

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСАНИЯ**

УДК 629.785

**Многозональное сканирующее устройство
малого разрешения МСУ-МР для космического
информационного комплекса «Метеор-М».
Принцип работы, эволюция, перспективы**

**Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин¹,
А. В. Рыжаков, М. Б. Смелянский, А. Г. Фролов²**

^{1,2}к. т. н.

АО «Российские космические системы»

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Аннотация. Рассматриваются принцип действия, конструктивные особенности и направления развития приборов МСУ-МР, предназначенных для эксплуатации в составе метеоспутников «Метеор-М» № 1 и № 2. Аппаратура производит непрерывную съемку земной поверхности. Наблюдение поводится в шести спектральных каналах. Пространственное разрешение в надире 1 км, полоса захвата 2950 км.

Ключевые слова: метеоспутники, спектрально-зональная съемка Земли, сканирующее устройство

**Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR
for space-based informational system “Meteor-M”.
The principle of operation and development prospects**

**N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin¹,
A. V. Ryzhakov, M. B. Smeljansky, A. G. Frolov²**

^{1,2}candidate of engineering science

Joint Stock Company “Russian Space Systems”

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. This paper explains the principle of operation, construction details and development prospects of MSU-MR apparatus series. These apparatuses are intended for operation on board of meteo satellites «Meteor-M» № 1 and № 2. MSU-MR uninterruptedly observes the Earth in six spectral bands with spatial resolution of 1 km in the 2950 km field of view.

Key words: meteo satellites, multiband remote sensing of the Earth, scanning system

Введение

В настоящее время, в соответствии с Концепцией развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли [1], предполагается значительное увеличение группировки специализированных гидрометеорологических спутников серии «Метеор-М» (разработчик КА АО «Корпорация “ВНИИЭМ”»), функционирующих на солнечно синхронных орбитах высотой 830 км. Одним из важнейших приборов, установленных на этих КА, является многозональное сканирующее устройство малого разрешения — МСУ-МР (рис. 1), разработанное в АО «Российские космические системы» для решения гидрометеорологических задач. Первый прибор МСУ-МР был изготовлен для КА «Метеор-М» № 1, эксплуатация которого началась в октябре 2009 г. и успешно продолжается до настоящего времени (уже более 5 лет). Устройство МСУ-МР обеспечивает глобальное непрерывное наблюдение облачности и поверхности Земли в полосе захвата 2950 км с пространственным разрешением 1 км в спектральном диапазоне от 0,5 до 12,5 мкм. Основные технические характеристики приборов МСУ-МР (находящихся в настоящее время в эксплуатации) приведены в табл. 1. Информация (фрагменты изображений), формируемая МСУ-МР, представлена на рис. 2.

Аналогом устройства МСУ-МР является американский радиометр AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), входящий в состав измерительных комплексов спутников NOAA (высота орбиты 870 км) и обеспечивающий получение изображений в 6 спектральных каналах (0,58–0,68, 0,725–1,1, 1,58–1,64, 3,55–3,93, 10,3–11,3 и 11,4–12,4 мкм) с разрешением 1,1 км.

С помощью информации, получаемой с аппаратуры МСУ-МР КА «Метеор-М», возможно решение различных прикладных и научно-исследовательских задач. Прежде всего, это оперативное прогнозирование погодных условий на основе измерений параметров окружающей среды: температура поверхности, наличие осадков, распределение облаков, скорость ветра и т. д. [4]. По данным, поступающим со спутника, проводятся исследования климата и факторов, влияющих на его изменение, исследуются движения ледников и айсбергов,

вулканическая активность, возможно раннее обнаружение лесных пожаров.

В настоящее время на орбитах успешно функционируют два спутника «Метеор-М»: № 1 (запущен в 2009 г.) и № 2 (запущен в 2011 г.) с приборами МСУ-МР № 1 и № 2 соответственно. При разработке МСУ-МР № 1 многие технологические и конструктивные решения были впервые применены в практике российского космического приборостроения (малоэлементные сборки из приемников инфракрасного диапазона, система пассивного радиационного охлаждения этих приемников (РХ), системы бортовой калибровки ИК-каналов и т. д.). Некоторые из примененных решений крайне затруднительно либо и вовсе невозможно проверить при наземной отработке прибора. Летные испытания, подтвердив в целом правильность реализованных принципов построения аппаратуры, выявили некоторые недостатки первого прибора. Анализ полученных снимков и телеметрической информации позволил определить факторы и степень их воздействия, оказывающих наибольшее влияние на качество получаемой информации, и прибор МСУ-МР № 2 создавался уже с учетом всех выявленных проблем, пожеланий и замечаний конечных потребителей спутниковых данных.

Принцип работы

Принципиальная оптическая схема многозонального сканирующего устройства МСУ-МР представлена на рис. 3. Устройство содержит две идентичные независимые оптико-механические системы (основную и резервную). В процессе работы устройства по команде оператора может быть осуществлен переход на другой комплект.

