



ХІХ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

Пути модернизации бортового инфракрасного
фурье-спектрометра ИКФС-2

Докладчик: Д.А. Козлов
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

Секция С «Вопросы создания и использования приборов и систем для спутникового мониторинга состояния окружающей среды»

ИКИ РАН, 15-19 ноября 2021 г.



Аппаратура ИКФС-2 для КА «Метеор-М» № 2:

- 1) 8-ой год штатной эксплуатации на орбите
- 2) высокое качество и стабильность калибровки (подтверждено за 7 лет сопоставлений с независимыми спутниковыми измерениями по методикам GSICS)
- 3) 130 тыс. спектров атмосферы в сутки пригодны для тематической обработки и усвоения в моделях численного прогноза погоды
- 4) целевая информация востребована и высоко оценивается Росгидрометом (а также Европейским центром среднесрочных прогнозов погоды ECMWF)

Получаемые продукты: вертикальные профили температуры и влажности, общее содержание O_3 , температура подстилающей поверхности. Также прибор позволяет определять общее содержание климатически значимых малых газовых составляющих атмосферы (CO_2 , CH_4 , N_2O).

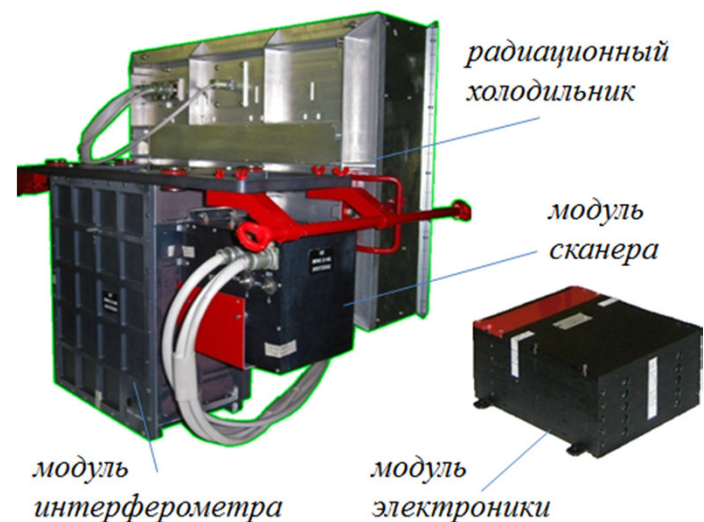


Рис.1 – Инфракрасный фурье-спектрометр ИКФС-2

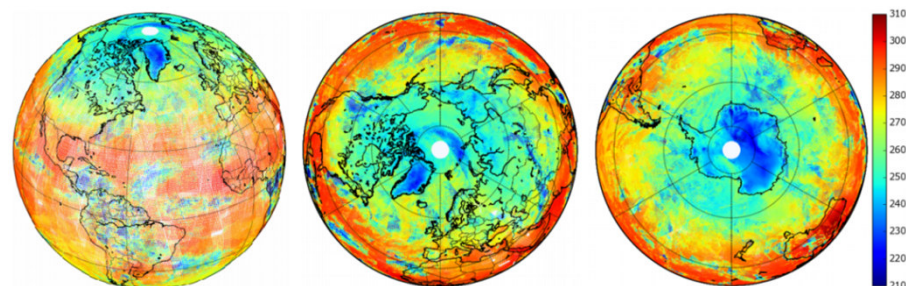


Рис.2 – Яркостная температура (К) в спектральном канале 900 см^{-1} (всего каналов: 2701) (измерения за 13-16 ноября 2020 г.)



