

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

УДК 621.396

Многозональное сканирующее устройство для геостационарного метеоспутника «Электро-Л»

Р. В. Андреев, Н. П. Акимов, К. В. Бадаев, Ю. М. Гектин¹, А. А. Зайцев, А. В. Рыжаков,
М. Б. Смелянский, Н. А. Сулиманов, 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-ГС, предназначенных для эксплуатации в составе геостационарных метеоспутников «Электро-Л» № 1 и № 2. Созданная аппаратура обеспечивает полный обзор полушария Земли за 5 мин с периодичностью до 15 мин. Наблюдение поводится в десяти спектральных каналах. Три диапазона видимой области спектра с пространственным разрешением в надире 1 км и семь каналов инфракрасного диапазона с пространственным разрешением 4 км.

Ключевые слова: геостационарные метеоспутники; спектрально-зональная съемка Земли; сканирующее устройство

Multiizone scanning apparatus for geosynchronous meteorological satellite «Electro-L»

R. V. Andreev, N. P. Akimov, K. V. Badaev, Yu. M. Gektin¹, A. A. Zaitsev, A. V. Ryzhakov,
M. B. Smeljanskij, N. A. Sulimanov, A. G. Frolov²

^{1,2}candidate of engineering science,

Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: petrov_sv@spacecorp.ru

Abstract. The principle of operation of MSU-GS apparatus, construction details and the primary way of its development are described in this paper. These apparatuses are intended for exploitation at the board of geostationary meteorological satellites "Electro-L" № 1, 2. It provides full observation of Earth semi-sphere during 5 minutes every 15–30 minutes. There are ten spectral bans at the apparatus. Three of there are at the visible range of spectrum with the spatial resolution of 1 km, other seven bands are infrared with the spatial resolution of 4 km.

Key words: geostationary meteorological satellites, spectral-bands Earth observation, scanning system

Введение

20 января 2011 г. на геостационарную орбиту Земли был успешно выведен метеорологический спутник «Электро-Л» № 1, созданный в НПО им. С. А. Лавочкина. Основной и наиболее сложный по конструктивному исполнению прибор этого аппарата — многозональное сканирующее устройство (МСУ-ГС № 1), разработанное и изготовленное АО «Российские космические системы». Задачей этого прибора является регулярное наблюдение всего диска Земли в нескольких спектральных диапазонах видимой и инфракрасной областях спектра для решения прежде всего ряда важных гидрометеорологических и природоведческих задач [1, 2]. Эффективность использования получаемой информации непосредственно связана с ее высокой радиометрической точностью, которая обеспечивается бортовыми системами калибровки МСУ-ГС № 1.

Приборы подобного назначения, но с более низкими характеристиками, разрабатывались и ранее, первый российский геостационарный метеоспутник был разработан ВНИИЭМ и запущен в 1994 г. [3]. Современное поколение спутников, имеющее трехосную стабилизацию в пространстве, потребовало разработки более сложных устройств наблюдения, обладающих двухкоординатными сканирующими системами. Наиболее близкий современный аналог МСУ-ГС № 1 — прибор Imager спутника GOES-12 [4].

Несмотря на технические проблемы, связанные со стабилизацией платформы космического аппарата (КА), прибор МСУ-ГС № 1 продолжает успешно функционировать [5] и предоставляет снимки диска Земли, один из которых приведен на рис. 1.

В настоящее время создан и готовится к запуску КА «Электро-Л» № 2, имеющий в составе модернизированный МСУ-ГС № 2 с абсолютно новым ИК-модулем.

(Далее в тексте будем приводить номер прибора в случае, если существуют принципиальные отличия между первым и вторым вариантом и, соответственно, номер не указывать, если описываемые характеристики или принципы работы общие для двух приборов.)

Основные тактико-технические характеристики аппаратуры

Штатная периодичность съемки составляет 30 мин, однако возможна и удвоенная частота получения снимков для наблюдения за динамическими природными процессами, такими как тайфуны, цунами, ураганы и т. п. В отличие от европейских и американских аналогов, аппаратура МСУ-ГС во всех режимах работы формирует изображение полного диска Земли, а не определенных фрагментов поверхности.

МСУ-ГС имеет два независимых оптико-механических модуля, жестко связанных между собой: МСУ-ГС-ИК и МСУ-ГС-ВД, формирующие изображения в инфракрасной и видимой областях спектра соответственно. Тактико-технические характеристики прибора приведены в табл. 1.

В одном сеансе съемки МСУ-ГС формируется семь изображений Земли в инфракрасных диапазонах спектра с разрешением по поверхности 4 км и три в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, с разрешением 1 км (рис. 2).

Далее будут рассмотрены принцип действия МСУ-ГС № 1 и 2, а также их различия, обусловленные конструктивными доработками, направленными на повышение тактико-технических характеристик прибора.

Принцип работы МСУ-ГС № 1

Модуль МСУ-ГС-ВД, входящий в состав МСУ-ГС № 1, обеспечивает съемку в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В МСУ-ГС № 2 принцип действия модуля остался прежним. Оптическая схема, реализованная как в МСУ-ГС № 1, так и в МСУ-ГС № 2, приведена на рис. 3.

Сканирование проводится зеркалом (1), оптический поток с которого попадает в две идентичные ветви. Объективы (2) каждой из ветвей развернуты на угол $4^\circ 45'$ к оси визирования, поле зрения объективов 10° , таким образом, каждый объектив обеспечивает получение изображения половины диска Земли за сеанс съемки. Далее, отразившись от зеркал (3, 4), служащих для уменьшения общих габаритов системы, излучение попадает