Каждая оптико-механическая система устройства включает:

- плоское сканирующее зеркало с двухсторонним отражающим покрытием, совершающее непрерывное круговое вращение с помощью привода;
- 6 информационных оптических блоков, формирующих изображения в 6 спектральных диапазонах: 0,5–0,7, 0,7–1,1, 1,6–1,8, 3,5–4,1, 10,5–11,5, 11,5–12,5 мкм;

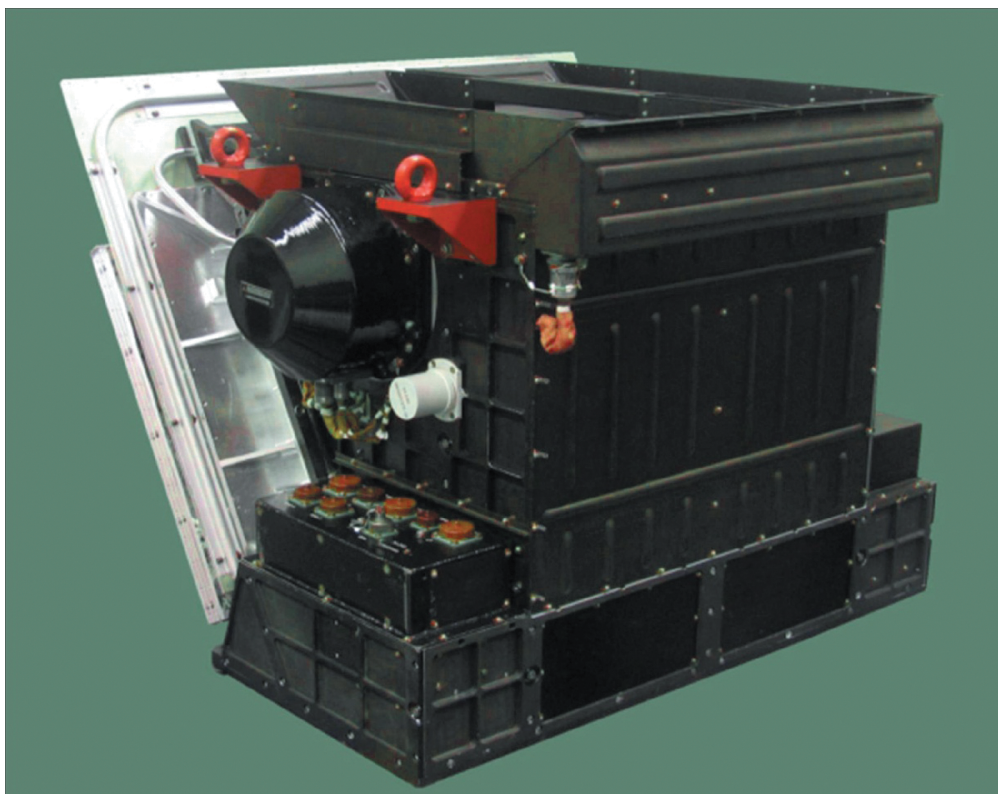


Рис. 1. Внешний вид прибора МСУ-МР

Таблица 1. Тактико-технические характеристики приборов МСУ-МР и их зарубежного аналога

Параметры	МСУ-МР № 1	МСУ-МР № 2	AVHRR
Высота орбиты	835	835	833
Количество каналов	6	6	6
Спектральные диапазоны, мкм	0,5–0,7 0,7–1,1 1,6–1,8 3,5–4,1 10,5–11,5 11,5–12,5	0,5–0,7 0,7–1,1 1,6–1,8 3,5–4,1 10,5–11,5 11,5–12,5	0,58–0,68 0,72–1,00 1,58–1,64 3,55–3,93 10,30–11,30 11,50–12,50
Полоса захвата, км	2800	2950	2900
Разрешение на поверхности, км	1,0	1,0	1,09
Отношение сигнал/шум в видимых и ближних ИК-каналах:			
• 0,5–0,7 мкм;	700	1900	300–500
• 0,7–1,1 мкм;	600	1000	300–500
• 1,6–1,8 мкм	250	500	300–500
Эквивалентная шуму измеряемая разность температур на уровне 300 К ИК-каналов, К:			
• 3,5–4,1 мкм;	0,2	0,09	0,12
• 10,5–11,5 мкм;	0,2	0,04	0,12
• 11,5–12,5 мкм	0,3	0,07	0,12