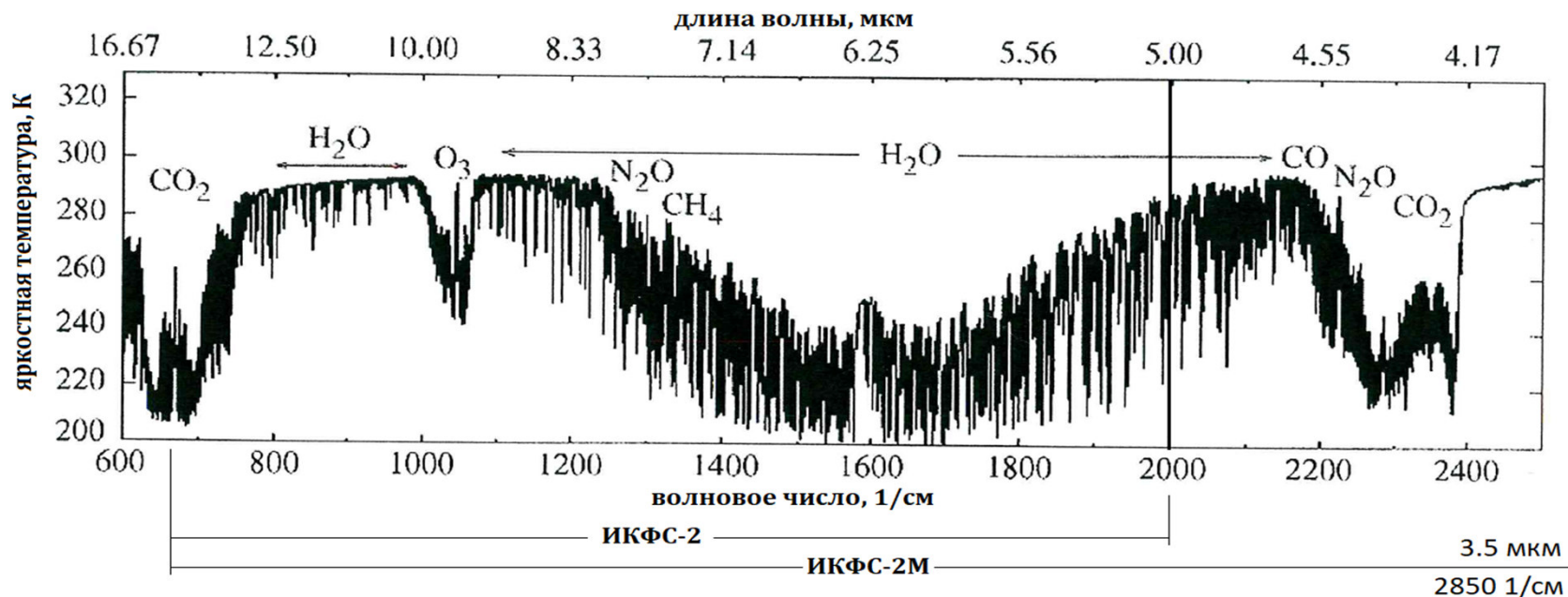
Основные технические характеристики

1	Рабочий спектральный диапазон	5-15 мкм (660-2000 см ⁻¹)
2	Спектральное разрешение (без учета аподизации)	0.4 см ⁻¹
3	Погрешность радиометрической калибровки ($\lambda = 11 \dots 12$ мкм, $T = 280 \dots 300$ К)	< 0.5 К
4	Радиометрический шум NESR (пороговая СПЭЯ), [мВт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·см]	0.2 @ $\lambda = 6$ мкм 0.1-0.15 @ $\lambda = 13$ мкм 0.4 @ $\lambda = 15$ мкм
5	Угловой диаметр поля зрения Диаметр поля зрения в подспутниковой точке	40 мрад 30 км
6	Ширина полосы обзора Шаг сканирования по полосе обзора	1000...2500 км 60...110 км
7	Время съема интерферограммы	0.5 с
8	Поток информации	600 кбит/с
9	Масса	50 кг
10	Энергопотребление (среднее за виток)	50 Вт



1. Рабочий спектральный диапазон

Цель: расширение номенклатуры целевой продукции до уровня зарубежных приборов-аналогов (фурье-спектрометры IASI/MetOp и CrIS/SNPP) за счет введения второго инфракрасного канала и расширения спектрального диапазона до (3,6-15,0) мкм.