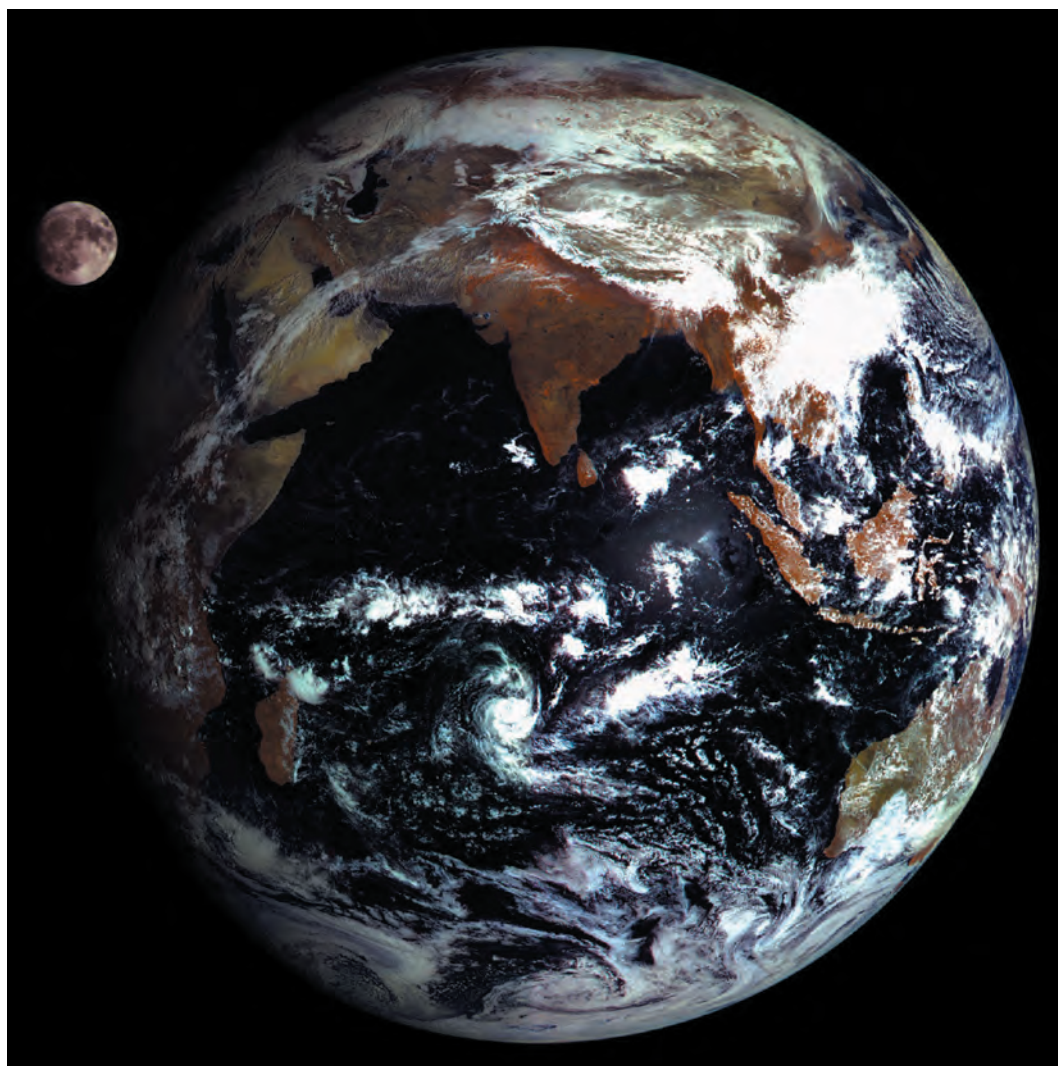


Рис. 1. Один из первых снимков, сделанных прибором МСУ-ГС № 1. Изображение синтезировано из трех спектральных каналов: 0,50–0,65 мкм, 0,65–0,80 мкм и 0,80–0,90 мкм

Таблица 1. Основные тактико-технические характеристики прибора МСУ-ГС

Модуль	№ спектрального канала	Границы спектрального диапазона, мкм	Пространственное разрешение в надири, км ²	Угловое поле зрения
МСУ-ГС-ВД	1	0,50–0,65	1 × 1	19° × 26,1°
	2	0,65–0,80		
	3	0,80–0,90		
МСУ-ГС-ИК	4	3,5–4,0	4 × 4	20° × 20°
	5	5,7–7,0		
	6	7,5–8,5		
	7	8,2–9,2		
	8	9,2–10,2		
	9	10,2–11,2		
	10	11,2–12,5		

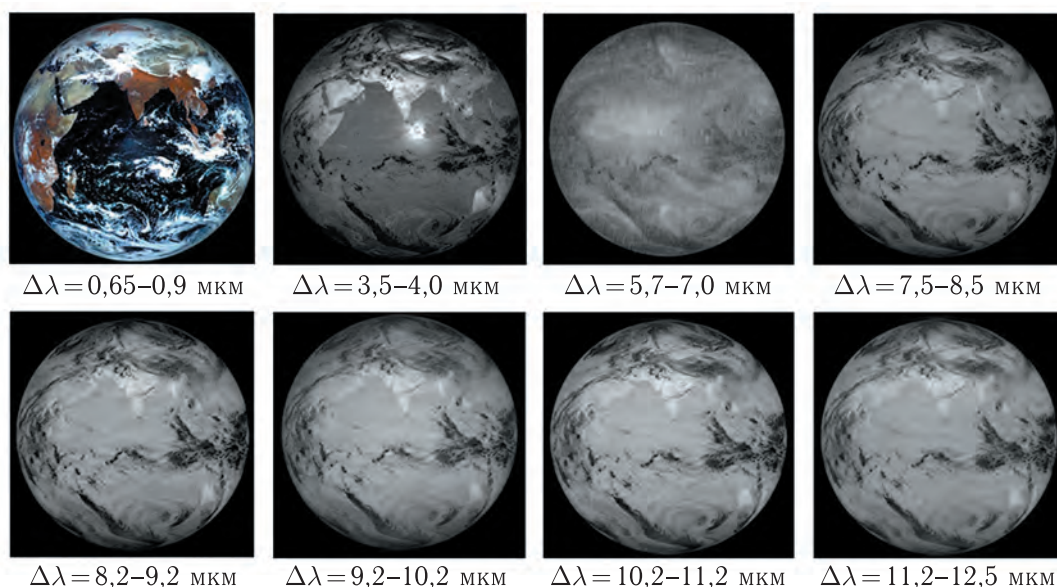


Рис. 2. Визуальное представление информации, получаемое прибором МСУ-ГС за один сеанс съемки

