Первые результаты работы и оценка качества целевой информации комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-4

И.В. Полянский, Б.С. Жуков, Т.В. Кондратьева

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: ivpolyan@cosmos.ru

В феврале 2024 г. на борту космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2-4 начаты лётные испытания многозональной аппаратуры спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2 (Комплекс многозональной спутниковой съёмки). В состав комплекса входят два многозональных съёмочных устройства (МСУ) МСУ-100ТМ, которые формируют изображение поверхности Земли в полосе более 1000 км с пространственным разрешением лучше 60 м. Аппаратура КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-4, как и на ранее введённых в эксплуатацию КА, имеет конструктивные особенности, обеспечивающие получение качественной целевой информации: в схеме съёмки используются пространственно совмещённые оптические оси спектральных каналов, линейные оптико-электронные датчики с расширенным динамическим диапазоном регистрируемой яркости и низким шумом, раздельное управление параметрами съёмки в спектральных каналах. Получаемые изображения синхронизируются с измерениями ориентации и местоположения КА для обеспечения автоматизированной географической привязки видеоданных при наземной обработке. В ходе испытаний проведена практическая оценка и получены численные значения ряда характеристик качества целевой информации: формируемая полоса захвата, пространственное разрешение, точность межканального совмещения изображений, полученных в трёх спектральных зонах, а также динамический диапазон, отношение сигнал/шум и неравномерность чувствительности. В качестве пользовательских характеристик целевых данных проведены статистические оценки точности географической привязки и радиометрического качества — погрешности определения энергетической яркости по снежным полям территории Гренландии.

Ключевые слова: КМСС-2, дистанционное зондирование Земли, гидрометеорология, многозональная съёмка, «Метеор-М»

Одобрена к печати: 04.12.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-77-93

Введение

Аппаратура комплекса многозональной спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2 разрабатывается и изготавливается в Институте космических исследований РАН (Аванесов и др., 2013; Полянский и др., 2019). КМСС-2 предназначен для проведения оптико-электронной съёмки земной и водной поверхности в трёх спектральных зонах видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов спектра электромагнитных волн и устанавливается на космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М», начиная с № 2-1.

Запуски КА «Метеор-М» с аппаратурой КМСС-2 на борту осуществляются с 2017 г. Первому из них, «Метеор-М» № 2-1, не удалось отделиться от разгонного блока «Фрегат», и позже связь с ним была потеряна. КА «Метеор-М» № 2-2 успешно запущен 5 июля 2019 г. и, несмотря на столкновение с микрометеоритом, полностью отработал свой ресурс на орбите (Жуков и др., 2019, 2021; Полянский и др., 2019).

В июне 2023 г. был запущен КА «Метеор-М» № 2-3 (Жуков и др., 2024; Кондратьева и др., 2024), а 29 февраля 2024 г. — «Метеор-М» № 2-4. Начиная с марта 2024 г. в объёме лётных испытаний КА проверялась и аппаратура КМСС-2.

В ходе испытаний КМСС-2 проведена практическая оценка и получены численные значения ряда характеристик качества целевой информации: формируемая полоса захвата, пространственное разрешение, точность межканального совмещения изображений, полученных в трёх спектральных зонах, а также динамический диапазон, отношение сигнал/шум и неравномерность чувствительности. В качестве пользовательских характеристик целевых данных проведены статистические оценки точности географической привязки и радиометрического качества — погрешности определения энергетической яркости по снежным полям территории Гренландии.

Целевая информация, получаемая на основе данных КМСС-2, предназначена для решения большого числа научных, природоохранных и хозяйственных задач в интересах, в первую очередь, Российской федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также многих ведомств и научных организаций.

Наземный сегмент приёма и обработки данных включает три региональных центра Росгидромета — Европейский, Сибирский и Дальневосточный, зоны видимости которых обеспечивают полное покрытие территории России, а также и 68 территориальных центров. Ведущими организациями, которые осуществляют оперативное управление, планирование космической съёмки, приём, обработку, каталогизацию и распространение космической информации, являются Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ) АО «Российские космические системы» и Научно-исследовательский центр «Планета» Росгидромета.

Дизайн и основные характеристики КМСС-2

В своей конструкции приборы комплекса КМСС-2 имеют ряд особенностей, обеспечивающих получение качественной целевой информации, а именно:

- оптическую систему, осуществляющую пространственное совмещение изображений трёх спектральных каналов;
- оптико-электронные преобразователи на приборах с зарядовой связью, предоставляющие расширенный динамический диапазон регистрируемой яркости и отношение сигнал/шум;
- раздельное управление параметрами регистрации изображений в спектральных каналах.