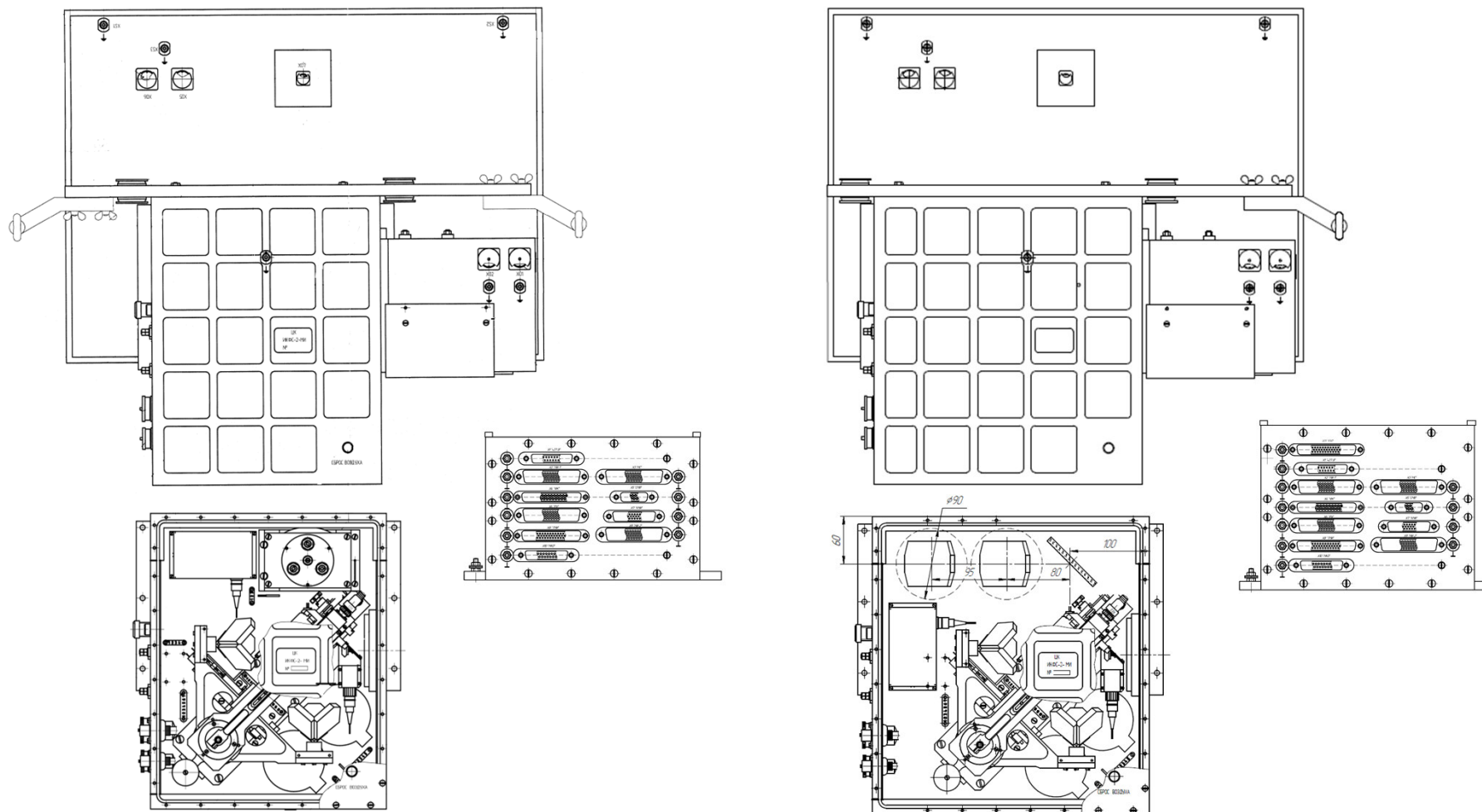
Расширение спектрального диапазона с (5,0-15,0) мкм до (3,6-15,0) мкм позволит:

- 1) повысить вертикальное разрешение восстанавливаемых профилей температуры за счет регистрации излучения в полосе поглощения CO₂ вблизи 4,3 мкм
- 2) обеспечить мониторинг угарного газа в атмосфере (полоса CO вблизи 4,6 мкм)
- 3) повысить точность определения температуры подстилающей поверхности;
- 4) обеспечить наличие дополнительных спектральных каналов для определения CO₂, CH₄, N₂O



Пути модернизации бортового инфракрасного фурье-спектрометра ИКФС-2

1. Рабочий спектральный диапазон: введение второго ИК-канала на (3,6-5,0) мкм



Габариты прибора, требования по массе, энергопотреблению и потоку информации – без изменений. Модуль сканера, узел интерферометра – без изменений. Дорабатывается модуль интерферометра и радиационный холодильник. Вводится дополнительная плата в модуле электронном. Доработка со стороны КА и служебной аппаратуры не требуется.



2. Спектральное и пространственное разрешение

Повышение спектрального разрешения реализуется за счет:

- увеличения диапазона изменения ОРХ в интерферограмме;
- уменьшения мгновенного поля зрения.