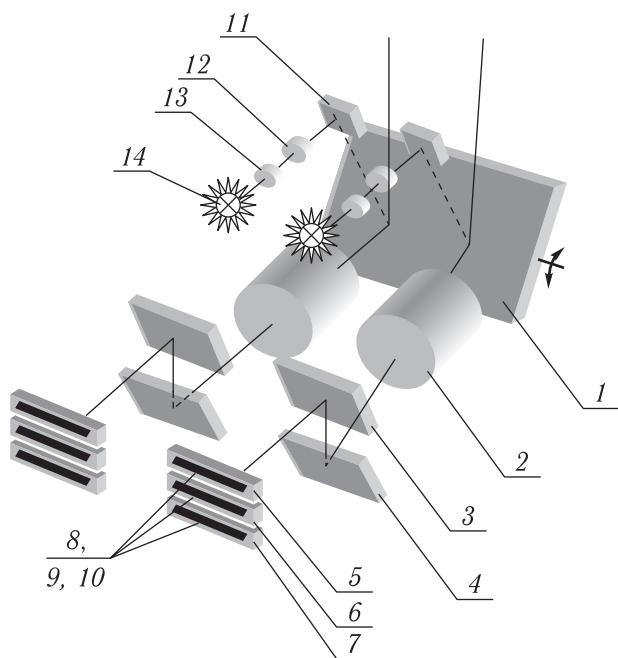


Рис. 3. Оптическая схема модуля МСУ-ГС-ВД:

1 — однокоординатное сканирующее зеркало; 2 — объектив; 3, 4 — поворотные зеркала; 5 — светофильтр, формирующий диапазон 0,50–0,65 мкм; 6 — светофильтр, формирующий диапазон 0,80–0,90 мкм; 7 — светофильтр, формирующий диапазон 0,65–0,80 мкм; 8, 9, 10 — ПЗС-линейки; 11 — поворотное зеркало; 12 — светофильтр; 13 — объектив; 14 — источник излучения

через светофильтры (5, 6, 7), формирующие требуемые спектральные диапазоны, на линейные фотоприемные устройства с зарядовой связью (ПЗС) (8, 9, 10). В каждой ветви линейки расположены в плоскости изображения и разнесены по полю зрения, чем и определяется увеличенное поле зрения системы по кадру до $26,1^\circ$.

Для повышения радиометрической точности предусмотрен режим калибровки, в процессе которого зеркало (1) разворачивается так, чтобы излучение эталонного источника, пройдя через всю оптическую систему, проецировалось на ПЗС-линейках. Для каждой ветви установлена своя система калибровки, каждая из которых содержит источник излучения (14), объектив (13), светофильтр (12) и поворотное зеркало (11). Во время режима калибровки защитные крышки прибора, установленные перед сканирующим зеркалом, закрываются.

Оптический модуль МСУ-ГС № 1, обеспечивающий съемку в инфракрасном диапазоне спектра, собран в отдельном корпусе. Его принципиальная схема приведена на рис. 4.

Получение изображения обеспечивается за счет сканирования по двум осям зеркалом (1), прецизионное движение которого обеспечивает специальный двигатель, разработанный в СКБ КП ИКИ РАН (г. Таруса), погрешность равномерности его

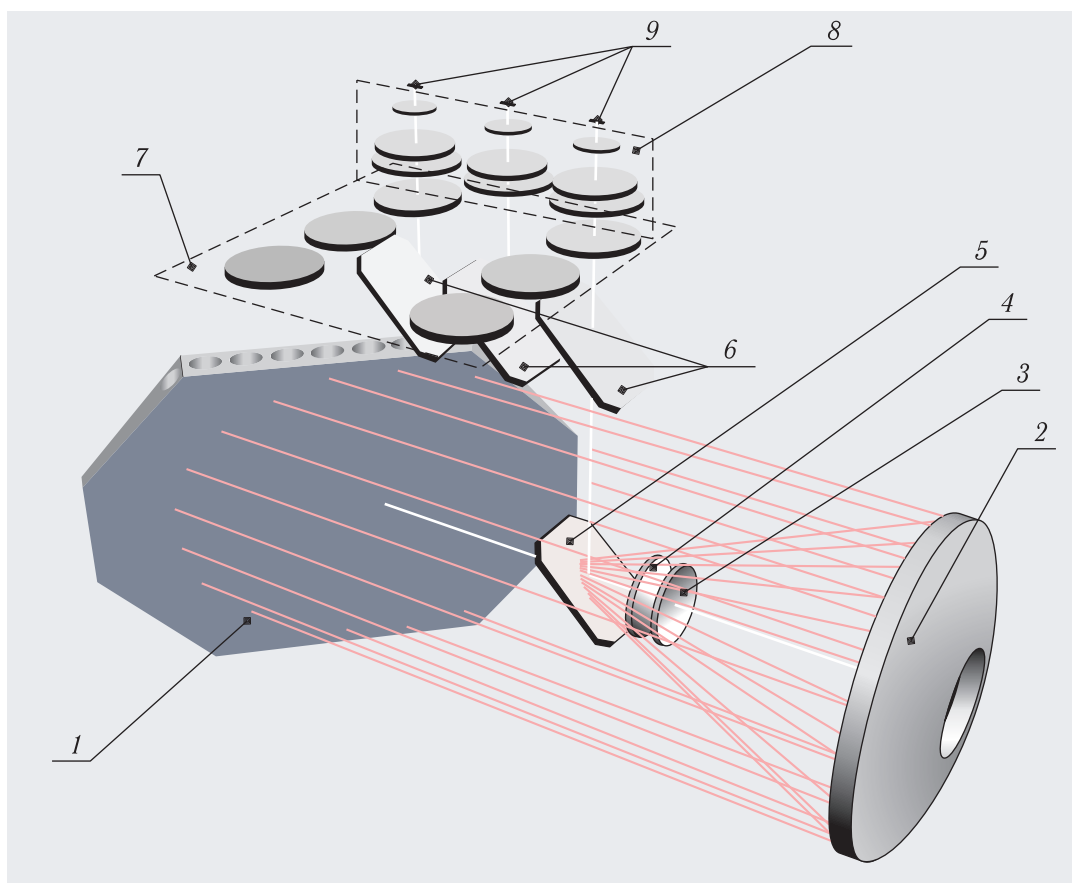


Рис. 4. Оптическая схема ИК-модуля МСУ-ГС № 1:

1 — двухкоординатное сканирующее зеркало; 2, 3, 4 — телескопическая система; 5 — поворотное зеркало; 6 — спектроделительная система; 7 — сменные светофильтры; 8 — объективы; 9 — многоэлементные приемники излучения

движения по траектории не превышает $3,5''$, точность позиционирования — $18''$. От зеркала (1) оптическое излучение попадает в телескопическую систему (2, 3, 4), выполненную по схеме Галилея, состоящую из основного сферического зеркала (2) диаметром 220 мм и двухлинзового объектива (3, 4). Далее, отразившись от поворотного зеркала (5), излучение попадает в спектроделительную систему (6). Она состоит из интерференционных фильтров и выделяет три широких спектральных диапазона. Формирование более узких спектральных диапазонов обеспечивается сменными светофильтрами (7). Затем разделенные оптические потоки фокусируются объективами (8) на многоэлементных приемниках излучения (9) (разработаны ОАО «НПО «Орион»). Рабочая температура приемников — 79 К. Для обеспечения температурного режима приемники устанавливаются

на пассивную систему радиационного охлаждения (РХ), излучающую тепло в космическое пространство (разработано АО «НИИЭМ»).