На *рис. 1* представлен внешний вид аппаратуры, смонтированной на установочный кронштейн; основные характеристики КМСС-2 и приборов МСУ-100ТМ приведены в *табл. 1, 2*.



Рис. 1. Внешний вид КМСС-2 в составе двух приборов МСУ-100ТМ

Таблица 1. Основные характеристики КМСС-2

Орбита КА	Солнечно-синхронная
Высота орбиты КА	820,7 км
Наклонение	98,586°
Эксцентриситет	0,00124
Число витков в сутках	14-15
Количество приборов МСУ-100ТМ	2 км
Формируемая полоса обзора	не менее 1000
Угол установки приборов МСУ-100ТМ относительно местной вертикали	±15,2°
Пространственное разрешение в надире	не хуже 60 м
Радиометрическое разрешение (разрядность АЦП)	10 бит
Точность совмещения изображений спектральных каналов, элемент разрешения	не более 0,5

Примечание: АЦП — амплитудно-цифровой преобразователь.

Фокусное расстояние объектива	125 мм		
Относительное отверстие объектива	1:4,3		
Угловое поле зрения	32°		
Размер элемента ПЗС	9×9 мкм		
Число спектральных каналов	3		
Границы спектральных зон чувствительности (на уровне 0,5)	(0,520-0,590)±0,005 мкм (0,640-0,690)±0,005 мкм (0,785-0,900)±0,005 мкм		
Длина строки изображения, число элементов	7984		
Число разрядов квантования	10		
Динамический диапазон регистрируемой яркости	72 дБ		
Отношение сигнал/шум (для объектов с яркостью 200 Вт·ср ⁻¹ ·м ⁻²)	более 200		
Частота строк	125 Ги		

Таблица 2. Технические характеристики прибора МСУ-100ТМ

Примечание: ПЗС — прибор с зарядовой связью.

Спектральные зоны чувствительности приборов МСУ-100ТМ (0,520–0,590, 0,640–0,690 и 0,785–0,900 мкм), представленные на *рис. 2* (см. с. 80), выбраны исходя из целевой задачи исследования суши и достаточно хорошо коррелируют с соответствующими каналами радиометров ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) (Landsat-7), OLI (*англ.* Operational Land Imager) (Landsat-8), MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectrometer) (Terra, Aqua), MSI (*англ.* MultiSpectral Imager) (Sentinel-2), что позволяет проводить полётные кросскалибровки и контролировать радиометрические свойства целевых данных.

Геометрия съёмки

Принцип действия приборов MCУ-100TM основан на одновременной построчной регистрации оптического изображения подстилающей поверхности, которое линейно перемещается в фокальной плоскости объектива при движении КА по орбите. Регистрация осуществляется с помощью трёх линейных датчиков ПЗС, установленных перпендикулярно вектору линейной скорости движения изображения. Каждый чувствительный элемент закрыт узкополосным интерференционным фильтром, пропускающим отражённое оптическое излучение только в заданной полосе длин волн. На *рис. 3* приведён пример изображения полосы захвата КМСС-2, формируемой аппаратурой, установленной на КА «Метеор-М» № 2-4.



Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность каналов приборов МСУ-100ТМ (цифры у кривых обозначают номера спектральных каналов)



Рис. 3. Пример изображения полосы захвата КМСС-2 (стрелкой показано направление полета КА)

В состав КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-4 входят два многозональных сканирующих устройства МСУ-100ТМ, для которых приняты следующие краткие обозначения: КАМ-241 и КАМ-242. Эти приборы устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси КА на угол ±15,2° в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты (*puc. 4*, см. с. 81). В результате при заданной высоте орбиты 820,7 км расчётные значения без учёта крена, рыскания и тангажа КА при проектировании на земной эллипсоид для суммарной полосы обзора МСУ-100ТМ составят порядка 1020 км с перекрытием полос обзора двух приборов около 24 км. Размеры проекции чувствительного элемента на земную поверхность для направления в надир составят около 60 м, вдоль проекции линейного прибора с зарядовой связью (ЛПЗС) размер пикселя меняется от 55 до 80 м.



