанционного зондирования Земли из космоса в следующих направлениях:
  - Создание гибкого устройства оперативного наблюдения Земли со сверхширокой полосой захвата и с одновременным повышением пространственного разрешения и сохранением минимально необходимого числа спектральных каналов
  - Разработка универсального многоканального спектрорадиометра видимого и ближнего ИК диапазонов. Проработка вопросов реализации каналов в коротковолновом ИК диапазоне.
  - Освоение новых технологий в области датчиков изображения, оптических систем, электро-механических устройств и современных электронных компонентов.

# МСУ-Горизонт

## Назначение и основные требования

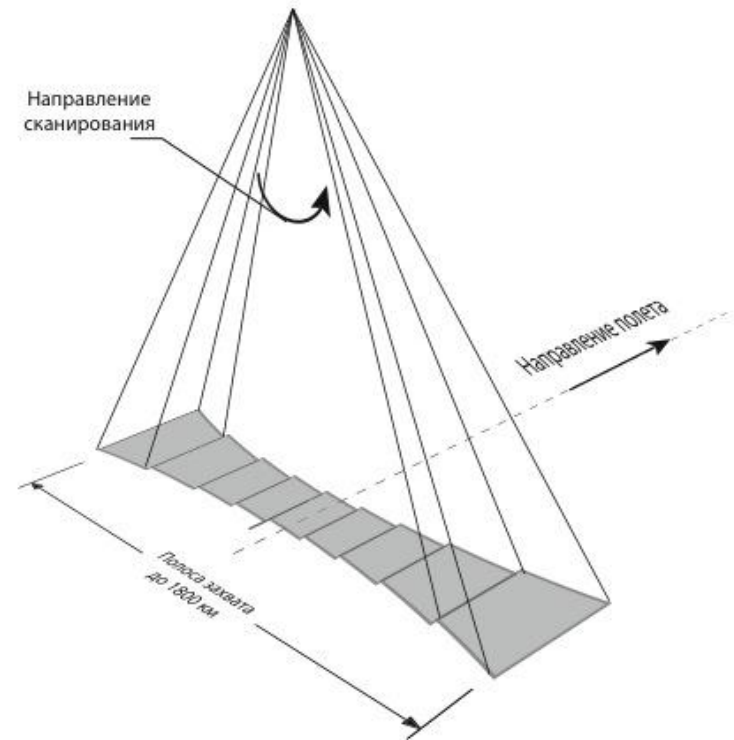
- Целевое назначение аппаратуры Горизонт – проведение широкозахватной съемки на освещенной стороне Земли с целью получения изображений подстилающей в видимом и ближнем ИК диапазонах.

Параметр	Значение
Количество спектральных каналов	6
Максимальная полоса захвата, км	1800
Максимальное пространственное разрешение в надире (с высоты орбиты – 820 км), не хуже, м	60*
Границы спектральных каналов на уровне 0,5, мкм	0,450±0,005 - 0,515±0,005 0,520±0,005 - 0,590±0,005 0,640±0,005 - 0,690±0,005 0,690±0,005 - 0,730±0,005 0,845±0,005 - 0,885±0,005 0,785±0,005 - 0,900±0,005
Отношение сигнал/шум, не менее	100**
Разрядность АЦП, бит, не менее	12
Примечания: * - с возможностью увеличения пространственного разрешения до 30 м. ** - для объектов с КСЯ = 0,3, при высоте Солнца $\geq 10^\circ$ .	

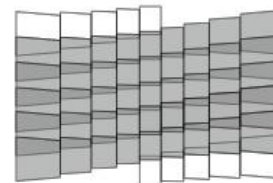


# Принцип построения МСУ-Горизонт

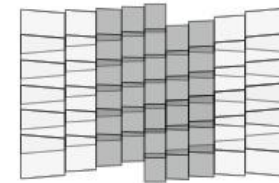
- Суть метода заключается в использовании матричного сенсора в качестве фотоприемного устройства и перенацеливании оптической оси, что позволяет реализовывать различные режимы съемки – сплошное сканирование полосы обзора, выборочное сканирование и выборочную съемку отдельных кадров в пределах полосы обзора.
- Дополнительные преимущества данного метода съемки – высокое геометрическое качество изображений в пределах одного кадра и возможность сшивки соседних кадров корреляционными методами.