Приемники излучения изготовлены на основе тройного соединения кадмий–ртуть–теллур и имеют формат 2×96 элементов. Они ориентированы таким образом, что при одном повороте зеркала формируется скан шириной 96 строк. Полное изображение диска Земли формируется за 34 скана.

Процесс формирования изображений поясняется рис. 5 (идентичен для МСУ ГС № 1 и № 2).

Для формирования всех семи спектральных каналов проводится запись трех кадров при различных положениях светофильтров (7). Циклограмма последовательности получения информации в различных спектральных каналах представлена на рис. 6.

Внешний вид МСУ-ГС № 1, установленного на КА «Электро-Л» № 1, показан на рис. 7.

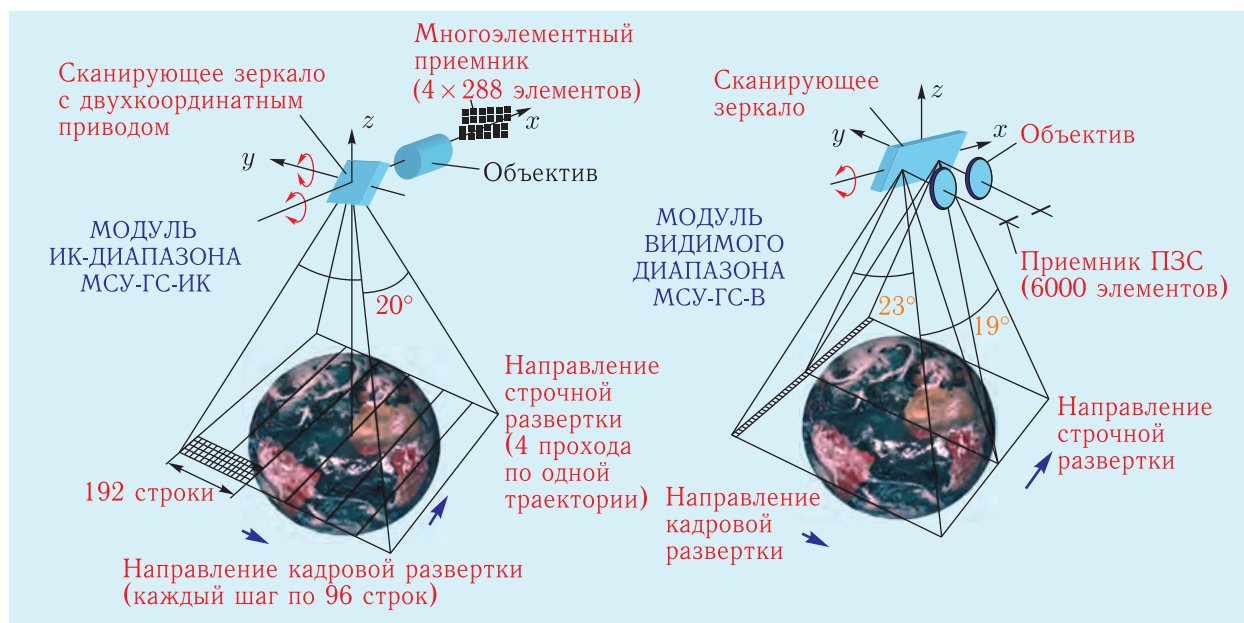


Рис. 5. Принцип построения изображения и геометрия сканирования прибора МСУ-ГС

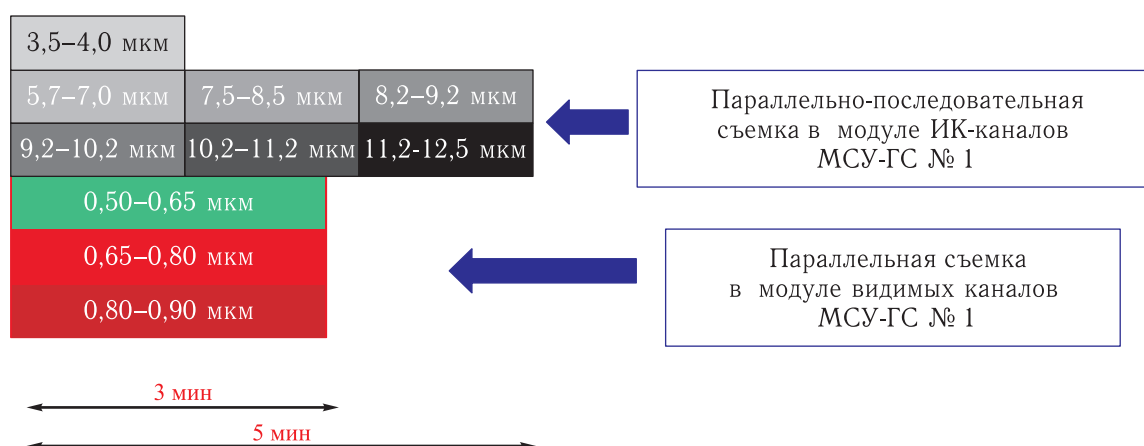


Рис. 6. Циклограмма работы прибора МСУ-ГС №1

Принцип работы модернизированного ИК-модуля МСУ-ГС № 2

По результатам летной эксплуатации к работе ИК-модуля был выдвинут ряд замечаний в части циклограммы работы и радиометрической точности получаемой информации. Для устранения этих замечаний при создании прибора МСУ-ГС №2 были выполнены доработки, обеспечивающие повышение радиометрической точности и одновремен-

ное получение изображений во всех спектральных каналах [6]: разработана новая оптическая схема с использованием асферических поверхностей, применены ИК-фотоприемники формата 288×4 с улучшенными шумовыми характеристиками и оптимизированной спектральной чувствительностью, одновременно используются 7 приемников, организован режим сканирования с гарантированным получением сигналов, не коррелированных по низкочастотным шумам.