Рис. 4. Расчётная геометрическая схема съёмки КМСС-2 двумя приборами МСУ-100ТМ

Реальные значения базовых геометрических характеристик комплекса естественно отличаются от расчётных, поскольку фотограмметрические параметры оптических систем и установочные углы находятся в пределах конструкторских допусков. Измерения, проведённые в ходе лётных испытаний аппаратуры, подтвердили соответствие полученных значений базовых геометрических характеристик комплекса заданным требованиям.

Особенности конструкции приборов КМСС-2/МСУ-100ТМ

Изображения наблюдаемых объектов в трёх спектральных каналах в приборах МСУ-100ТМ формируются оптической системой ОС-125Т, состоящей из специализированного объектива и призменного спектроделителя (Завгородний и др., 2015). На *рис. 5* представлен разрез конструкции оптической системы.



Рис. 5. Конструкция ОС-125Т



Рис. 6. Ход лучей в оптической системе прибора МСУ-100ТМ

Световой поток от бесконечно удалённого объекта попадает на входную апертуру объектива, фокусируется в световой пучок и разделяется на три составляющие по спектральному признаку на дихроических зеркалах. Точное формирование зон пропускания и подавления обеспечивается полосовыми интерференционными фильтрами, установленными на выходных окнах спектроделителя (*puc. 6*).

Особенностью объектива является оптическая схема с телецентрическим ходом лучей в заднем отрезке, т.е. при входном угловом поле зрения $\pm 16^{\circ}$ выходные пучки падают на фокальную плоскость под постоянным углом 90°. Благодаря тому, что угол падения пучков света постоянен по всей фокальной плоскости, интерференционные покрытия работают одинаково для всего углового поля зрения объектива.

В качестве преобразователей оптического сигнала в электрический в приборах MCУ-100TM используются ЛПЗС типа KLI-8023, разработанные компанией Kodak (США) и установленные на выходных окнах спектроделителя оптической системы. Уникальной особенностью данных сенсоров является большая потенциальная яма, позволяющая обеспечить динамический диапазон регистрируемой яркости до 82 дБ.

В каждом из корпусов ЛПЗС спектральных каналов установлены три идентичных монохромных линейки фотодиодов, которые используются для обеспечения резервирования. Переключение линеек, их управление и настройка обеспечиваются независимо.

Характеристики ЛПЗС КLI-8023 приведены в табл. 3.

Общее число элементов	8000
Используемое число элементов в строке изображения	7984
Размер элемента	9×9 _{МКМ}
Потенциальная яма	180 000 ē
Чувствительность (450/550/650/830 нм)	15/20/22/15 В·мкДж ⁻¹ ·см ⁻²
Напряжение насыщения	2,5 B
Динамический диапазон	до 82 дБ
Тип корпуса	Керамический

Таблица 3. Основные технические характеристики ЛПЗС KLI-8023

Электрический сигнал активной линейки ПЗС усиливается и преобразуется цифровой платой видеотракта. Плата процессора осуществляет управление работой всего прибора и коммутацию цифровых потоков, а модуль интерфейсов — формирование передаваемых сигналов, а также приём команд и управляющих последовательностей от внешних систем КА. Модуль вторичного источника питания обеспечивает электропитанием все узлы прибора.

Работа КМСС-2 в составе комплекса бортовой аппаратуры КА «Метеор-М» № 2-4

Два многозональных съёмочных устройства MCУ-100TM, входящие в состав KMCC-2, являются автономными и независимыми приборами с точки зрения коммутации питания, управления, телеметрирования и получения целевой информации. При установке KMCC-2 на борт KA, приборы подключаются к бортовой аппаратуре в соответствии со схемой, приведённой на *puc.* 7.



Рис. 7. Схема подключения КМСС-2 к аппаратуре КА

На схеме обозначены:

- БКА КА бортовой коммутационный автомат КА, от которого поступает коммутируемое первичное питание +27 В;
- БАТИ КА бортовая аппаратура телеметрических измерений, на которую передаются данные температурных датчиков;
- КСО КА (КШ) компьютер системы ориентации, выполняющий функции контроллера шины (КШ) магистрального последовательного интерфейса и осуществляющий командный информационный обмен с приборами;
- ФЦП-СМ формирователь цифрового потока сантиметровой радиолинии из состава бортовой информационной системы (БИС-М), осуществляющий приём цифрового потока видеоданных и формирование задающих тактовой и строчной частот;
- БСКВУ-М бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство, формирующее опорную секундную метку для привязки измерений, код бортового времени, а также данные об ориентации и местоположении КА.
- ТМИ телеметрическая информация;
- МКО-3 мультиплексный канал обмена системы ориентации.