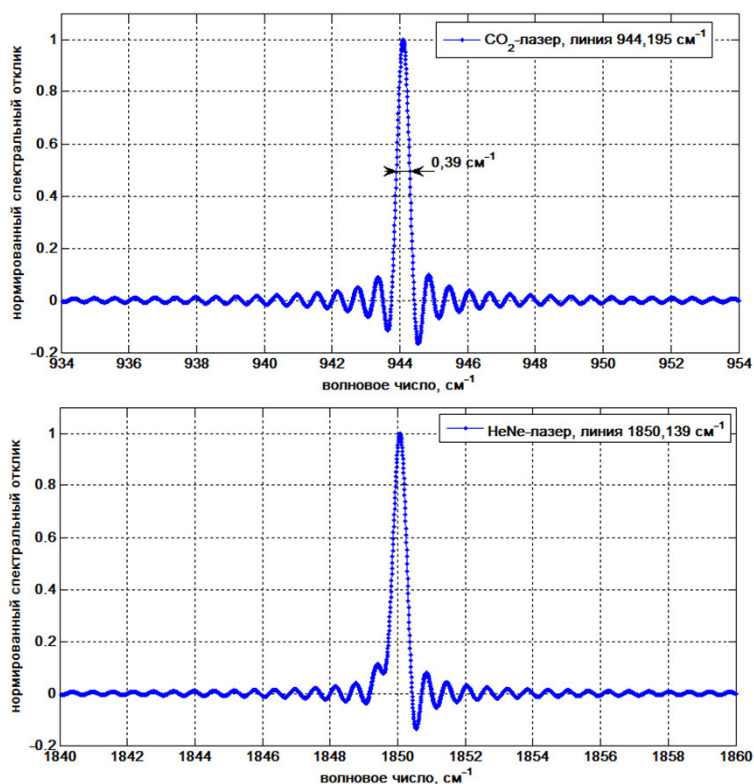


Рис.1 - Графики спектрального отклика прибора на квазимонохроматическое входное излучение (вверху – 10,6 мкм, внизу – 5,4 мкм)

Волновое число, см ⁻¹	Спектральное разрешение, см ⁻¹		
	ИКФС-2: MPX=1,7 см a _{ФП} = 2,0 мм	Вариант 1 MPX=2,0 см a _{ФП} = 2,0 мм	Вариант 2 MPX=2,0 см a _{ФП} = 1,4 мм
667,0	0,37	0,32	0,31
1000,0	0,385	0,34	0,315
1667,0	0,43	0,40	0,33

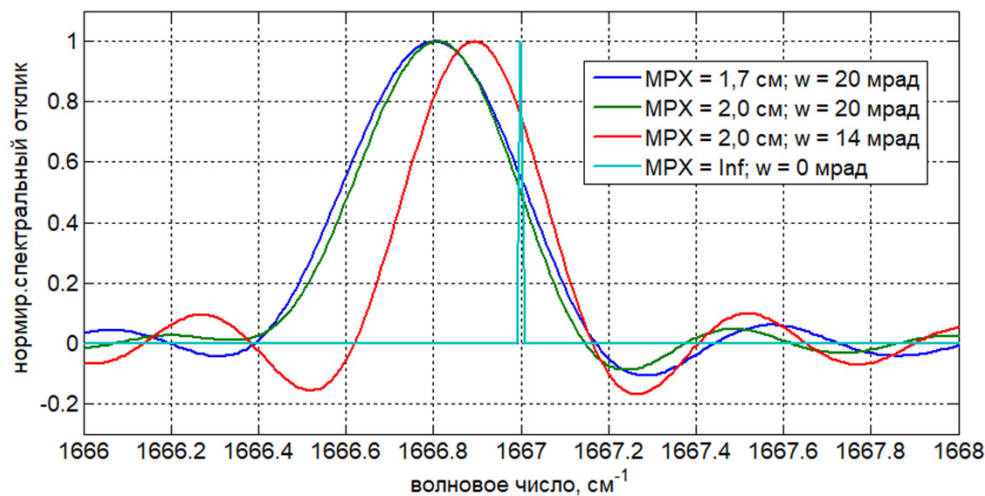


Рис.2 - Графики спектрального отклика прибора на квазимонохроматическое входное излучение 1667 см⁻¹ при различных значениях MPX и поля зрения

3. Пространственное покрытие

В течение 7 лет штатной эксплуатации на орбите прибор ИКФС-2 используется тематическим заказчиком только в режимах съемки с шириной полосы обзора 1000 км (режим «ПО3») и 1500 км (режим «ПО4»).

Режимы «ПО1» и «ПО2» (2000 км и 2500 км) не используются по причине больших значений шага пространственной сетки.

Таблица 1 – Параметры режимов съемки ИКФС-2 в составе КА «Метеор-М» № 2

	ПО1 2500км	ПО2 2000км	ПО3 1500км	ПО4 1000км
Ширина полосы обзора, км ¹⁾	2469	1998	1518	984
Ширина полосы обзора, град.	104,4°	95,1°	81,6°	60,0°
Число точек в полосе обзора	24	21	19	15
Время съема строки, с ²⁾	15,44	13,55	12,22	9,6
Шаг сетки вдоль трека КА, км	114,9	100,8	90,9	71,4
Шаг сетки в полосе обзора, км	103-110	95-103	78-87	68-73

¹⁾ – расстояние между центрами крайних точек в полосе обзора;

²⁾ – с учетом времени реверсирования зеркала сканера в исходное положение, но без проведения калибровочных измерений