Новая оптическая схема ИК-модуля представлена на рис. 8.

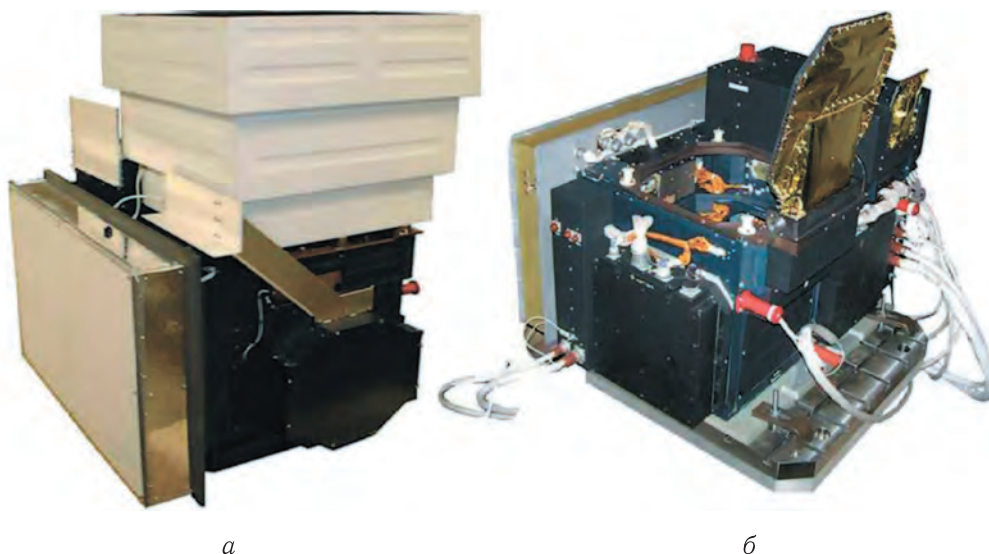


Рис. 7. Внешний вид прибора МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 1.
а — с защитным кожухом, б — без кожуха

Принцип работы системы заключается в следующем: оптическое излучение от земной поверхности направляется сканирующим зеркалом (1) в зеркальный объектив (2, 3) с диаметром главного зеркала 220 мм, затем зеркало (5) делит световой поток на две части так, что образуются две «ветви», поле зрения каждой из которых составляет половину поля зрения зеркального объектива. В результате получают две плоскости промежуточного изображения, в которых располагаются линзы коллективов (6), служащие для уменьшения диаметра оптического пучка. Два полученных потока излучения попадают в две системы спектроделения, состоящие из интерференционных фильтров (7). После спектроделительной системы объективы (9) собирают семь световых потоков на многоэлементных приемниках излучения (11). Спектр полученных потоков не во всех каналах соответствует требуемой полосе пропускания, поэтому перед некоторыми приемниками излучения установлены дополнительные светофильтры (10). Поворотные зеркала (4, 8) обеспечивают требуемое взаимное расположение многоэлементных приемников.

В отличие от первого варианта ИК-модуля, в оптической схеме отсутствуют элементы, работающие на пропускание в широкой области спектра (рис. 7, поз. 3, 4) 3,5–12,5 мкм. Благодаря этим из-

менениям увеличилась величина оптического потока, попадающего на фоточувствительные площадки приемников, и повысилась эффективность преобразования оптического сигнала в электрический (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициент пропускания оптической системы ИК-модулей

№ спектрального канала	МСУ-ГС №1	МСУ-ГС №2
4	0,51	0,49
5	0,10	0,4
6	0,22	0,42
7	0,31	0,43
8	0,42	0,45
9	0,32	0,44
10	0,26	0,39

Формирование изображений проводится с помощью сканирующего зеркала, при этом за один скан формируются 192 строки. Это объясняется тем, что в силу особенностей оптической схемы в каждой линейке фотоприемника для построения изображения используются не все 288 элементов, а только 192. На 96 элементов излучение не попадает, уровень темнового сигнала этих элементов используется для компенсации временного «ухода»