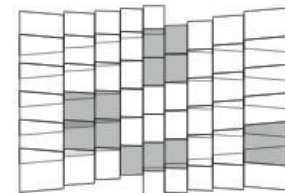
Сплошная съемка 60 м



30 м

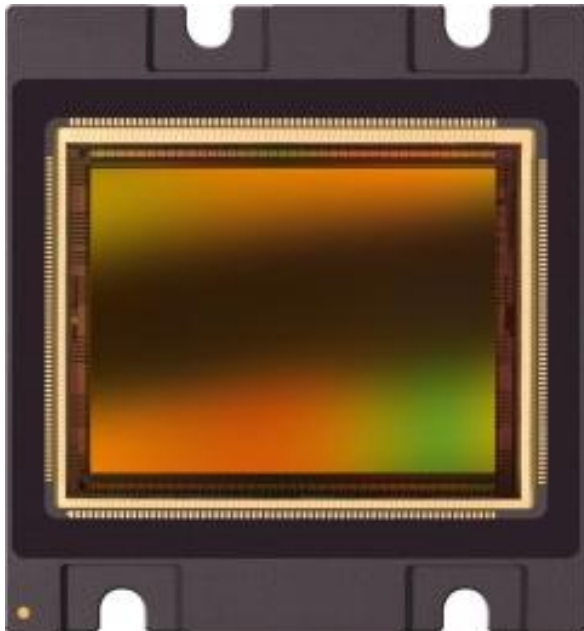


Выборочная съемка



# КМОП фотоприемник SMV20000

- Большая площадь;
- Электронный затвор;
- Одновременное накопление;
- Устойчивость к радиации и ВЭЧ.

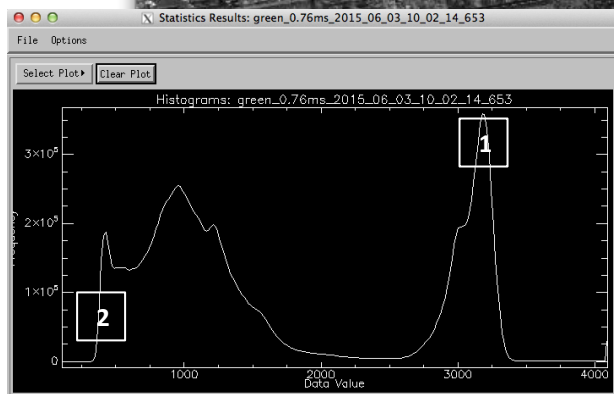


Параметр	Значение
Число элементов	5120 x 3840
Размер элемента, мкм	6,4
Глубина потенциальной ямы, е	15000
Коэффициент усиления, мкВ/е	110
Чувствительность, В/лк/с (на 550 нм)	8,29
Суммарный шум (СКО), е	8
Динамический диапазон, дБ	66
Чувствительность к паразитному свету	1/50000
Темновой ток, мВ/с (при 30°C)	20
Неравномерность чувствительности	<0,1%
Число разрядов квантования сигнала, бит	12
Потребляемая мощность, Вт	1,1
Рабочий диапазон температуры, °C	от -30 до +70
Число кадров в 1 с	30

# Фоточувствительные элементы – КМОП

- Каждый пиксель КМОП сенсора в отличие от ПЗС содержит не только элемент, генерирующий фототок, но также и активную транзисторную схему для преобразования заряда в напряжение, его усиления и хранения.
- Технология КМОП позволяет интегрировать всю систему формирования изображения, включая массив светочувствительных элементов и управляющие схемы, на одном кристалле кремния.
- На сегодняшний день освоены технологии производства КМОП микросхем на пластинах поликремния диаметром до 300 мм с размером фоточувствительной зоны до 200 x 200 мм.
- В массовом производстве освоен выпуск датчиков размером 24 x 36 мм с оптимальным сочетанием цена/информативность.
- Еще одно преимущество активно-пиксельной технологии – значительно снижается потребляемая мощность и уменьшается число составных частей, необходимых для сборки готовых изделий, что приводит к повышению надежности.