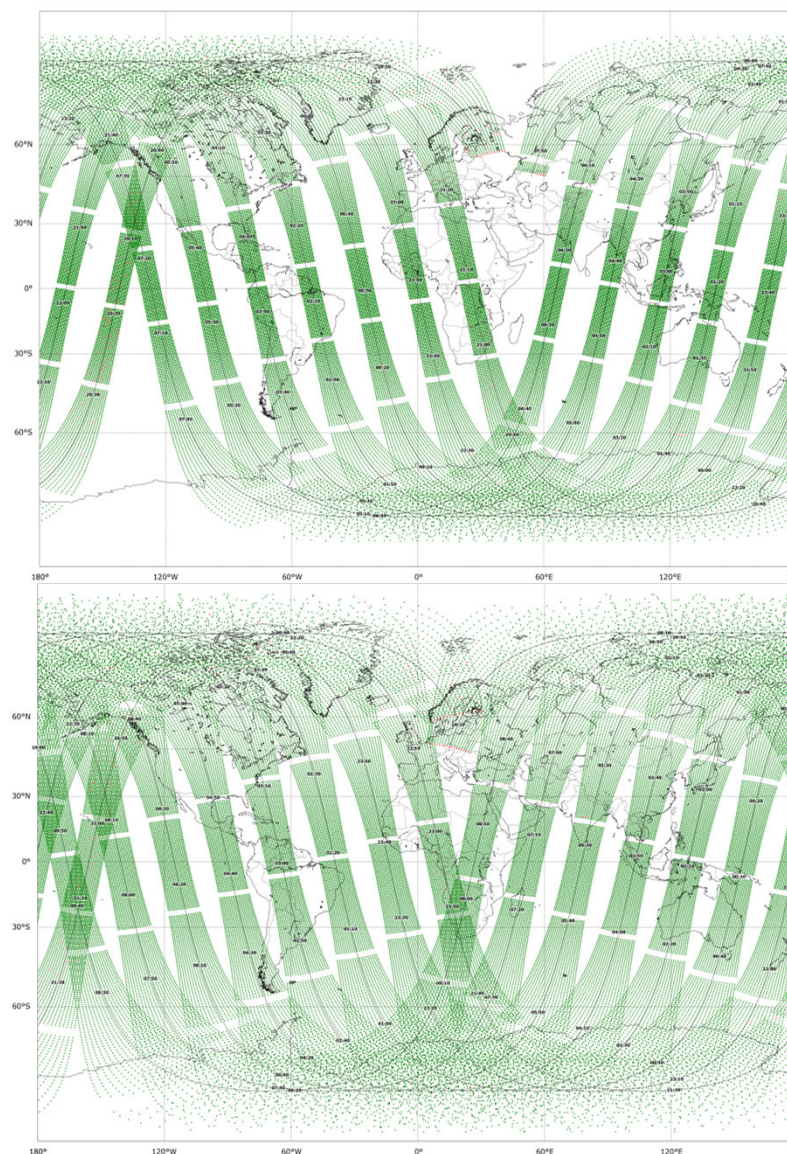


Рис.3 – Примеры маршрутов съемки ИКФС-2 при ширине полосы обзора 1000 и 1500 км (полусуточные данные)



3. Пространственное покрытие

Режим улучшенного пространственного покрытия реализуется за счет:

- 1) уменьшение времени съема интерферограммы (400 мс вместо 500 мс);
- 2) оптимизация закона сканирования по полосе обзора (компромисс между применяемой в ИКФС-2 циклограммой с фиксированным пространственным шагом (Δx [км] = const) и применяемой в зарубежных приборах циклограммой с фиксированным шагом по углу ($\Delta \varphi$ [град] = const).

Режим работы	Режим «ПО1»		Режим «ПО2»		Режим «ПО3»		Режим «ПО4»	
	Станд. покрытие	Улучш. покрытие	Станд. покрытие	Улучш. покрытие	Станд. покрытие	Улучш. покрытие	Станд. покрытие	Улучш. покрытие
Ширина полосы обзора, км	2469 км	2504 км	1998 км	2064 км	1518 км	1711 км	984 км	1197 км
Ширина полосы обзора, градусов	104,4°	105,0°	95,1°	96,6°	81,6°	87,6°	60,0°	69,6°
Угловой шаг сканирования по полосе	1,8°-7,5°	4,2°-5,1°	2,4°-6,9°	4,2°-5,1°	2,7°-6,0°	4,2°-4,8°	3,3°-4,8°	3,9°-4,2°
Число измерений в полосе обзора	24	23	21	21	19	20	15	18
Время съема ИФГ, с	500 мс	400 мс	500 мс	400 мс	500 мс	400 мс	500 мс	400 мс
Периодичность ИФГ, с	600 мс	500 мс	600 мс	500 мс	600 мс	500 мс	600 мс	500 мс
Время съема строки, с	15,44 с	12,55 с	13,55 с	11,47 с	12,22 с	10,88 с	9,6 с	9,7 с
Вертикальный шаг сканирования	114,9 км	93,4 км	100,8 км	85,3 км	90,9 км	80,9 км	71,4 км	72,1 км
Горизонтальный шаг сканирования: медианное значение	106 км	94,2 км	100 км	89,7 км	83 км	81,5 км	70,5 км	67,9 км
диапазон, км	103-110 км	74-220 км	95-103 км	74-146 км	78-87 км	70-131 км	68-73 км	61-88 км
Размер пиксела на краю полосы ($\varnothing 30$ км в надире)	129 x 56,7 км ²		93,2 x 49,8 км ²		61x42 км ²	72x45 км ²	43x36 км ²	50x38 км ²