Поскольку принцип формирования изображения в аппаратуре КМСС-2 основан на последовательной регистрации строк полосы изображения, для восстановления связанной геометрии и географической привязки выходного изображения при наземной обработке необходимо знать следующие параметры:

- время момента регистрации строки;
- географические координаты центра масс КА в момент регистрации строки;
- ориентацию строительных осей КА в момент регистрации строки;
- ориентацию приборной системы координат МСУ-100ТМ в собственной системе координат КА.

Формирование вышеприведённой информации на борту КА проводится в БСКВУ-М, в состав которого входит:

- аппаратура формирования бортового времени и опорной сетки синхрочастот;
- аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС (Глобальная навигационная система)/ GPS (*англ*. Global Positioning System);
- три блока определения координат звёзд БОКЗ-2М.

Время регистрации каждой строки определяется двумя составляющими — ежесекундным цифровым кодом мирового времени, передаваемым от БСКВУ-М, и цифровым кодом дробной части, формируемой встроенным цифровым таймером, с ценой единицы младшего разряда 25 мкс. Оба кода записываются в служебной части каждой строки и используются для синхронизации с данными определений местоположения и ориентации КА, которые совместно с известными параметрами внутреннего и внешнего ориентирования позволяют рассчитать координаты направляющих векторов для привязки целевой информации к географической системе координат.



Результаты, полученные в ходе проведения лётных испытаний

Рис. 8. Определение полосы обзора и зоны перекрытия для приборов МСУ-100ТМ. Эпизод от 28.04.2024 г. 15:59:45,017. Изображение 241_000865_1_0, прибор КАМ-241 (*слева*). Изображение 242_000865_1_0, прибор КАМ-242 (*справа*)

В настоящей статье представлены результаты, полученные в ходе проведения лётных испытаний КА «Метеор-М» № 2-4 (в период с 05.03.2024 по 05.08.2024) с целью подтверждения работоспособности КМСС-2 и его характеристик после вывода КА на орбиту, а также оценки качества и анализа возможности использования данных КМСС-2 по целевому назначению.

Камеры МСУ-100ТМ осуществляют съёмку земной поверхности в трёх спектральных каналах для двух наборов из трёх ПЗС-линеек. Для приборов КАМ-241 и КАМ-242 были проведены съёмки для следующих конфигураций ПЗС-линеек:

- (1-1-1) канал 1, линейка 1; канал 2, линейка 1; канал 3, линейка 1;
- (2-2-2) канал 1, линейка 2; канал 2, линейка 2; канал 3, линейка 2;
- (3-3-3) канал 1, линейка 3; канал 2, линейка 3; канал 3, линейка 3.

Проверка характеристик аппаратуры КМСС-2 проводилась анализом полученных КМСС-2 изображений участков земной поверхности.

На *рис. 8* (см. с. 84) представлен снимок земной поверхности, полученный одновременно с двух камер MCУ-100TM. На совмещённом изображении иллюстрируются формируемая суммарная полоса обзора KMCC-2, полоса обзора для каждого из приборов MCУ-100TM и перекрытие полос обзора этих приборов.

Фактические значения полосы обзора зависят от ориентации КА в момент съёмки — чем больше угол между осью *OX* КА и плоскостью орбиты (угол рыскания), тем меньше полоса захвата КМСС-2. Измеренное значение суммарной полосы обзора для двух приборов МСУ-100TM в конфигурации ЛПЗС (1-1-1) оказалось равно 1014 км, полоса обзора для каждого МСУ-100TM составила 520 км (КАМ-241) и 523 км (КАМ-242), полоса перекрытия изображений — 29 км, что достаточно для гарантированного совмещения полос изображений без пропусков на поверхности.

Одной из значимых характеристик съёмочной аппаратуры служит размер элемента разрешения, который определяется как линейный размер проекции пикселя центральной ПЗСлинейки прибора MCУ-100TM на земную поверхность в надире следующими выражениями:

• поперёк трассы полёта:

$$A_x = a_{pix} \frac{H_0}{f_0} \cos^2(\alpha_0),$$

где a_{pix} — физический размер пикселя ПЗС-линейки, равный 9 мкм; f_0 — фокусное расстояние объектива для центральной ПЗС-линейки — 125 мм; H_0 — расчётная высота съёмки — 820 км; α_0 — установочный угол прибора МСУ-100ТМ — 15,2°;

• вдоль трассы полёта:

$$\Delta_Y = \frac{V'_{\rm KA}}{f_T},$$

где $V'_{\rm KA}$ — скорость подспутниковой точки, равная 7,5 км/с; f_T — частота строк — 125 Гц.