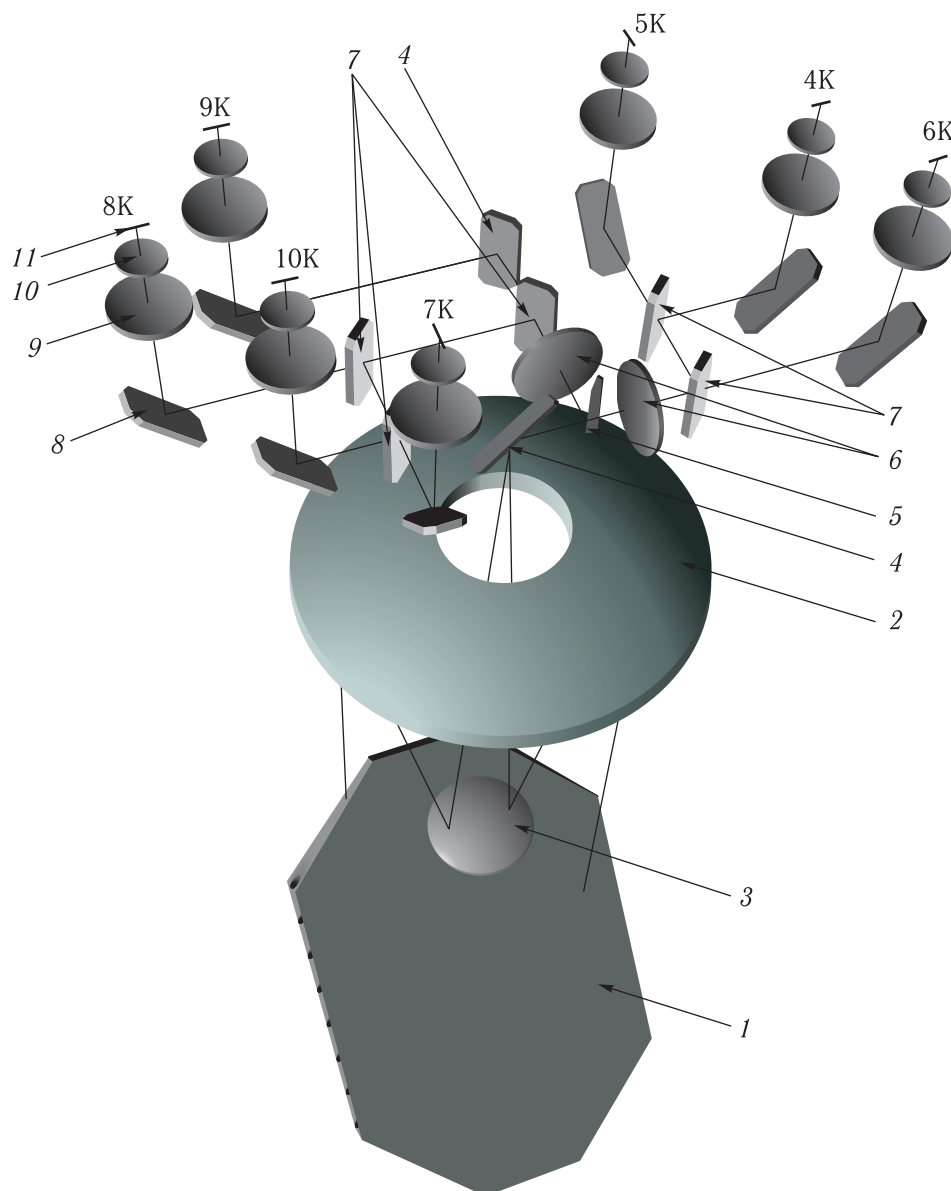


Рис. 8. Оптическая схема ИК-модуля МСУ-ГС № 2:

1 — двух координатное сканирующее зеркало; 2 — основное параболическое зеркало; 3 — вторичное зеркало; 4 — поворотное зеркало; 5 — разделительное зеркало; 6 — линзы коллективов; 7 — дихроическое зеркало; 8 — зеркало поворотное; 9 — объектив; 10 — фильтр; 11 — многоэлементные приемники излучения (4К–10К — номера соответствующих спектральных каналов)

значения выходного сигнала приемника. Приемники излучения ориентированы длинной стороной поперек направления сканирования. Полное изображение состоит из 34 сканов, при этом используется принцип временной задержки и накопления сигнала, т. е. изображение с каждой точки поверхности проецируется последовательно на 4 элемента приемника (в первом варианте МСУ-ГС-ИК — на 2 эле-

мента), значения сигналов с которых затем усредняются. Благодаря увеличенной размерности фотоприемников, при строчном сканировании реализовано 50%-е перекрытие сканов.

В целях повышения радиометрической точности измерений спектральные характеристики фотоприемников были оптимизированы под требуемые спектральные диапазоны (рис. 9).