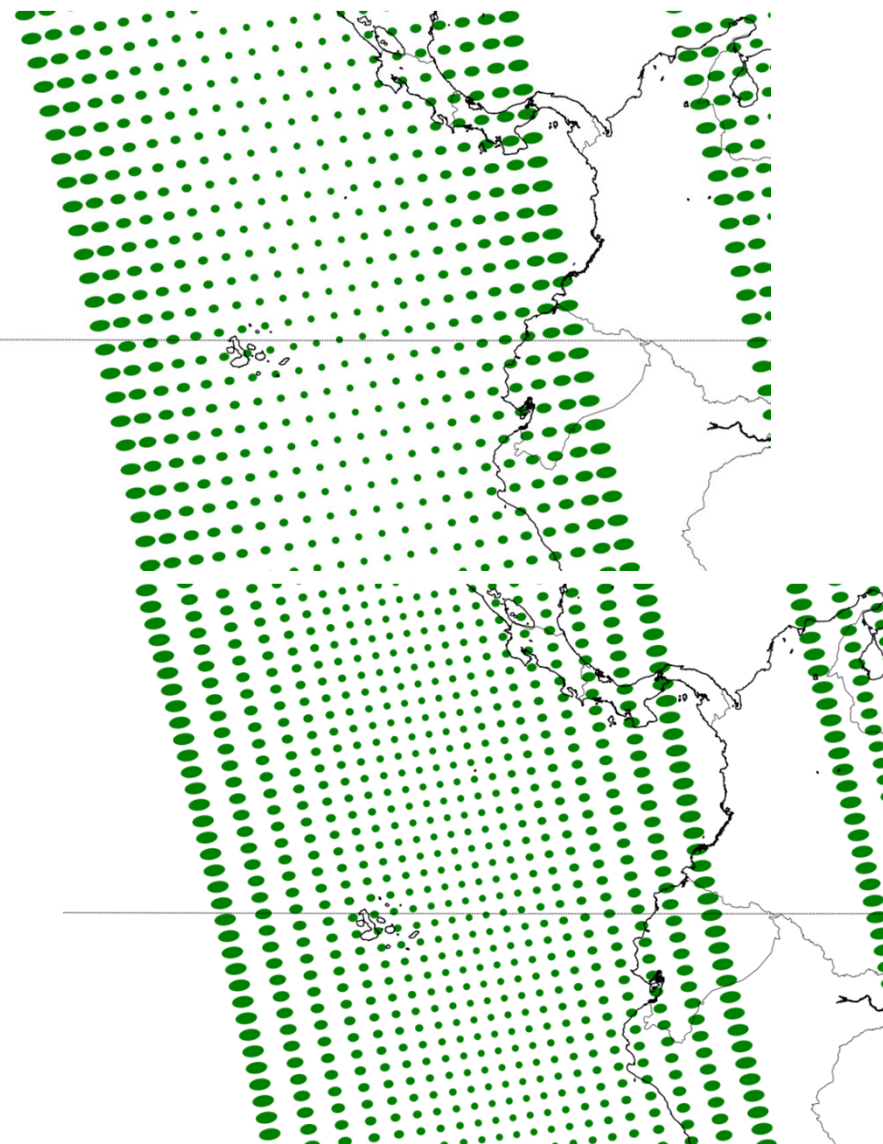
В режиме улучшенного пространственного покрытия количество выходных спектров в единицу времени возрастает на 20% и составляет 155 тыс. спектров в сутки (130 тыс. спектров в сутки в стандартном режиме покрытия).