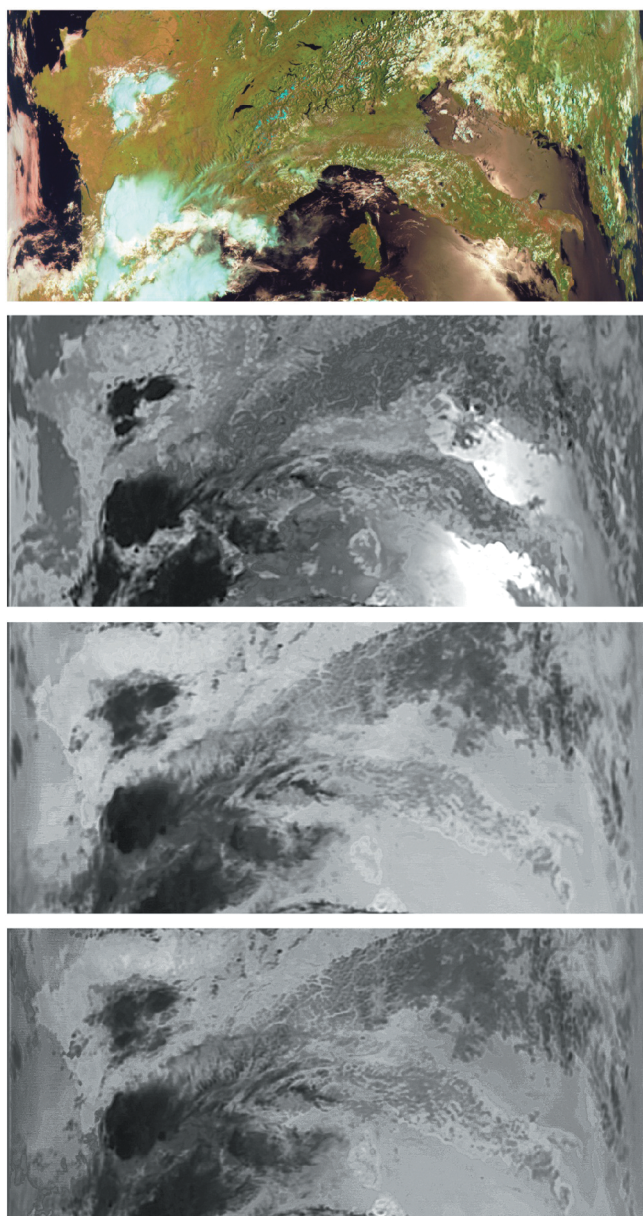


Рис. 2. Информация, формируемая прибором МСУ-МР.

Сверху вниз: синтезированное RGB-изображение (0,5–0,7 мкм; 0,7–1,1 мкм; 1,6–1,8 мкм); 3,5–4,1 мкм; 10,5–11,5 мкм; 11,5–12,5 мкм

– 6 блоков радиометрической бортовой калибровки (по одному на каждый информационный блок), оптически связанные с информационными каналами через сканирующее зеркало и поворотные зеркала.

Для оптимальной компоновки устройства информационные оптические блоки диапазонов от 0,5

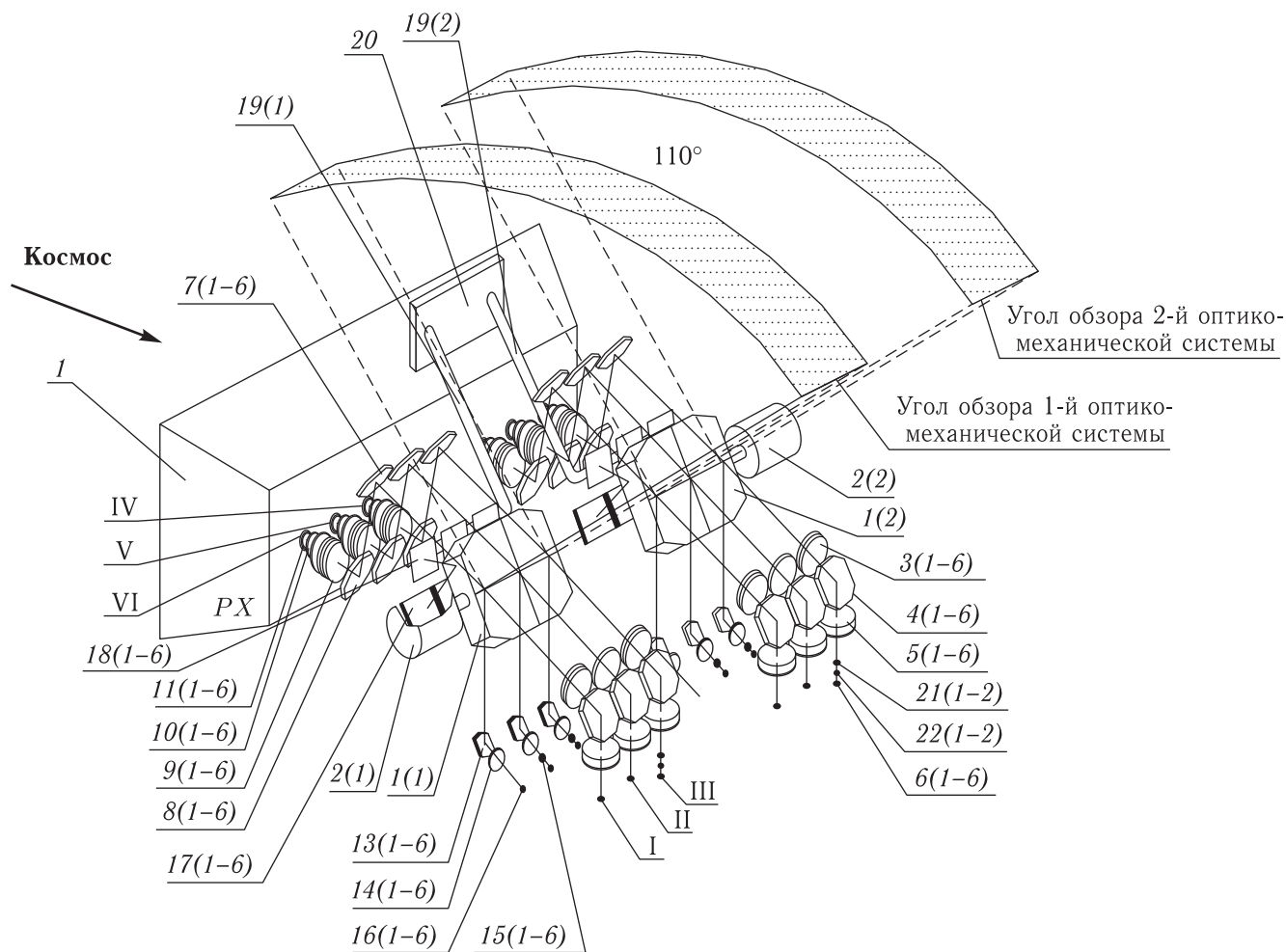
до 1,8 мкм и от 3,5 до 12,5 мкм, а также соответствующие им блоки калибровки расположены по разные стороны сканирующего зеркала.