Измеренные значения поперечного размера пикселя ρ пересчитывались в значения поперечного размера пикселя в надире ρ_H с помощью выражения:

$$\rho_H = \rho \frac{\cos(\alpha_0) \cdot \cos^2(\alpha_0 + \beta)}{\cos(\beta)},$$

где β — угловое отклонение центра рассматриваемого объекта от оптической оси прибора.

Определение проекции пикселя проводилось сравнением расстояния между опознаваемыми ориентирами искусственного происхождения в пикселях на нетрансформированных изображениях с расстояниями в метрах на геопривязанных изображениях Google Планета Земля (*англ*. Google Earth).

Для камер MCУ-100TM расчётный размер проекции пикселя в надире поперёк трассы полёта КА составил 55,4 м, вдоль трассы — 52,6 м. На *рис. 9* (см. с. 86) представлена иллюстрация к процедуре определения размера проекции пикселя. Пространственное разрешение целевой информации аппаратуры КМСС-2 оценивалось по профилям яркости полученных изображений на границе вода – суша, которые характеризуются резкими границами. Для обработки были использованы фрагменты изображений Гренландии с резкими тенями (*puc. 10*).



Рис. 9. Процедура определения размера проекции пикселя. Изображение Google Earth (*слева*), фрагмент изображения 242_001064_2_0_02 (*справа*). В качестве опорного объекта использованы искусственные поля орошения, размер которых определён диаметром системы полива



Рис. 10. Фрагменты кадра 242_000580_2_0_02, прибор КАМ-242; срезы, по которым оценивалось пространственное разрешение камеры вдоль направления строк и столбцов, показаны жёлтыми отрезками

Анализировалось распределение сигналов изображения, ориентированных примерно параллельно направлению строк (ось X) (поперёк трассы полёта KA) и столбцов (ось Y) (вдоль трассы полёта KA). Для этого указанное распределение дифференцировалось и функция рассеяния точки (ФРТ) камер аппроксимировалась гауссовой функцией со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ (*рис. 11*). Методом наименьших квадратов подбиралось значение σ , при котором наилучшим образом аппроксимировался реальный профиль яркости при условии, что вне переходной зоны яркость аппроксимированного профиля равнялась средней яркости соответственно воды и суши. Ширину гауссовой функции можно характеризовать как 2 σ , т.е. как уровень, на котором ФРТ уменьшается от 1 до 0,61. Две гауссовых функции визуально разделяются, если расстояние между их центрами превышает 2 σ . За пространственное разрешение камер принималась 2 σ -ширина гауссовой функции. При пересчёте разрешения вдоль оси X на местность принималось разрешение камер в надире (55 м).



Рис. 11. Распределение сигнала изображения при переходе через границу (прибор КАМ-242) вдоль строк изображения (ось *X*) и вдоль столбцов изображения (ось *Y*) (ЕМР — единицы младшего разряда)

Таблица 4. Пространственное разрешение	(2о) целевой	информации	КМСС-2 в надире
--	--------------	------------	-----------------

Параметр	Кан	Канал 1 Канал 2		Канал 3			
	X	Y	X	Y	X	Y	
	KAM-241						
2σ, пиксель	1,21	1,19	1,24	1,25	1,15	1,25	
2σ, м	67	63	68	66	63	66	
KAM-242							
2σ, пиксель	1,19	1,19	1,31	1,19	1,15	1,16	
2σ, м	65	63	72	63	63	62	

Примечание: Размер проекции пикселя по *X* в надире — 57 м, по *Y* — 56 м.

Полученные результаты определения пространственного разрешения целевой информации КМСС-2 представлены в *табл. 4*.

Оценка точности географической привязки целевой информации проводилась по изображениям, привязанным к географической сетке координат, полученным после штатной обработки данных КМСС-2 с учётом данных БСКВУ-М (Жуков и др., 2021, 2024). Поскольку рассчитанные среднеквадратические ошибки превышали значение 100 м, была проведена дополнительная полётная геометрическая калибровка камер КАМ-241 и КАМ-242 с использованием банка контрольных точек (КТ), созданного на основе изображений Sentinel. Выбранные контрольные точки располагались по береговым линиям бассейнов Средиземного и Чёрного моря. Для калибровки использовались изображения с надёжной навигационной информацией, полученные в марте – июле 2024 г. на маршрутах, проходящих над Эгейским и Чёрным морем. Общее число распознанных КТ на гранулах маршрутов составляло 16–438, в зависимости от камеры и спектрального канала.