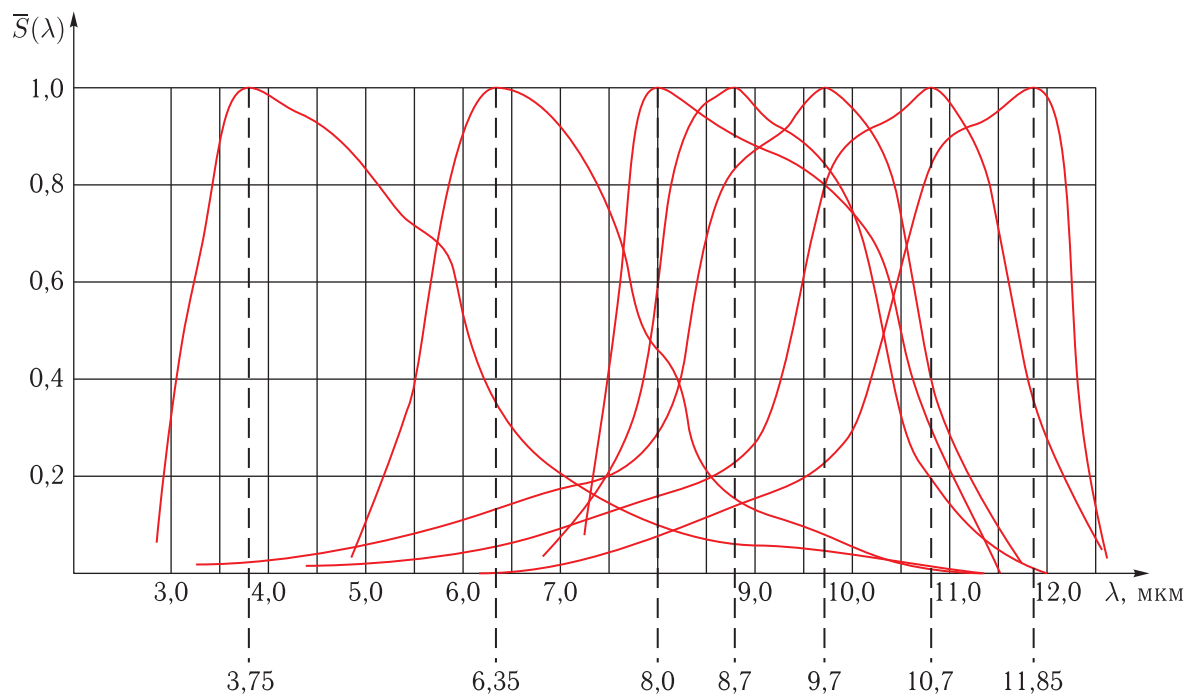


Рис. 9. Спектральные характеристики приемников излучения в каналах 4–10

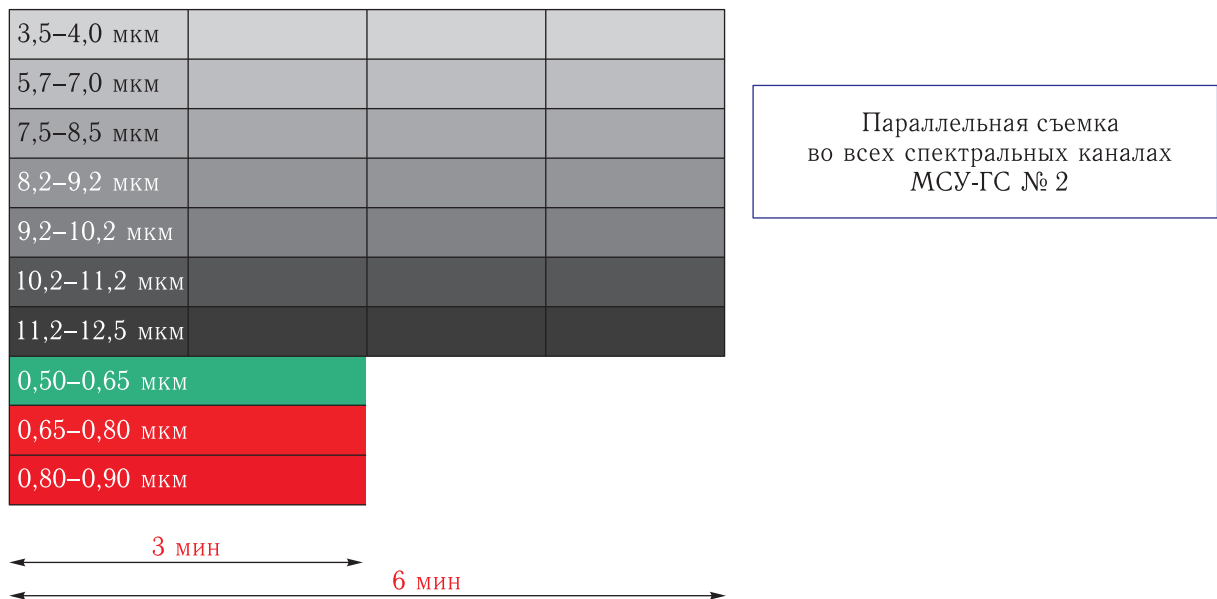


Рис. 10. Циклограмма работы прибора МСУ-ГС №2

В модернизированном модуле было значительно уменьшено время получения изображения полного диска Земли (рис. 10). Образовавшийся резерв времени используется для получения четырех кадров, совершенно не коррелированных по шумовым составляющим фотоприемников. Данные по этим кадрам усредняются при наземной обработке, что позволяет повысить радиометрическую точность получаемой информации. В случае необходимости наблюдения за особо динамичными

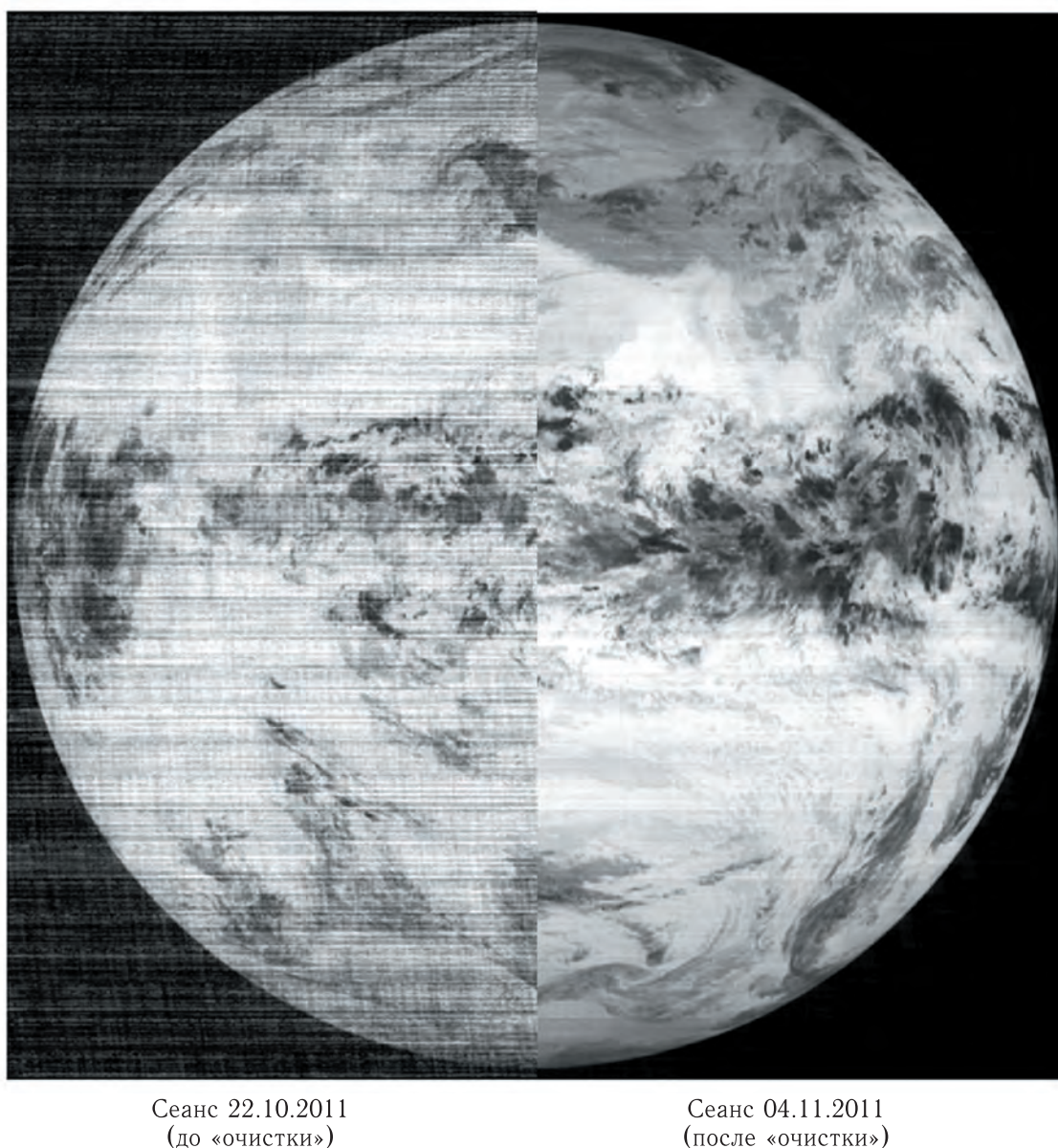


Рис. 11. Влияние криоосадков на качество изображения (на примере МСУ-ГС № 1). Слева — до, справа — после работы режима «очистки»

метеорологическими процессами сохранена возможность получения четырех независимых кадров в более короткие временные интервалы.

Все перечисленные доработки позволяют значительно повысить радиометрическую точность измерений. Сравнение достигнутого температурного разрешения МСУ-ГС № 1 и МСУ-ГС № 2 приведено в табл. 3.

Одновременное получение изображений в каналах инфракрасной области спектра позволило ре-

ализовать циклограмму работы прибора, представленную на рис. 10.