Охлаждение приемников среднего и дальнего инфракрасных диапазонов (от 3,5 до 12,5 мкм) осуществляется с помощью общей пассивной радиационной системы охлаждения, ориентированной в открытый космос.

Сканирующие зеркала выполнены из ситалла СО-115М и имеют размер $165 \times 175 \times 36$ мм. Зеркала облегчены с помощью системы взаимно-перпендикулярных отверстий, которая также используется для расположения в них элементов оси вращения и стоек рамки, в которой подвешивается зеркало. В процессе работы зеркала совершают равномерное круговое движение со скоростью 3,25 об/с. Вращение сканирующих зеркал осуществляется независимыми приводами вращения. Оси вращения зеркал совпадают с направлением движения космического аппарата. Разворот визирной оси с помощью сканирующего зеркала и движение самого аппарата позволяет осуществить непрерывную трассовую съемку в угле обзора 110° . Зеркала имеют двухстороннее отражающее покрытие, что позволяет снизить скорость вращения привода в два раза и наиболее оптимально разместить оптические блоки, формирующие изображения.

Оптические блоки диапазонов от 0,5 до 1,1 мкм включают: фильтр, формирующий спектральный диапазон, поворотное зеркало, трехлинзовый объектив, имеющий фокусное расстояние $f' = 150$ мм, и входной зрачок $D = 50$ мм, одноэлементный приемник излучения. Размер чувствительного элемента приемника излучения ($0,2 \times 0,2$) мм.

Оптический блок диапазона от 1,6 до 1,8 мкм включает: фильтр, формирующий спектральный диапазон, поворотное зеркало, трехлинзовый объектив, имеющий фокусное расстояние $f' = 150$ мм и входной зрачок $D = 50$ мм, диафрагму диаметром 0,2 мм, систему переноса изображения диафрагмы на приемник излучения и одноэлементный приемник излучения. Так как размер чувствительного элемента приемника излучения в канале ($0,3 \times 0,3$) мм, то мгновенное поле канала формируется диафрагмой диаметром 0,2 мм, а перенос излучения с диафрагмы на приемник излучения осуществляется дополнительной оптической системой.



Видимый и ближние ИК-каналы

- I. $\lambda = 0,5-0,7$ мкм
- II. $\lambda = 0,7-1,1$ мкм
- III. $\lambda = 1,6-1,8$ мкм

Средний и дальний ИК-каналы

- IV. $\lambda = 3,5-4,1$ мкм
- V. $\lambda = 10,5-12,5$ мкм
- VI. $\lambda = 11,5-12,5$ мкм

Рис. 3. Принципиальная оптическая схема устройства МСУ-МР:

1 — сканирующее зеркало, 2 — привод, 3 — фильтр, 4 — поворотное зеркало, 5 — объектив, 6 — приемник излучения, 7, 8 — поворотные зеркала, 9 — объектив, 10 — фильтр, 11 — приемник излучения, 12 — радиационная система охлаждения приемников излучения, 13 — поворотное зеркало, 14 — объектив канала калибровки в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 15 — фильтр канала калибровки в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 16 — эталонный стабилизированный источник излучения в диапазоне 0,5–1,8 мкм, 17 — имитатор абсолютно черного тела с температурой 313 К, 18 — имитатор абсолютно черного тела с температурой 258 К, 19 — тепловая трубка, 20 — радиационный экран охлаждения имитатора абсолютно черного тела 18, 21 — диафрагма, 22 — система переноса изображения

Оптические блоки диапазонов от 3,5 до 12,5 мкм включают: поворотные зеркала, трехлинзовый объектив, фильтр, формирующий спектральный диапазон, четырехэлементный приемник излучения. Объективы выполнены из германия, имеют фокусное расстояние $f' = 40$ мм и входной зра-

чок $D = 45$ мм. Размер чувствительного элемента приемника ($0,05 \times 0,08$) мм. ИК-приемники ориентированы вдоль оси сканирования, в результате каждая точка поверхности проецируется последовательно на каждый элемент фотоприемника, а затем производится усреднение четырех полученных отсчетов

с каждой точки, то есть в ИК-диапазоне реализован режим временной задержки и накопления сигнала (ВЗН). Конструктивно приемники жестко закреплены на радиационной системе охлаждения, ориентированной на космическое пространство, что позволяет получить в процессе эксплуатации устройства в зоне чувствительных элементов приемников температуру 78–80 К.