В результате проведённой калибровки были определены основные параметры проекционной функции фотоприёмных линеек спектральных каналов камер: фокусное расстояние, нормаль к плоскости наблюдения и коэффициенты дисторсии в направлении, перпендикулярном плоскости наблюдения, и в плоскости наблюдения, и по ним рассчитана проекционная функция, определяющая единичные векторы наблюдения для каждого пикселя в приборной системе координат, сохранённые в файлах геометрической калибровки для камер КАМ-241 и КАМ-242.

На *рис. 12* приведён фрагмент кадра камеры КМСС-2 с контрольными точками (Эгейское море, береговые линии), сформированный на основе изображения Sentinel, по которому проводилась проверка точности географической привязки и межканального совмещения снимка камеры КАМ-241.



Рис. 12. Фрагмент кадра 241_000858_0_0_02 (прибор КАМ-241) с контрольными точками

В качестве критерия точности геопривязки каналов было выбрано среднее смещение КТ в кадре. При достаточно большом количестве КТ оно мало чувствительно к ошибкам установления корреляции, а также к точности привязки самих КТ (в отличие, например, от СКО КТ). Максимальное смещение КТ на кадрах по оси X (поперёк направления полёта) оказалось равно 67 м, а вдоль оси Y (в направлении полёта) — 65 м, СКО составило не более 54 м.

При оценке точности совмещения изображений спектральных каналов (межканального геометрического совмещения) на изображениях выбирались контрольные точки и в каждом

канале определялись их геодезические координаты (широта, долгота) на карте и на снимке, а также соответствующие им значения пикселей по осям *X* и *Y* (вдоль строк и столбцов изображения). Координаты, полученные для второго канала прибора, условно принимались за начало отсчёта, относительно которого рассчитывается разность координат для объекта в первом и в третьем спектральных каналах. По вычисленным значениям в пикселях определялось среднее значение ошибки в каждом спектральном канале (первом и третьем) в метрах с учётом размера проекции пикселя на земную поверхность.

Межканальное смещение, определяемое как разность среднего смещения КТ между каналами, во всех случаях не превышало 25 м (т.е. не превышало 0,5 размера элемента), СКО составляло не более 16 м.

В ходе наземной отработки приборы МСУ-100ТМ из состава КМСС-2 — КАМ-241 и КАМ-242 — были радиометрически откалиброваны с помощью эталонных источников излучения и получили сертификаты калибровки, выданные Всероссийским научно-исследовательским институтом оптико-физических измерений.

Радиометрическая калибровка и оценка радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2 в ходе лётных испытаний проводилась сравнением яркостных характеристик естественных природных объектов, регистрируемых аппаратурой КМСС-2, с данными MODIS/ Aqua, имеющими близкие спектральные каналы (Кондратьева и др., 2018, 2020). В качестве полигона был выбран однородный снежный покров о. Гренландия (Кондратьева и др., 2024). Для обработки отобраны безоблачные изображения камер КМСС-2, и по результатам наземной калибровки проведены их радиометрическая и геометрическая коррекция и географическая привязка.

Для пересчёта коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), регистрируемых в спектральных каналах MODIS/Aqua (mod_1, mod_2, mod_4, mod_17), в КСЯ для спектральных каналов КМСС-2 были использованы регрессионные соотношения для данных камер (*табл. 5*). Значения КСЯ, измеренные в спектральных зонах КМСС-2 и пересчитанные по данным MODIS, хорошо согласуются в красном и зелёном каналах для камеры КАМ-241 и составляют 1-2%, для КАМ-242 — 4-7%. В ИК-каналах камер расхождения КСЯ достигают 11-13%. Для устранения полученных расхождений была проведена коррекция абсолютной чувствительности камер КМСС-2 по отношению к полученной при наземной калибровке с коэффициентами коррекции, представленными в *табл. 5*.

Камера, спектральный канал	Регрессионные соотношения	Коэффициент коррекции
KAM-241		
1	1,023×mod_1	1,02
2	0,676×mod_2+0,333×mod_17	0,89
3	0,981×mod_4	1,01
KAM-242		
1	1,021×mod_1	1,04
2	0,711×mod_2+0,297×mod_17	0,87
3	0,978×mod_4	1,07

Таблица 5. Регрессионные соотношения для пересчёта значений КСЯ между спектральными каналами камер КМСС-2 и MODIS/Aqua и коэффициенты коррекции чувствительности камер КМСС-2

Примечание: спектральные каналы MODIS: № 1 (620–670 нм), № 2 (841–876 нм), № 4 (545–565 нм), № 17 (890–920 нм).