Увеличение количества приемников с 3 до 7 повлекло увеличение тепловыделения, что, в свою очередь, потребовало значительного увеличения площади системы радиационного охлаждения фотоприемников (рис. 12). Кроме того, были разработаны и внедрены в РХ (радиационный холодильник) методы борьбы с криоосадками, состоящими в основном из кристаллов льда, осаждающихся на

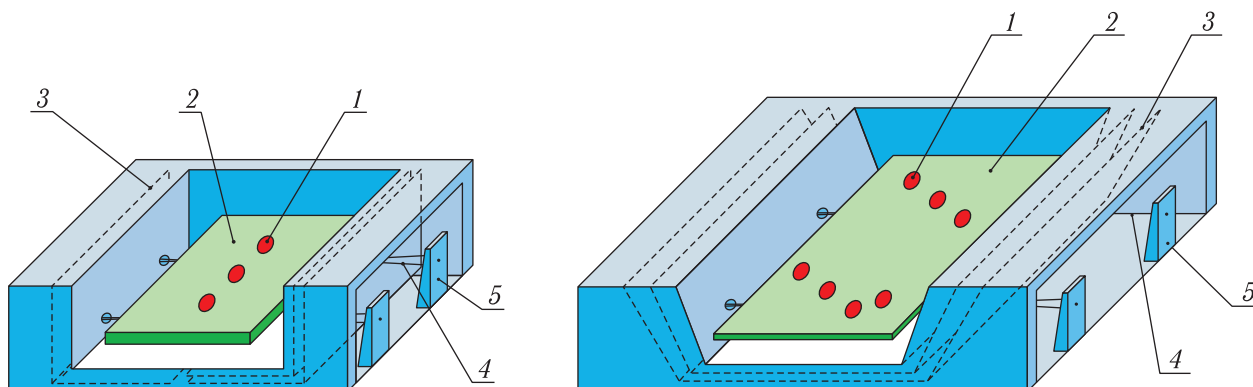


Рис. 12. Конструкция радиационного холодильника прибора МСУ ГС № 1 (слева) и МСУ ГС № 2 (справа). 1 — фотоприемники, 2 — вторая ступень радиатора (78 К), 3 — первая ступень радиатора (150 К), 4 — нити, удерживающие вторую ступень, 5 — стойки крепления нитей

Таблица 3. Радиометрическая точность ИК-модулей МСУ-ГС №1 и №2

№ спектрального канала	МСУ-ГС №1, ΔT , К	МСУ-ГС №2, ΔT , К
4	0,3	0,23
5	1,5	0,11
6	0,3	0,08
7	0,3	0,25
8	0,3	0,20
9	0,3	0,17
10	0,7	0,18

холодных входных окнах фотоприемников. Это явление значительно ухудшает качество получаемых изображений (рис. 11). Для парирования этого процесса разработан режим «очистки РХ»: производится нагрев первой и второй (поверхности с фотоприемниками) ступеней РХ, в результате чего криоосадки испаряются с входных окон приемника.

Испарившаяся вода очень медленно покидает внутренний объем РХ, поэтому через некоторое время качество изображений опять падает. В доработанном приборе конструкция РХ была изменена таким образом, чтобы боковые стенки внутренней теплоизоляции располагались под углом (расходились — рис. 12 (3)). В результате молекулы воды в режиме «очистки», испарившись с оптических поверхностей, улетают в космос после соударения со стенками значительно быстрее, чем при их параллельном расположении. Таким образом, после нескольких сеансов «очистки» большая часть

водяного пара улетает в открытый космос. Эффективность выполненной доработки подтвердилась во время эксплуатации прибора МСУ-МР в составе КА «Метеор-М» № 2, имеющего аналогичную систему охлаждения фотоприемников.

У новой системы охлаждения повышенная холодопроизводительность в результате увеличенной на 30 % площади излучающей поверхности, тем самым при тепловыделении 300 мВт обеспечивается температура приемников 78–80 К. В итоге увеличится радиометрическая точность аппаратуры за счет более низкой температуры работы приемников и меньшего количества криоосадков, влияющих на качество получаемой информации.

Внешний вид модуля приведен на рис. 13.

Заключение

Хотя при создании МСУ-ГС № 2 для КА «Электро-Л» № 2 был достигнут значительный прогресс в повышении качества получаемой информации, работы над совершенствованием приборов продолжают, так, например, для некоторых ИК-каналов есть возможность улучшить радиометрическую точность более чем на 25 % по сравнению с МСУ-ГС № 2, что будет реализовано уже в следующем приборе, изготавливаемом для КА «Электро-Л» № 3.

В ближайшие годы планируется дополнить геостационарную группировку спутников «Электро-Л» двумя высокоэллиптическими спутниками



Рис. 13. МСУ-ГС для КА «Электро-Л» № 2

«Арктика-М», что позволит на регулярной основе наблюдать полярные области, играющие важную роль в формировании погоды Северного полушария [6]. Спутники «Арктика-М» будут созданы на аппаратной основе «Электро-Л» с использованием модифицированных приборов МСУ-ГС.

Список литературы

1. Асмус В. В., Дядюченко В. Н., Загребаев В. А. и др. Развитие космического комплекса гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2012, № 1, с. 3–14.
2. Патент № 2319183 РФ. G02B 26/10. Многозональное сканирующее устройство для дистанционного получения изображения / Новиков М. В., Гектин Ю. М., Акимов Н. П., Сулиманов Н. А., Смялянский М. Б., заявлено 23.06.2006. Опубл. 10.03.2008.
3. Трифонов Ю. В. Космические аппараты дистанционного зондирования Земли. М.: ФГУП НПО ВНИИЭМ, 2008. 69 с.
4. Effects of Ice Decontamination on GOES-12 Imager Calibration // Geo science and Remote Sensing. IEEE Transactions, 2013, vol. 51, is. 3, p. 1224–1230.
5. Гектин Ю. М., Киселева Ю. А., Рублев А. Н. Интеркалибровка данных измерений в ИК-каналах сканера геостационарного метеоспутника «Электро-Л» по данным измерений ИК-зондировщика AIRS // Исследование Земли из космоса, 2015, № 5 (в печати).
6. Доклад «Результаты работы метеорологической аппаратуры МСУ-МР и МСУ-ГС и перспективы ее развития» / Акимов Н. П., Гектин Ю. М., Смялянский М. Б., Сулиманов Н. А., Фролов А. Г. / 6-я Международная научно-техническая конференция «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», Рязань, 1–3 октября 2013 г.
7. Хартов В. В., Мартынов М. Б., Бабышкин В. Е., Москатынцев И. В. и др. Новая высокоэллиптическая система гидрометеорологического обеспечения на базе геостационарных спутников серии «Электро-Л» // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина, 2012, № 1(12), с. 3–14.