Задачей блоков калибровки информационных каналов является формирование эталонных потоков излучения определенного спектрального состава и заданной интенсивности (близкой к верхнему уровню динамического диапазона), которые вводятся в основной (измерительный) тракт устройства и проходят через все его элементы. Ввод излучения, формируемого блоками калибровки, осуществляется с помощью сканирующего зеркала в каждой строке вне ее активной части.

Блоки калибровки информационных каналов, обеспечивающих получение изображений в диапазоне от 0,5 до 1,8 мкм, включают: поворотное зеркало, объектив, фильтр и стабилизированный источник излучения (лампа накаливания ТРШ1600-2200).

В состав блоков калибровки каналов в диапазоне от 3,5 до 12,5 мкм входят два имитатора абсолютно черных тел, одно из которых имеет температуру 320 К, а другое 255 К. Заданная температура и ее стабилизация в процессе эксплуатации на имитаторах абсолютно черных тел, имеющих температуру 320 К, достигается с помощью регулируемого нагревательного элемента. На имитаторах абсолютно черных тел, имеющих температуру 255 К, — с помощью радиационного экрана, ориентированного на космос, причем связь между имитаторами абсолютно черных тел и экраном осуществляется через тепловые трубки, а значение и стабилизация температуры — регулируемым нагревательным элементом.

Требуемая рабочая температура ИК-фотоприемников составляет 78–80 К. Для обеспечения температурного режима применяется система пассивного радиационного охлаждения (РХ) (рис. 4). Преимущество подобных систем в том, что они имеют практически неограниченный ресурс работы и не требуют постоянного электропитания в процессе работы.

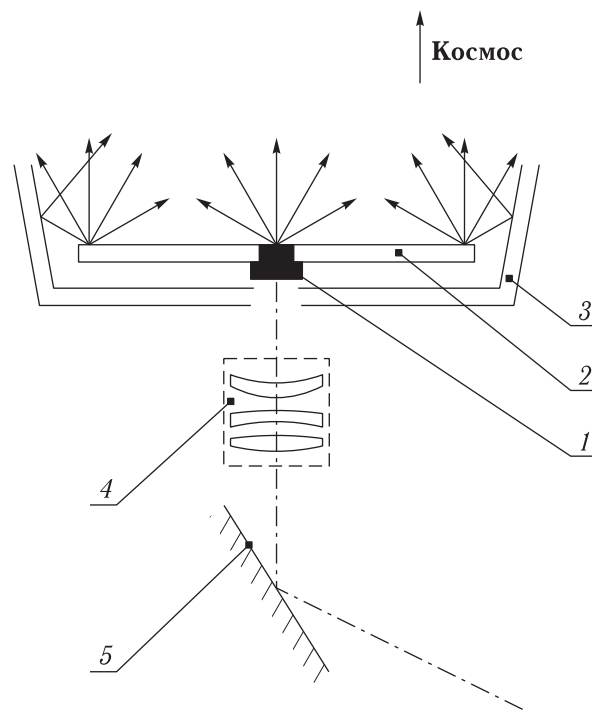


Рис. 4. Система радиационного охлаждения ИК-фотоприемников: 1 — фотоприемник, 2 — вторая ступень РХ, 3 — изолирующие слои первой ступени РХ, 4 — объектив, 5 — система поворотных зеркал

Фотоприемники 1 устанавливаются на плоской поверхности — второй ступени РХ 2, имеющей равновесную (при штатной ориентации космического аппарата) температуру 78–80 К. Для исключения попадания излучения от теплых корпусных элементов используются изолирующие слои первой ступени 3. Температура первой ступени составляет 150 К. Обязательное условие для работы РХ — отсутствие излучения Земли и Солнца в поле зрения системы охлаждения. Отсюда возникает ограничение по размещению системы на борту КА в зависимости от параметров орбиты.

В процессе создания устройства МСУ-МР российскими предприятиями была разработана и изготовлена современная элементная база: электромеханический привод сканирующего зеркала (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»»), многоэлементные ИК-фотоприемники (НПО «Сапфир»), радиационная система охлаждения ИК-фотоприемников (НПО НИИЭМ), в АО «Российские космические системы» проведен большой комплекс работ по модернизации стендового метрологического оборудования.