# Пример изображения матрицы CMV20000

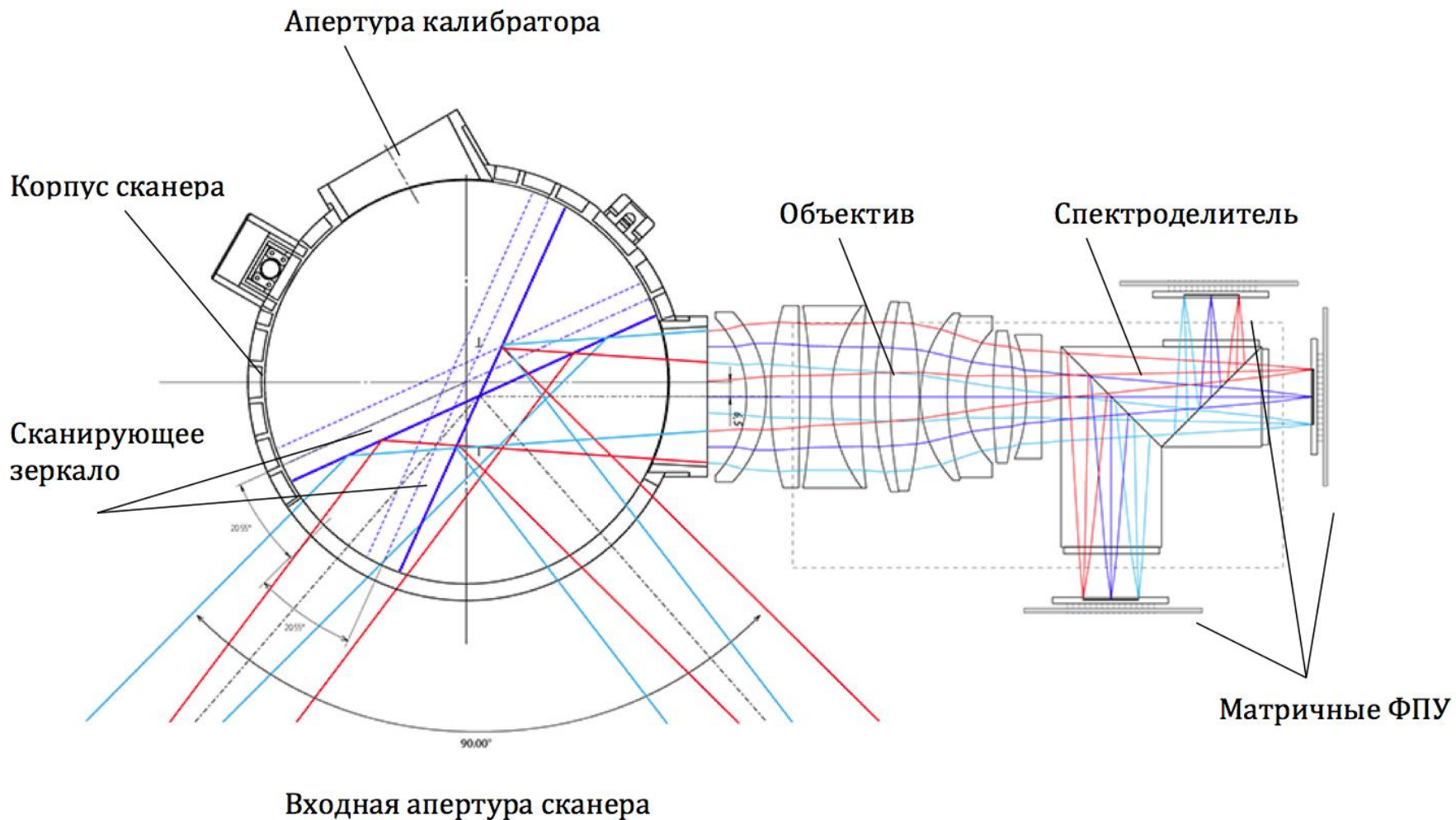


# Основные недостатки КМОП матриц и способы их устранения/парирования

Недостатки	Методы парирования и эффект
Малая зарядовая емкость пиксела	<p>Кусочно-линейная передаточная характеристика – расширение динамического диапазона при сохранении высокой чувствительности к слабым сигналам.</p> <p>Цифровое бинирование – эквивалентное увеличение зарядовой емкости в 4 раза.</p>
Структурный шум	Компенсация структурного шума путем вычитания «слепок» на нескольких значениях входного сигнала – снижение уровня шума до уровня случайной составляющей. Требуется калибровка.
Случайный шум	Возможно применение охлаждения для стабилизации температуры на уровне 20° С.
Изменение параметров при эксплуатации	Проведение периодической калибровки.