На *рис. 13, 14* (см. с. 90) представлены результаты сопоставления КСЯ на верхней границе атмосферы, регистрируемого в спектральных каналах КМСС-2 и в соответствующих спектральных каналах MODIS/Aqua, после проведения коррекции чувствительности камер.



Рис. 13. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям прибора КАМ-241 (конфигурация линеек (1-1-1)) и MODIS/Aqua



Рис. 14. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям прибора КАМ-242 (конфигурация линеек (1-1-1)) и MODIS/Aqua

Точность радиометрической калибровки приборов КМСС-2 относительно MODIS/Aqua не превышает 1 %, СКО КСЯ не более 0,015.

Данные результаты являются предварительными. Основные работы по радиометрической калибровке аппаратуры КМСС-2 запланированы на начало 2025 г. и должны проводиться по хорошо зарекомендовавшей себя методике, применённой на КМСС КА «Метеор-М» № 1, КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 (Кондратьева и др., 2018) и КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 (Кондратьева и др., 2020), по однородным снежным полям Антарктиды в сезон январь – март.

В сводной *табл. 6* приведены результаты измеренных и оценённых параметров целевых характеристик аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-4, полученных в результате проведения лётных испытаний.

Параметр	Требования ТЗ	Измеренные значения					
		Канал 1	Канал 2	Канал 3			
	Полоса обзора, км						
KAM-241	Не предъявляется	520	520	520			
KAM-242		523	523	523			
KMCC-2	≥1000	1014	1014	1014			
Проекции элемента разрешения в надире (поперёк трассы/вдоль трассы), м							
KAM-241	≪60	55,9/52,9	56,7/53,2	55,4/52,6			
KAM-242		56,2/53,9	57,2/54,3	56,1/53,6			

Таблица 6. Сводная таблица целевых характеристик КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-4

Окончание табл. б

Параметр	Требования ТЗ	Измеренные значения				
		Канал 1	Канал 2	Канал 3		
	Пространственное разрешение в надире (поперёк трассы/вдоль трассы), м					
KAM-241	Не предъявляется	67/63	68/66	63/66		
KAM-242		65/63	72/63	63/62		
	Точно	сть географической пр	ивязки, м			
KAM-241	Не предъявляется	≤100				
KAM-242			≤100			
	Точность совмещения	изображений спектра.	льных каналов, элемен	тов		
KAM-241	≤0,5	≼0,5				
KAM-242		≪0,5				
		Отношение сигнал/ш	ум			
KAM-241	≥200	291	316	324		
KAM-242		287	320	283		
Радиометрическая калибровка						
KAM-241	Не предъявляется	-0,384 %, CKO = 0,012	-0,319 %, CKO = 0,006	0,465 %, CKO = 0,015		
KAM-242		-0,509 %, CKO = 0,013	-0,795 %, CKO = 0,013	-0,566 %, CKO = 0,010		

Выводы

Лётные испытания аппаратуры КМСС-2 (приборов КАМ-241 и КАМ-242) в составе КА «Метеор-М» № 2-4 проведены успешно и позволили подтвердить заданные технические характеристики. Функционирование аппаратуры и характеристики качества целевой информации, полученные в реальных условиях космического полёта, соответствуют требованиям заказчика.

Полученные оценки качества информации КМСС-2 позволяют рекомендовать её использование по целевому назначению в составе КА «Метеор-М» № 2-4.

Планируется ежегодно проводить работы по контролю геометрических свойств приборов КАМ-241 и КАМ-242, оценке точности совмещения, привязки и корректировке файлов геометрической коррекции, чтобы обеспечить требуемую географическую привязку целевых данных. С целью контроля радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2 предполагается осуществлять кросс-калибровку и уточнение коэффициентов радиометрической коррекции в период январь—март по изображениям протяжённых полигонных участков с известной яркостью в Антарктиде.

Литература

- 1. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б. С. и др.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83. DOI: 10.7868/S0205961413020012.
- 2. Жуков Б. С., Гришанцева Л.А., Кондратьева Т.В. и др. Полётная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
- 3. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В. Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М»

№ 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 75–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.