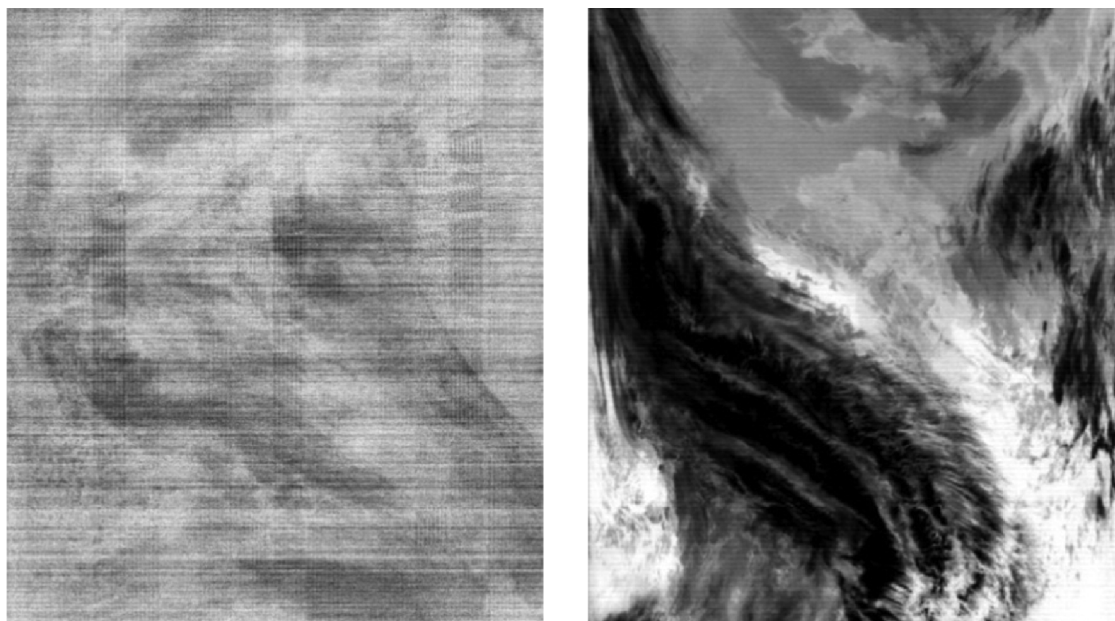


Рис. 5. Влияние криоосадков на качество изображения канала 11,5–12,5 мкм. Слева — до «очистки», справа — после «очистки»

Конструктивные решения, реализованные при создании МСУ-МР № 2, наиболее влияющие на качество получаемой информации

Одним из наиболее трудно устранимых факторов, ухудшающих качество изображения и радиометрическую точность аппаратуры, является образование криоосадков, состоящих в основном из молекул воды, осаждающихся на наиболее холодных поверхностях, в частности на входных окнах фотоприемников.

Для борьбы с данным эффектом применяется режим «очистки» РХ, при котором производится нагрев второй ступени до 40 °С. Влияние криоосадков на качество изображения можно визуально оценить по рис. 5.

Однако при проведении сеанса «очистки» молекулы воды остаются внутри РХ и с течением времени опять осаждаются на входных окнах фотоприемников. Для борьбы с этим явлением в МСУ-МР № 2 была изменена конструкция РХ, а именно изменено расположение теплоизолирующих стенок. Они располагаются под углом относительно друг друга —

расходятся к внешней поверхности РХ (в МСУ-МР № 1 стенки располагаются параллельно), что позволяет молекулам воды после нескольких соударений со стенками в процессе «очистки» улететь в открытое пространство. Отличие конструкции первого и второго варианта радиационного холодильника показаны на рис. 6.

Кроме того, была изменена конструкция фотоприемников, позволяющая обеспечить повышенную температуру входного окна фотоприемника относительно его корпуса. В результате происходит перераспределение криоосадков в процессе охлаждения — большая часть молекул осаживается на окружающих стенках и более холодном корпусе.

Другая сложность работы с пассивными системами радиационного охлаждения заключается в невозможности полной имитации условий эксплуатации при наземной отработке, а расчеты имеют большие погрешности из-за недостаточного объема информации об изменении свойств материалов, в частности теплоемкости и модуля упругости, при криогенных температурах. В МСУ-МР, установленном на КА «Метеор-М» № 1, температура фотоприемников составила 100 К, что не позволило реализовать требуемую чувствительность примененных фотоприемников. Для уменьшения

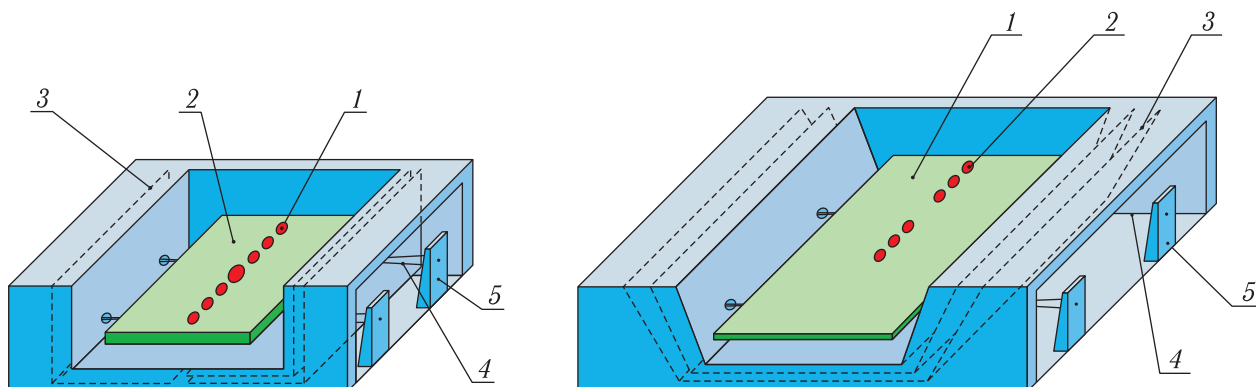


Рис. 6. Конструкция радиационного холодильника прибора МСУ-МР № 1 (слева) и МСУ-МР № 2 (справа):
1 — фотоприемники, 2 — вторая ступень радиатора (78 К), 3 — первая ступень радиатора (150 К),
4 — нити, удерживающие вторую ступень, 5 — стойки крепления нитей