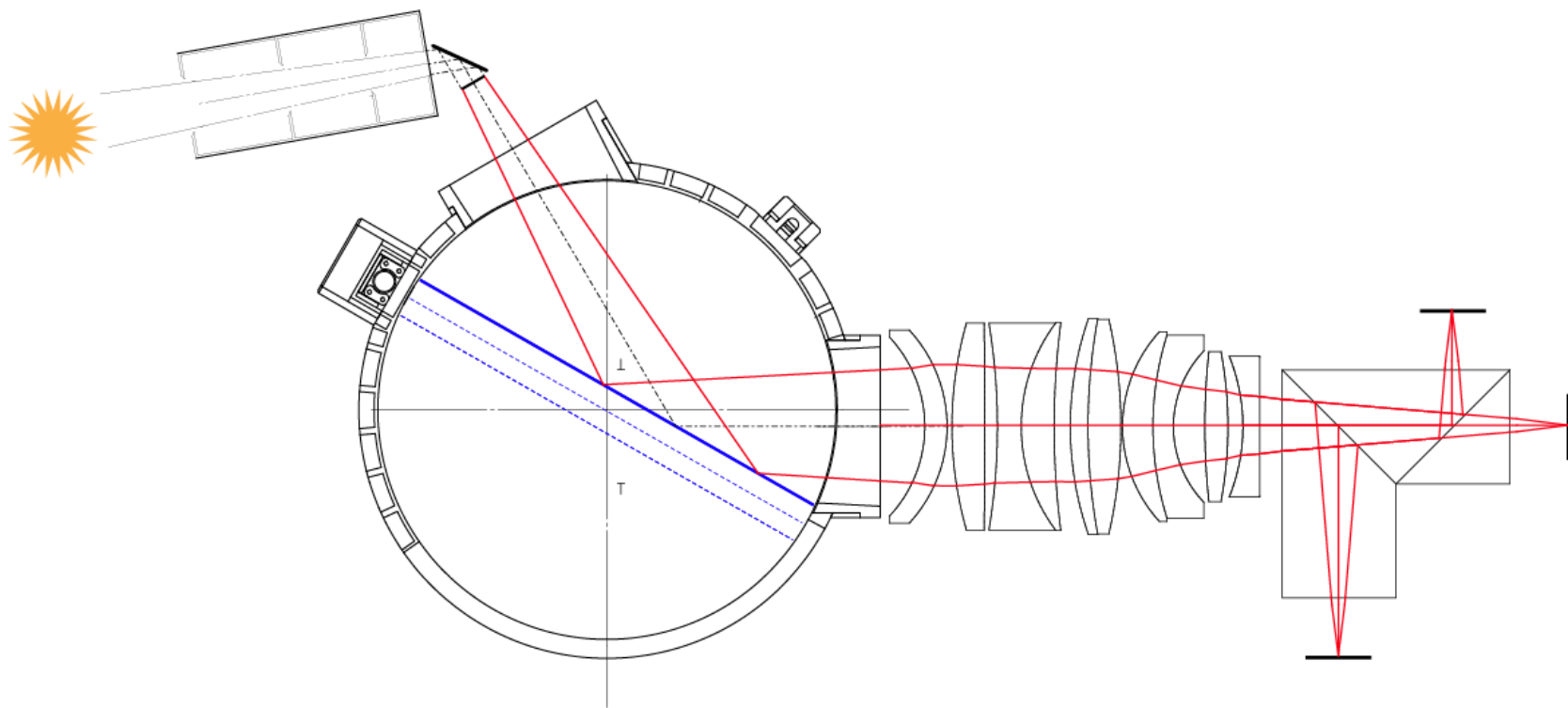
# МСУ-Горизонт

## Ключевые моменты проектирования



# МСУ-Горизонт

## Ключевые моменты проектирования



Ход лучей в режиме калибровки

# МСУ-Горизонт

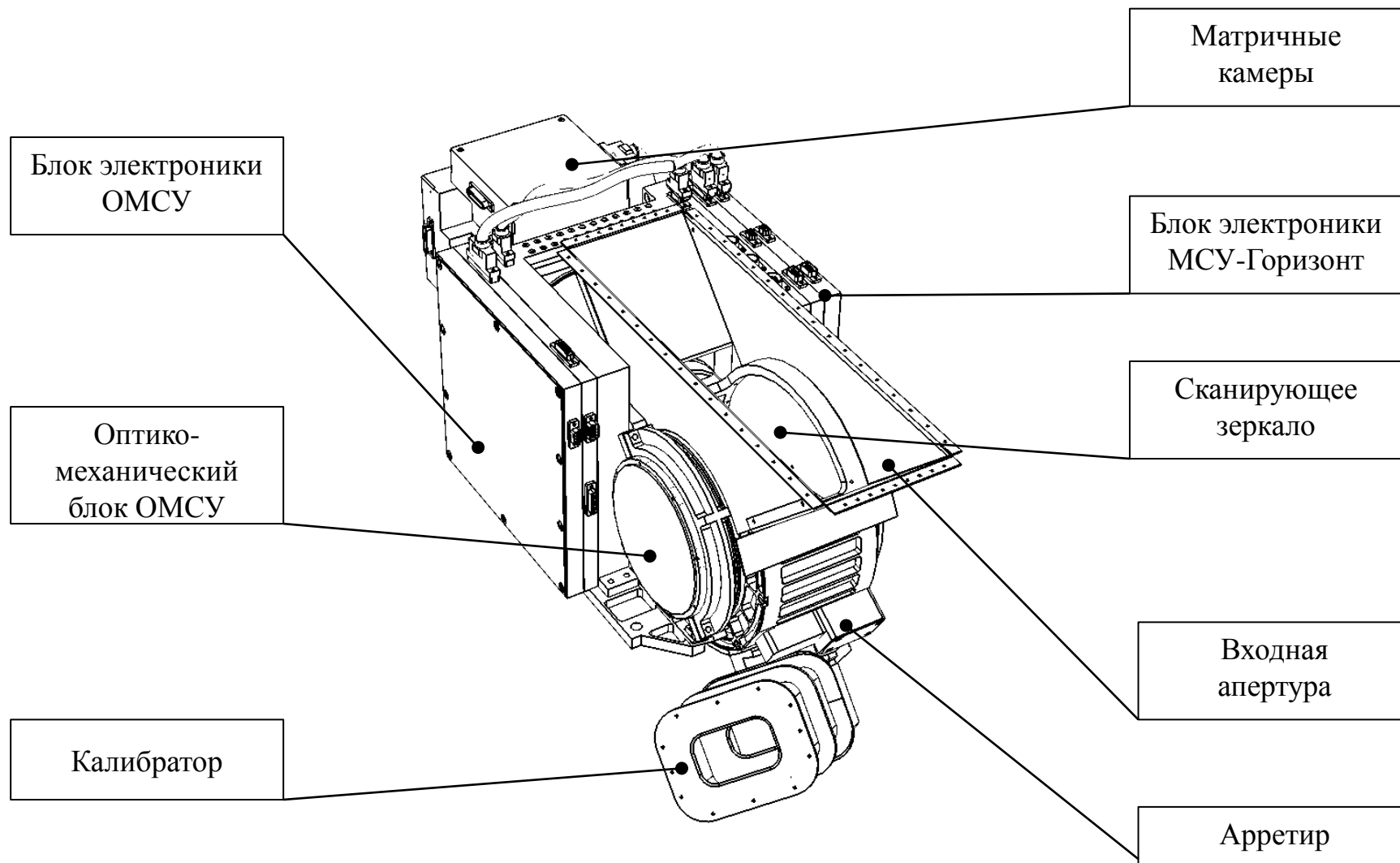
## Ключевые моменты проектирования

- Объектив должен иметь вынесенный зрачок, в котором располагается сканирующее зеркало;
- В заднем отрезке объектива должен быть реализован телецентрический ход лучей для обеспечения равномерных спектральных характеристик площадного датчика;
- Зеркало подвешивается в кольцевом моментном двигателе с обратной связью, позволяющим реализовать закон движения с переменной скоростью и контроль углового положения;
- Переворот зеркала на  $180^\circ$  должен обеспечивать передачу светового потока с апертуры калибратора и блокирование входной апертуры от фоновой засветки Земли;
- Входная апертура калибратора должна позволить разместить различные источники опорного излучения – как искусственные, так и естественные (Солнце).