- 4. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Полянский И.В. Полётная геометрическая калибровка комплекса аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 185–193. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.
- 5. Завгородний Д. С., Сокольский М. Н., Трегуб В. П., Полянский И. В. Оптические системы малогабаритных сканеров дистанционного зондирования Земли для космических аппаратов «Метеор-М» // 4-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. 2015. С. 269–275.
- 6. Кондратьева Т. В., Жуков Б. С., Пермитина Л. И., Полянский И. В. Сопоставление радиометрических данных КМСС-М КА «Метеор-М» № 2 с данными MODIS КА Тегга и OLI Landsat-8 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 2. С. 19–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.
- 7. Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Полянский И.В. Радиометрические характеристики комплексов многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 67–76. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76.
- 8. Кондратьева Т. В., Жуков Б. С., Полянский И. В. Результаты оценки радиометрических характеристик Комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 путём сопоставления с данными спектрорадиометра MODIS/Aqua на этапе лётных испытаний // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 61–70. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-61-70.
- 9. Полянский И.В., Жуков Б.С., Кондратьева Т.В. и др. Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.

First results of work and target information quality estimation of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-4 satellite

I. V. Polyanskiy, B. S. Zhukov, T. V. Kondratieva

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: ivpolyan@cosmos.ru

In February 2024, flight tests of the KMSS-2 multispectral satellite imaging system of medium spatial resolution were started on board the Meteor-M No. 2-4 satellite. The complex includes two MSU-100TM multispectral imaging devices that take an image of the Earth's surface at a swath of more than 1000 km with a spatial resolution better than 60 m. The KMSS-2 system on the Meteor-M No. 2-4 satellite, as well as on the previously commissioned satellite, has design features that ensure the receipt of high-quality target information: the imaging scheme uses spatially combined optical axes of spectral channels, linear optical-electronic sensors with an extended dynamic range of recorded brightness and low noise, separate control of the imaging parameters in the spectral channels. The resulting images are synchronized with measurements of the satellite orientation and location to ensure automated georeferencing of video data during ground processing. During the tests, a practical estimation was carried out and numerical values were obtained for a number of characteristics of the quality of target information: the formed surface swath, spatial resolution, the accuracy of interchannel alignment of images obtained in three spectral bands, as well as dynamic range, signal-to-noise ratio and sensitivity unevenness. As for user characteristics of target data, statistical estimations of the accuracy of georeferencing and radiometric quality — the error in determining energy brightness from snow fields in Greenland were carried out.

Keywords: KMSS-2, remote sensing of the Earth, hydrometeorology, multispectral survey, Meteor-M

Accepted: 04.12.2024 DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-77-93

References

- 1. Avanesov G.A., Polyansky I.V., Zhukov B.S. et al., Multispectral satellite imaging system on-board "Meteor-M" No. 1: Three years in orbit, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 2, pp. 74–83 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413020012.
- Zhukov B.S., Grishantseva L.A., Kondratieva T.V. et al., In-flight geometric calibration of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 93–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
- 3. Zhukov B.S., Kondratieva T.V., Polyanskiy I.V., Correction of automatic image georeferencing for the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 75–81 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.
- 4. Zhukov B.S., Kondratieva T.V., Nikitin A.V., Polyanskiy I.V., In-flight geometric calibration of multispectral satellite imaging system KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-3 satellite, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 1, pp. 185–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.
- Zavgorodnii D. S., Sokolskii M. N., Tregub V. P., Polyanskiy I. V., Multispectral satellite imaging systems on board Meteor-M satellite, 4-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientasii i navigatsii kosmicheskih apparatov" (Proc. 4th All-Russian Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), 2015, pp. 269–275 (in Russian).
- Kondratieva T.V., Zhukov B.S., Permitina L.I., Polyanskiy I.V., Reflectance data comparison of multispectral satellite imaging system KMSS-M on-board Meteor-M No. 2, MODIS on Terra and OLI on Landsat-8, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 19–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.
- Kondratieva T.V., Zhukov B.S., Polyanskiy I.V., Radiometric characteristics of multispectral satellite imaging systems KMSS-M on board Meteor-M No. 2 and KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-2 satellites, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 67–76 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76.
- Kondratieva T.V., Zhukov B.S., Polyanskiy I.V., Radiometric characteristics estimation of multispectral satellite imaging system KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-3 satellite by comparison with data from MODIS/Aqua spectroradiometer during flight tests, *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, Vol. 21, No. 3, pp. 61–70 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-61-70.
- 9. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V. et al., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hydrometeorological spacecraft. *Sovremennye problemy distansionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.