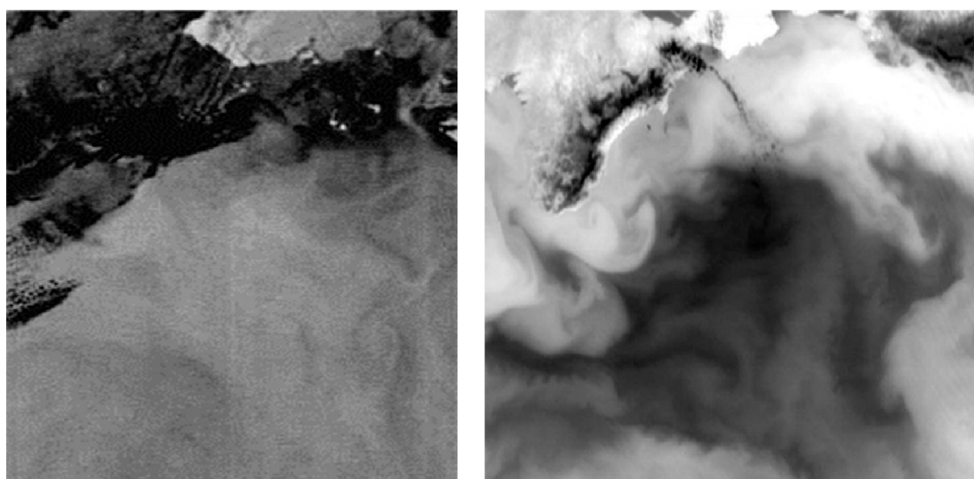


Рис. 7. Поверхность Черного моря, сравнение информации в канале 10,5–11,5 мкм.

КА «Метеор-М» № 1 (слева): 26.05.10 г., $\Delta T_{\text{ЭКВ}} = 0,15$ К;

КА «Метеор-М» № 2 (справа): 29.09.14 г., $\Delta T_{\text{ЭКВ}} = 0,05$ К

температуры в следующем приборе, установленном на КА «Метеор-М» № 2, была увеличена площадь излучающей поверхности системы охлаждения и проведены некоторые конструктивные доработки, что позволило в результате достигнуть рабочей температуры 78 К и повысить радиометрическую чувствительность в три раза. Эффективность этого решения хорошо видна на снимках, приведенных на рис. 7.

Принятые меры позволили значительно увеличить скорость очистки внутреннего объема РХ от криоосадков. Сравнительная количественная оценка скорости изменения значений динамического диапазона видеосигналов в ИК-каналах аппаратуры МСУ-МР № 1 и № 2 представлена на рис. 8.

При составлении глобальных метеорологических карт земной поверхности по видеоинформации, получаемой прибором МСУ-МР № 1, было установлено, что полоса обзора 2800 км при высоте орбиты 835 км не обеспечивает перекрытие изображений поверхности Земли на экваторе. Во втором приборе было увеличено поле зрения на угол $2,07^\circ$, при этом полоса обзора составила 2950 км, что позволило составить полную карту поверхности Земли без пропусков в экваториальной зоне (рис. 9).

Комплекс конструктивных доработок позволил значительно повысить радиометрическую точность прибора. По этому показателю прибор МСУ-МР № 2 находится на современном уровне аппаратуры подобного класса.

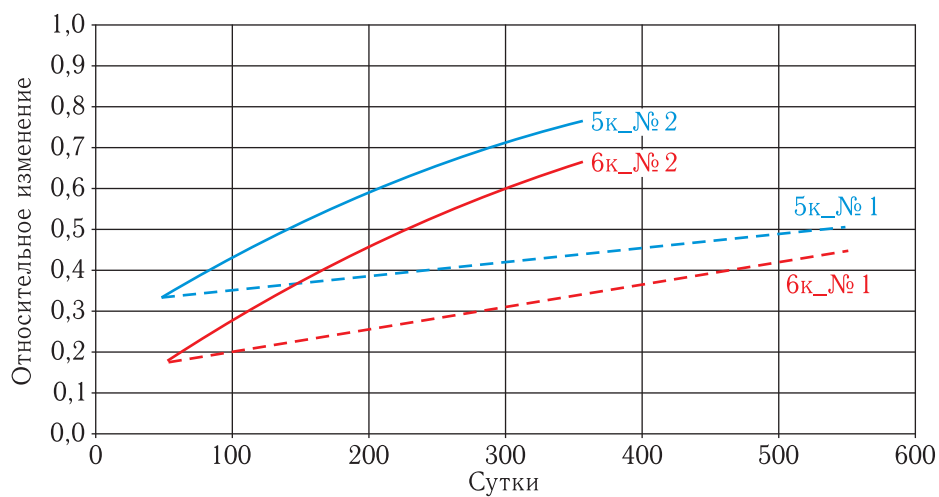


Рис. 8. Изменение значений динамического диапазона ИК-каналов аппаратуры МСУ-МР № 1 и МСУ-МР № 2

