

## Радиометрические и геометрические характеристики Комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-4

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

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: tkondratieva@cosmos.ru*

Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего пространственного разрешения КМСС-2 на борту КА «Метеор-М» № 2-4 после успешного завершения лётных испытаний в сентябре 2024 г. был переведён в режим штатной эксплуатации. Два многозональных съёмочных устройства МСУ-100ТМ, входящих в состав КМСС-2, формируют изображение поверхности Земли в полосе более 1000 км с пространственным разрешением лучше 60 м. В данной работе приведены результаты оценки геометрических и радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2, полученные в 2025 г. при проведении полётных калибровок. При геометрической калибровке использовался каталог контрольных точек на береговой линии Чёрного, Средиземного и Балтийского морей, созданный по данным, полученным съёмочной системой MSI (*англ.* Multispectral Imager) на КА Sentinel-2. Калибровка геометрических параметров камер КМСС-М и параметров привязки их систем координат к системе координат звёздных датчиков позволяет проводить географическую привязку изображений КМСС-2 со среднеквадратической ошибкой около 60 м. Калибровка распределения чувствительности элементарных детекторов линейных ПЗС-приёмников проводилась по однородным снежным полям Антарктиды. Результаты калибровки проверялись сопоставлением значений среднего коэффициента спектральной яркости (КСЯ) полигонов на территории Антарктиды и пустыни Каракумы, измеренных КМСС-2 и спектрорадиометром MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на КА Aqua. Получено, что расхождение КСЯ по данным КМСС-2 и MODIS не превышает 3,5 %. Полётную геометрическую и радиометрическую калибровку камер КМСС-2 планируется проводить ежегодно.

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

Одобрена к печати: 04.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-137-150

### Введение

Комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2, разработанный и изготовленный в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН), был запущен в феврале 2024 г. на борту гидрометеорологического КА «Метеор-М» № 2-4 и после успешно проведённых лётных испытаний был введён в штатную эксплуатацию с сентября 2024 г. Целевая информация, получаемая на основе данных КМСС-2, предназначена для решения задач дистанционного зондирования Земли и востребована в первую очередь Российской федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, а также большим числом ведомств и научных организаций.

Первые результаты КМСС-2 были получены в ходе лётных испытаний, где в качестве пользовательских характеристик целевых данных были проведены статистические оценки точности географической привязки и радиометрического качества — погрешности определения энергетической яркости по снежным полям территории Гренландии — аппаратуры КМСС-2 (Полянский и др., 2024). В настоящей статье рассматриваются характеристики приборов МСУ-100ТМ, входящих в состав комплекса КМСС-2, уточнённые в ходе штатной эксплуатации. Анализировались данные, полученные в 2025 г. Оценки радиометрических характеристик КМСС-2 были выполнены по снежным полигонам Антарктиды и пескам Каракумов, была проведена кросс-калибровка с данными спектрорадиометра MODIS (*англ.*

Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) на КА Aqua. Геометрическая калибровка КМСС-2 оценивалась и уточнялась с использованием каталога контрольных точек, созданного по данным мультиспектральной съёмочной системы MSI (*англ.* Multispectral Imager) на КА Sentinel-2.

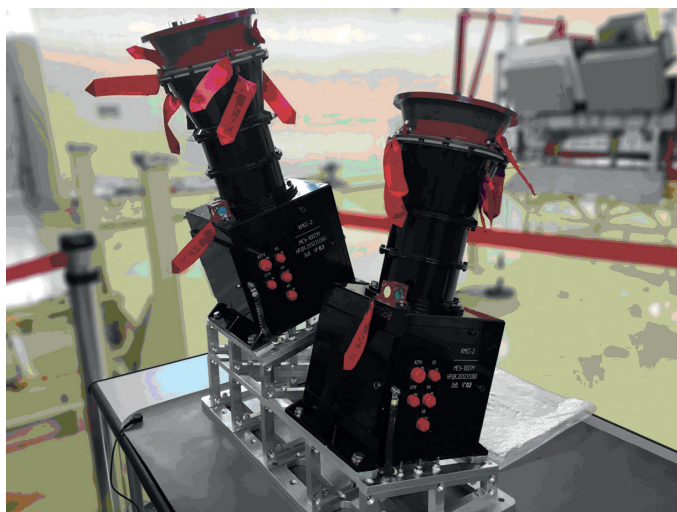
## Состав и основные характеристики КМСС-2

Комплексы многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения КМСС-2 изготавливаются в ИКИ РАН (Аванесов и др., 2013; Полянский и др., 2019).

Запуски КМСС-2 на космических аппаратах серии «Метеор-М» осуществляются начиная с 2017 г., когда стартовал КА «Метеор-М» № 1-2.

Комплекс КМСС-2 предназначен для проведения оптико-электронной съёмки земной и водной поверхности в трёх спектральных зонах видимого и ближнего инфракрасного диапазона спектра электромагнитных волн.