4. Пространственное покрытие при ширине полосы обзора 2000 км

Параметр	Стандартный режим покрытия	Режим улучшенного покрытия
Время съема ИФГ	500 мс	400 мс
Ширина полосы обзора	1998 км (95,1°)	2064 км (96,6°)
Число измерений в полосе обзора	21	21
Время строки	13,55 с	11,47 с
Шаг сетки вдоль трека КА	100,8 км	85,3 км
Шаг сетки поперек трека КА	100 км (95-103) км	94,2 км (74-146) км
Угловой шаг сканирования	2,4°-6,9°	4,2°-5,1°
Размер пиксела на краю полосы	93,2 x 49,8 км ²	

Стандартный режим покрытия



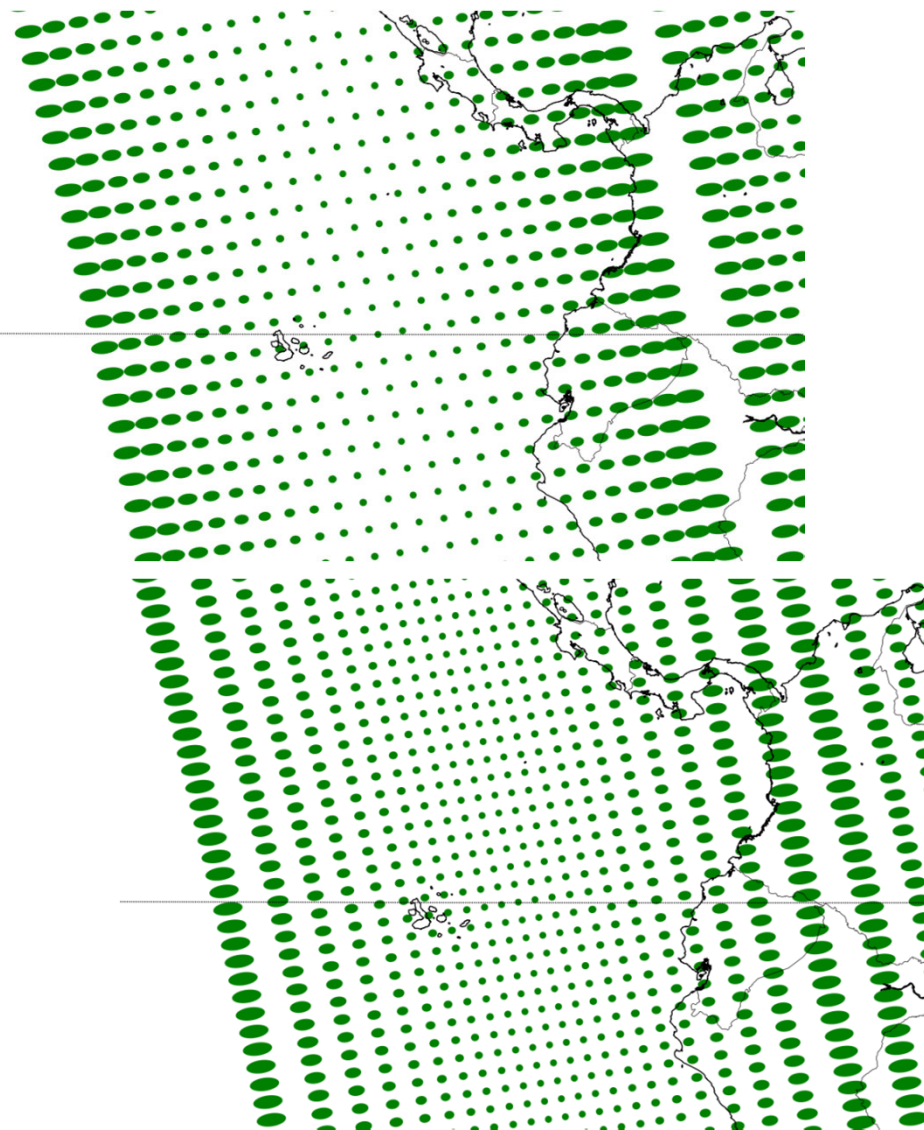
Режим улучшенного покрытия



Режим «ПО1» (2500 км)

Параметр	Стандартный режим покрытия	Режим улучшенного покрытия
Время съема ИФГ	500 мс	400 мс
Ширина полосы обзора	2469 км (104,4°)	2504 км (105,0°)
Число измерений в полосе обзора	24	23
Время строки	15,44 с	12,55 с
Шаг сетки вдоль трека КА	114,9 км	93,4 км
Шаг сетки поперек трека КА (медиана)	106 км (103-110) км	94,2 км (74-220) км
Угловой шаг сканирования	1,8°-7,5°	4,2°-5,1°
Размер пиксела на краю полосы	129 x 56,7 км ²	