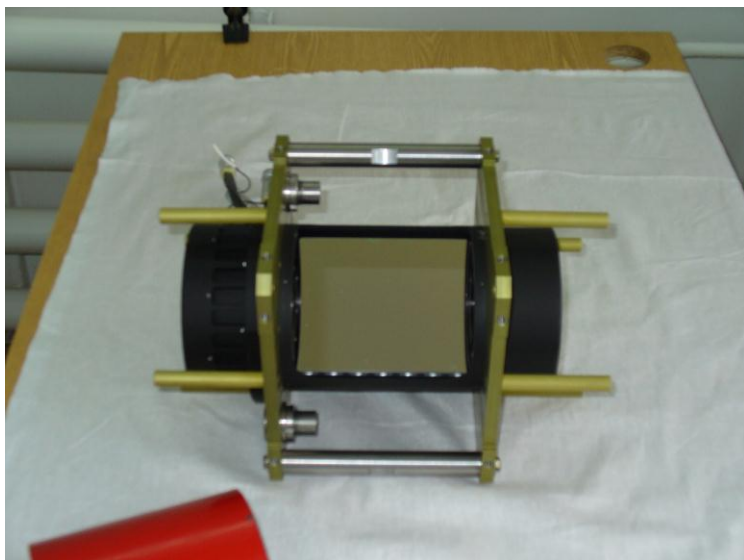
# МСУ-Горизонт

## Составные части



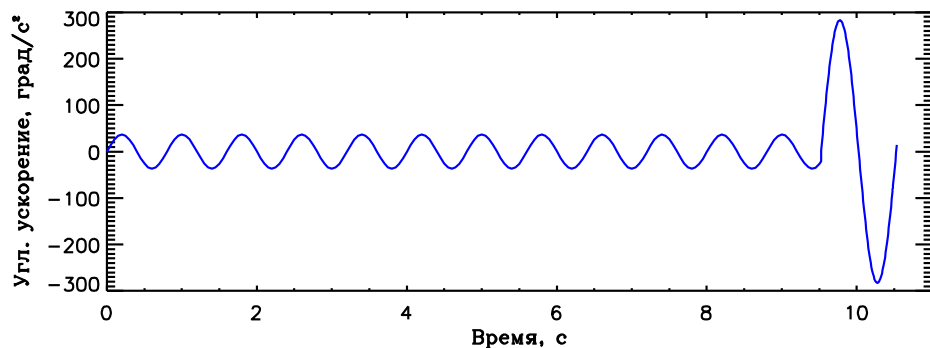
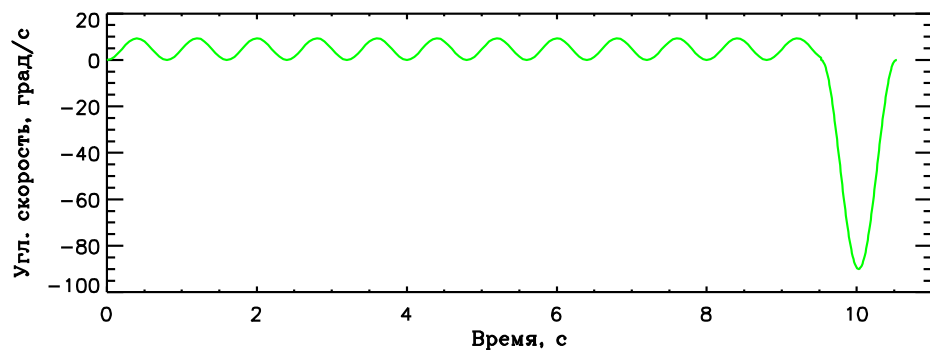
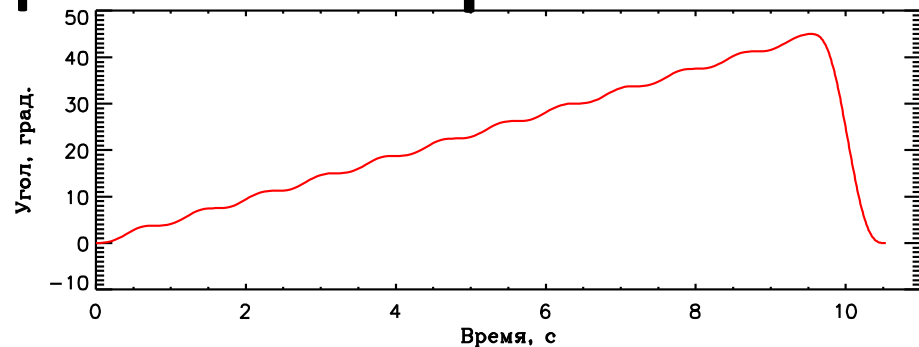
# МСУ-Горизонт

## ОМСУ. Закон движения зеркала



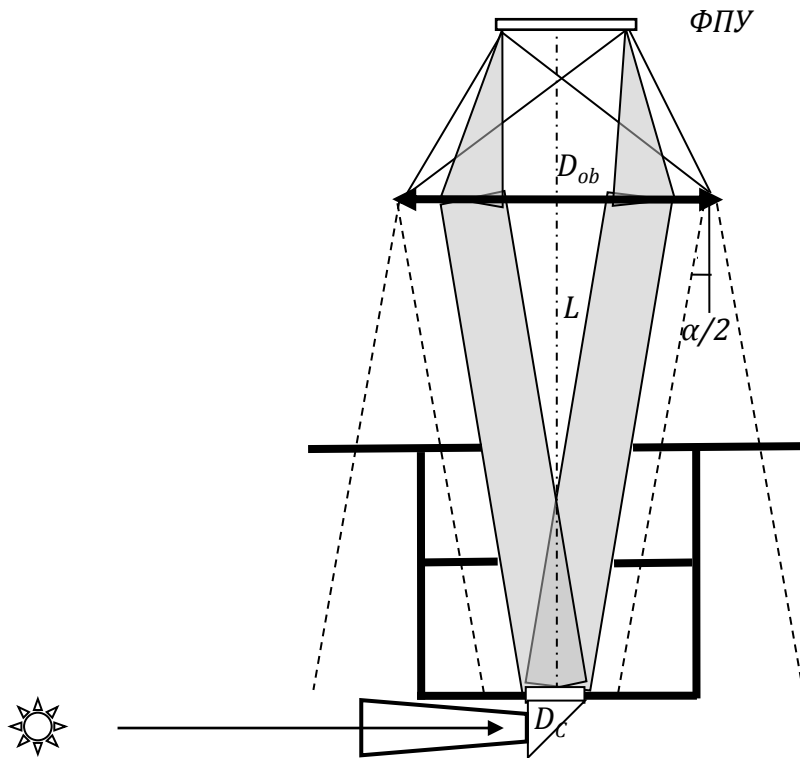
Прототип:

Однокоординатный привод  
ПКР-Т сканирующего зеркала  
каналов видимого диапазона  
МСУ-ГС на КА ЭЛЕКТРО-Л  
(СКБ КП ИКИ РАН)

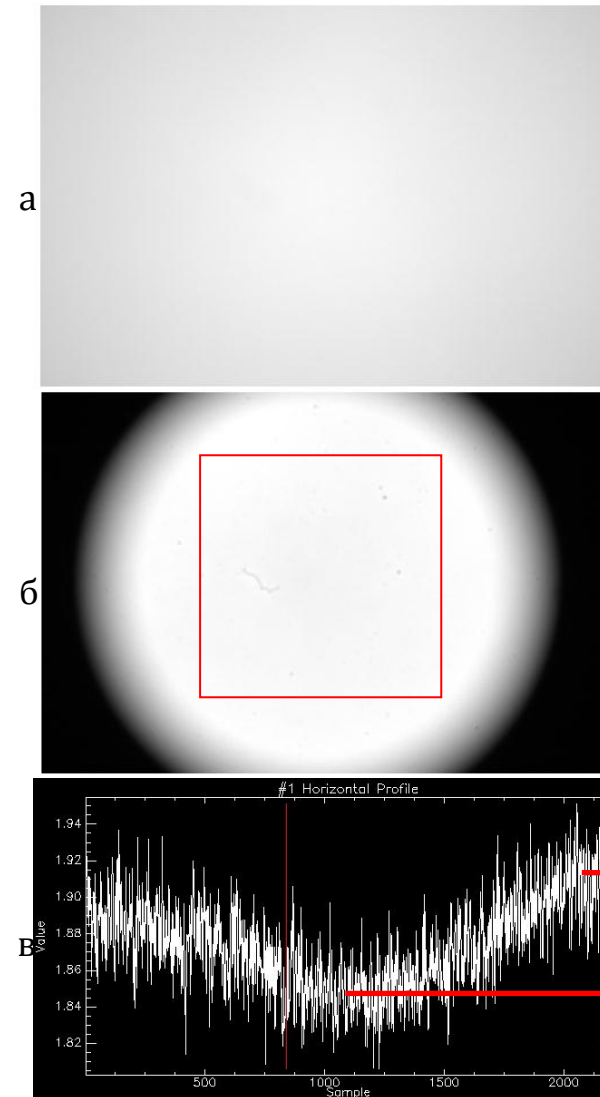


# МСУ-Горизонт

## Калибровка малой апертурой

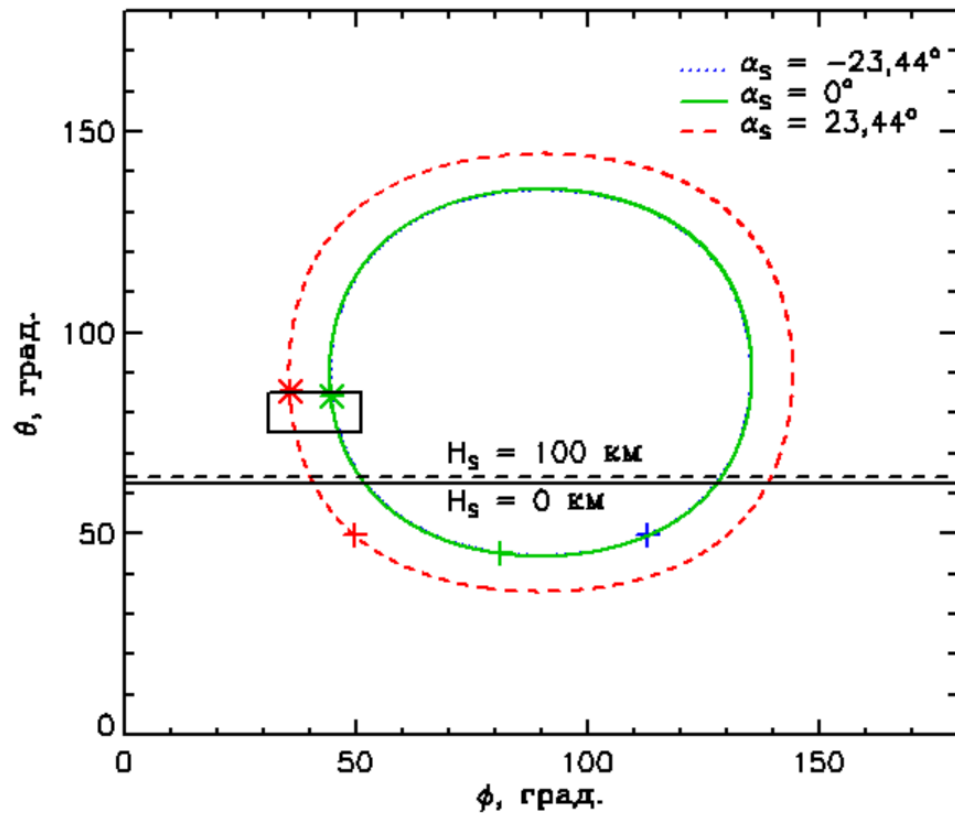
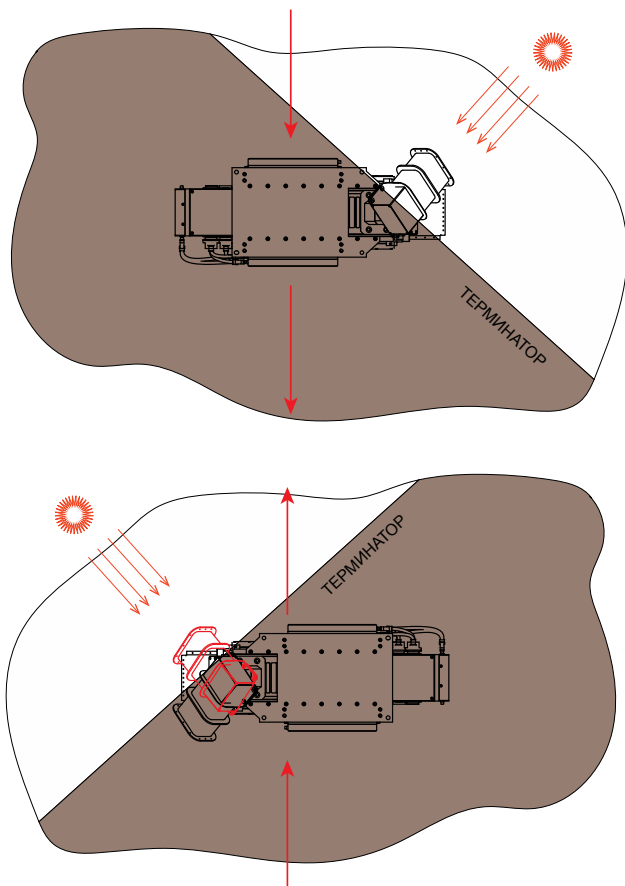


Изображение поля яркости интегрирующей сферы (а), малой апертуры (б) и отношение сигналов малой апертуры и интегрирующей сферы по горизонтальной оси в пределах выделенного квадрата (в)



# МСУ-Горизонт

## Условия наблюдения Солнца



Угловое перемещение Солнца в связанной с КА системе координат для трех значений склонения Солнца; Солнце перемещается по часовой стрелке и делает полный оборот за один виток КА; крестики обозначают момент прохождения восходящего узла, звездочки – момент, когда полоса обзора системы на поверхности Земли выходит на освещенную сторону; рабочее поле зрения калибратора обозначено прямоугольником

# Выводы и заключения

- Современные научные и оперативные потребности в видах, содержании и периодичности обновления космической информации подтверждают перспективность использование многозональной съемочной аппаратуры среднего-высокого разрешения, обеспечивающей, как минимум, ежесуточное обновление пространственной информации на большую часть территории Российской Федерации.
- Способ съемки, реализуемый в многозональном съемочном устройстве МСУ-Горизонт обеспечивает получение изображений подстилающей поверхности в полосе захвата до 1800 км с пространственным разрешением 30 м в надире. Кроме того, размер предлагаемой к применению крупноформатной фоточувствительной матрицы  $20 \times 10^6$  пикселей позволяет рассматривать отснятые кадры как самостоятельную продукцию, имеющую самостоятельную ценность для наблюдателя, а высокое быстродействие матриц предоставляет возможность для многократного перенацеливания съемочного устройства поперек трассы полета и возвращения в исходное положение за время пролета одного кадра.
- Использование поворотного зеркала в МСУ-Горизонт и малоапертурного калибратора обеспечивает техническую возможность радиометрической калибровки оптико-электронного тракта по солнечному излучению при штатной эксплуатации на космическом аппарате.
- Проведенные расчеты показали техническую возможность выполнения требований технического задания в части пространственного разрешения, полосы обзора, динамического диапазона, отношения сигнал/шум в выбранных спектральных зонах и других характеристик целевой информации МСУ-Горизонт.