Конструкция КМСС-2 включает в себя два многозональных съёмочных устройства — камеры МСУ-100ТМ (для которых на КА «Метеор-М» № 2-4 приняты следующие краткие обозначения: МСУ-241 и МСУ-242), устанавливаемых на КА на общем кронштейне (*рис. 1*).



*Рис. 1.* Внешний вид КМСС-2 в составе двух приборов МСУ-100ТМ, смонтированных на установочном кронштейне

Основные характеристики комплекса КМСС-2 в целом, а также входящих в него приборов МСУ-100ТМ приведены в *табл. 1* и *2*.

С точки зрения коммутации питания, управления, телеметрирования и получения целевой информации две камеры МСУ-100ТМ являются автономными и независимыми приборами.

Каждая камера МСУ-100ТМ представляет собой моноблок и состоит из оптической системы ОС-125Т с телецентрическим ходом лучей в заднем отрезке, обеспечивающей пространственное совмещение изображений в трёх спектральных каналах (*рис. 2*, см. с. 140); преобразователей оптического сигнала в электрический — линейных приборов зарядовой связи (ЛПЗС) типа KLI-8023 (Kodak, США) с расширенным динамическим диапазоном регистрируемой яркости до 82 дБ и высоким отношением сигнал/шум; цифровой платы видеотракта, усиливающей и преобразующей электрические сигналы ЛПЗС; платы процессора, осуществляющей управление работой всего прибора и коммутацию цифровых потоков; модуля интерфейсов, которые формируют передаваемые сигналы и осуществляют приём команд и управляющих последовательностей от внешних систем КА; а также модуля вторичного источника питания, обеспечивающего электропитанием все узлы прибора.

Таблица 1. Основные характеристики КМСС-2

№ п/п	Параметр	Значение
1	Орбита КА	Солнечно-синхронная
2	Высота орбиты КА	820,7 км
3	Наклонение	98,586°
4	Эксцентриситет	0,00124
5	Число витков в сутках	14–15
6	Количество приборов МСУ-100ТМ	2
7	Формируемая полоса обзора	не менее 1000 км
8	Угол установки приборов МСУ-100ТМ относительно местной вертикали	$\pm 15,2^\circ$
9	Пространственное разрешение в надире	не хуже 60 м
10	Радиометрическое разрешение (разрядность АЦП)	10 бит
11	Точность совмещения изображений спектральных каналов	не более 0,5 элементов разрешения

Примечание: АЦП — аналого-цифровой преобразователь.

Таблица 2. Технические характеристики прибора МСУ-100ТМ

№ п/п	Параметр	Значение
1	Фокусное расстояние объектива	125 мм
2	Относительное отверстие объектива	1:4,3
3	Угловое поле зрения	32°
4	Размер элемента ПЗС	9×9 мкм
5	Число спектральных каналов	3
6	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
7	Длина строки изображения	7984 элемента
8	Число разрядов квантования	10
9	Динамический диапазон регистрируемой яркости	72 дБ
10	Отношение сигнал/шум (для объектов с яркостью 200 Вт·ср <sup>-1</sup> ·м <sup>-2</sup> )	более 200
11	Частота строк	125 Гц

Примечание: ПЗС — прибор с зарядовой связью.

Съёмка поверхности Земли осуществляется аппаратурой КМСС-2 построочно за счёт орбитального движения КА. Два прибора МСУ-100ТМ, установленные на КА на общей приборной платформе с отклонением оптических осей от «вертикальной» оси КА на угол  $\pm 15,2^\circ$  в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты, обеспечивают суммарную полосу обзора по Земле, составляющую около 1020 км (с перекрытием 24 км) при высоте орбиты около 820 км (рис. 3, см. с. 140). Размеры проекции чувствительного элемента на земную поверхность для направления в надир составляет около 60 м.

Регистрация оптического изображения подстилающей поверхности, которое линейно перемещается в фокальной плоскости объектива при движении КА по орбите, проводится в трёх спектральных зонах чувствительности приборов МСУ-100ТМ (0,520–0,590; 0,640–0,690 и 0,785–0,900 мкм), выбранных при конструировании прибора исходя из целевой задачи исследования суши (рис. 4, см. с. 141).