Стандартный режим покрытия



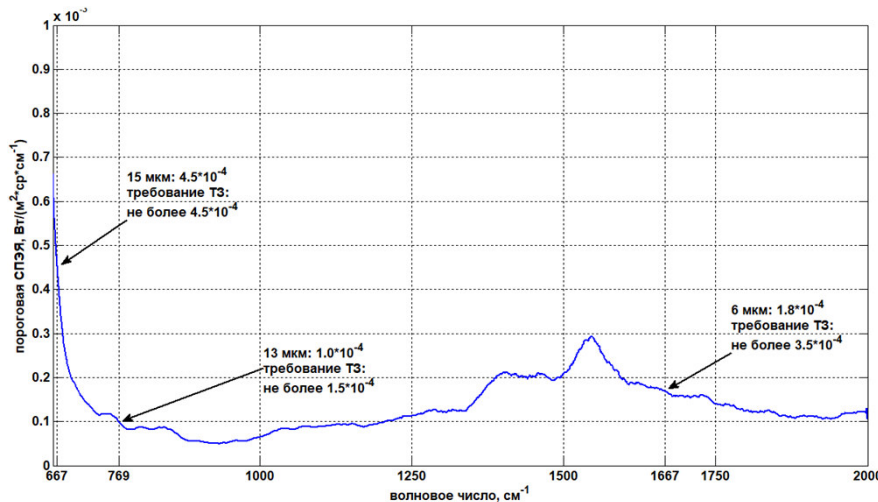
Режим улучшенного покрытия



4. Радиометрический шум (пороговая СПЭЯ)

NESR – пороговая спектральная яркость

NEdT @ 280 К – пороговая разность температур
(для фикс. яркостной температуры объекта)



$$NESR(\nu) = \frac{4MPD \cdot \sigma_{ш}}{A \cdot \Omega \cdot \tau(\nu) \cdot \eta_{cd}(\nu) \cdot \mu(\nu) \cdot S(\nu) \cdot \sqrt{T}}$$

$\sigma_{ш}$ – СКЗ шума сигнала на выходе ФП

L – максимальная оптическая разность хода

T – время съема интерферограммы

A – площадь входного зрачка

Ω – мгновенное поле зрения

$\tau(\nu)$ – пропускание оптической системы

$\eta_{cd}(\nu)$ – эффективность светоделиителя

$S(\nu)$ – чувствительность ФП

$\mu(\nu)$ – эффективность модуляции

Улучшение спектральных и пространственных характеристик прибора приводит к увеличению радиометрического шума прибора:

- увеличение МРХ с 1,7 до 2,0 см → радиометрический шум ↑ на ~15 %
- уменьшение времени съема ИФГ с 500 до 400 мс → радиометрический шум ↑ на ~10 %
- уменьшение мгновенного поля зрения с 20 до 14 мрад → радиометрический шум ↑ на ~30 %

Мероприятия по уменьшению радиометрического шума:

- 1) повышение спектрального пропускания оптической системы
- 2) уменьшение рабочей температуры фотоприемника (КРТ-фоторезистор)



1. Повышение спектрального пропускания оптической системы

1.1. Замена объектива (однолинзовый объектив с асферической поверхностью вместо трехлинзового объектива) при сохранении качества изображения

1.2. Реализация съемного (технологического) входного окна модуля интерферометра

Результат 1: повышение спектрального пропускания во всем диапазоне более чем на 20%, а для диапазона 14-15 мкм – на 50% и более (для 15 мкм – вдвое).

Результат 2: расширение спектрального диапазона до 15,5 мкм (645 см^{-1}).

2. Уменьшение рабочей температуры фотоприемника

2.1. Снижение температуры основания МИ (5°C)

2.2. Тепловая развязка основания МИ и корпуса радиационного холодильника (РХ)

2.3. Установка радиатора корпуса РХ

Результат 1: снижение температуры корпуса РХ с $(0...5)^\circ\text{C}$ до $(-35...-30)^\circ\text{C}$

Результат 2: снижение температуры фотоприемника на $(3-3.5)$ градуса (увеличение обнаружительной способности ФП на 15%)



Заключение

Аппаратура ИКФС-2 более 7 лет штатно функционирует на орбите в составе КА «Метеор-М» № 2. Прибор обеспечивает ежесуточное измерение 130 тысяч калиброванных спектров атмосферы, используемых Росгидрометом для решения задач оперативной метеорологии. Прибор позволяет определять общее содержание всех основных климатически значимых МГС атмосферы, в том числе CO₂, CH₄, N₂O, O₃, водяной пар, а также фреоны.

Аппаратура ИКФС-2 может быть доработана в части введения второго ИК-канала на (3,6-5,0) мкм, а также в части повышения спектрального разрешения, пространственного разрешения и циклограммы сканирования под конкретную целевую задачу.

Прибор может быть адаптирован под платформу малого КА типа «Канопус-В», в том числе в части изменения способа захолаживания фотоприемника (с применением микрокриогенной системы охлаждения). Это позволит дополнительно уменьшить габариты прибора и снять ряд ограничений по расположению и установке изделия на платформе КА.