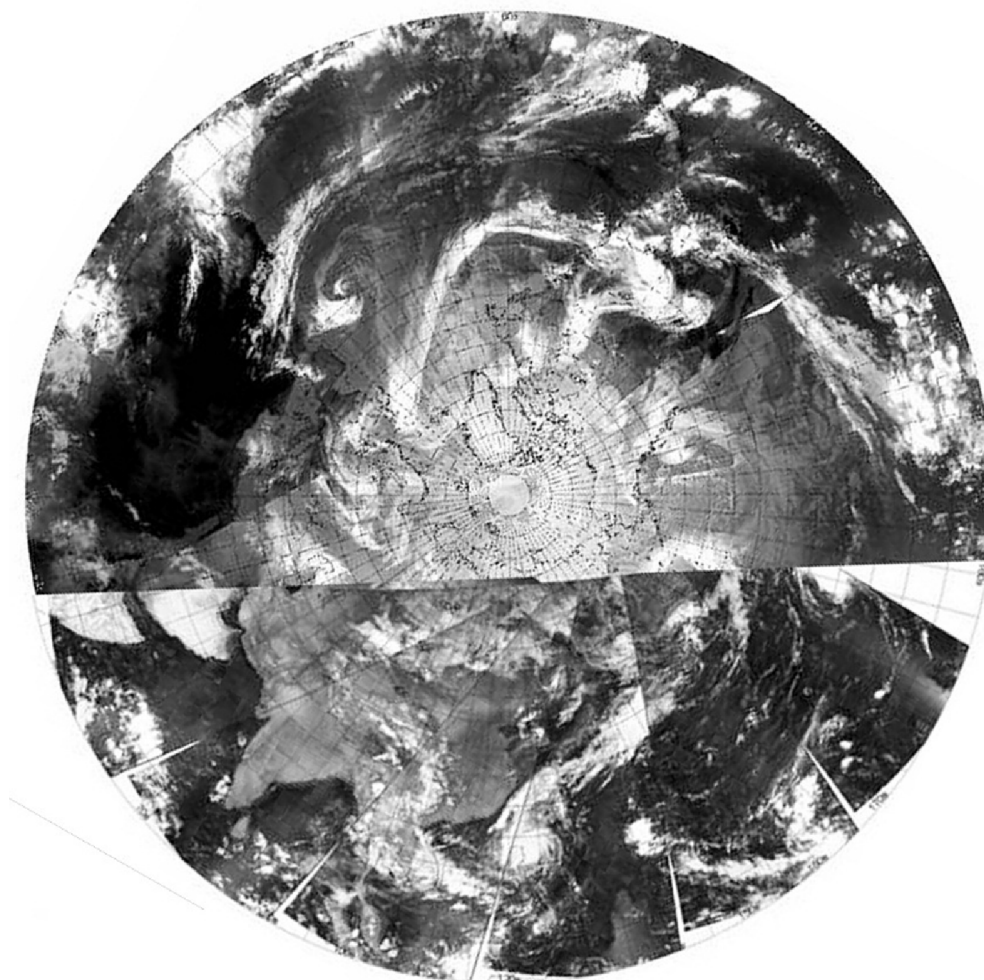


Рис. 9. Увеличение угла обзора МСУ-МР № 2 (сверху) на угол $2,07^\circ$ относительно МСУ-МР № 1 (снизу)

Будущее

В настоящее время в АО «Российские космические системы» ведутся работы по изготовлению МСУ-МР для КА «Метеор-М» № 2–1 и № 2–2 и подготовка к производству для КА «Метеор-М» № 2–3 и № 2–4. Запуск этих спутников позволит создать полноценную низкоорбитальную гидрометеорологическую группировку.

Одновременно с изготовлением новой аппаратуры продолжается работа по ее совершенствованию:

- корректируется система управления бортовыми эталонными источниками излучения инфракрасных каналов, что позволит исключить влияние нештатных ситуаций (например, разворота космического аппарата) на стабильность радиометрической точности и обеспечит возможность коррекции характеристики преобразования (зависимость выходного сигнала от радиационной температуры) для наблюдения протяженных источников излучения с повышенной температурой;

- разрабатывается система бортовой фокусировки ИК-объективов, которая позволит значительно сократить продолжительность и стоимость наземной отработки аппаратуры, а также обеспечит проведение фокусировки в реальных орбитальных условиях;

- разрабатывается система обеспечения температурного режима фотоприемников видимых диапазонов спектра с повышенной стабильностью для повышения радиометрической точности измерения;

- проводятся конструктивные и электротехнические изменения, направленные на ускорение и автоматизирование создания приборов.

Список литературы

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. М.: Роскосмос, 2006.
2. Патент № 2306583 РФ. G02B 23/12. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображений в широком угле обзора / Акимов Н.П., Гектин Ю.М., Новиков М.В., Смелянский М.Б., заявлено 12.12.2005. Оpubл. 20.09.2007.
3. <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>
4. *Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М.* Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014.