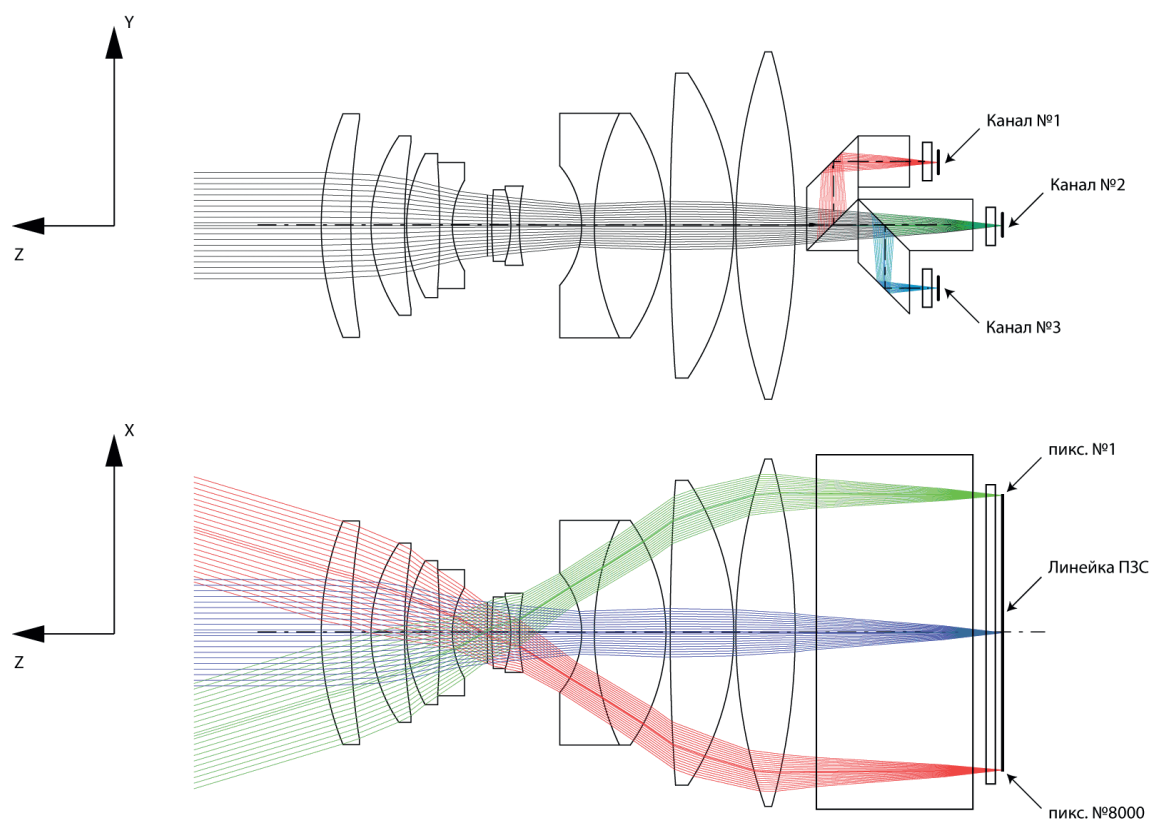


Рис. 2. Ход лучей в оптической системе прибора МСУ-100ТМ

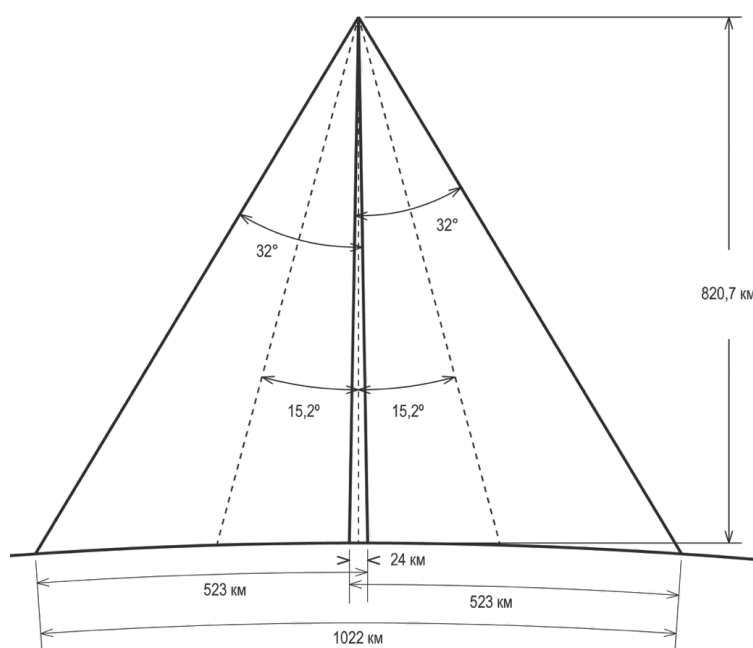


Рис. 3. Схема съёмки КМСС-2 двумя приборами МСУ-100ТМ

Регистрация сигналов изображения 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. Поскольку в каждом из корпусов ЛПЗС установлены три идентичных монохромных линейки

фотодиодов, а их переключение, управление параметрами и настройка обеспечиваются независимо, то задаётся конфигурация из активных ПЗС-линеек в каждом спектральном канале. Далее все расчёты были выполнены для конфигурации 1-1-1, когда в каждом из спектральных каналов прибора МСУ активной является первая ПЗС-линейка.

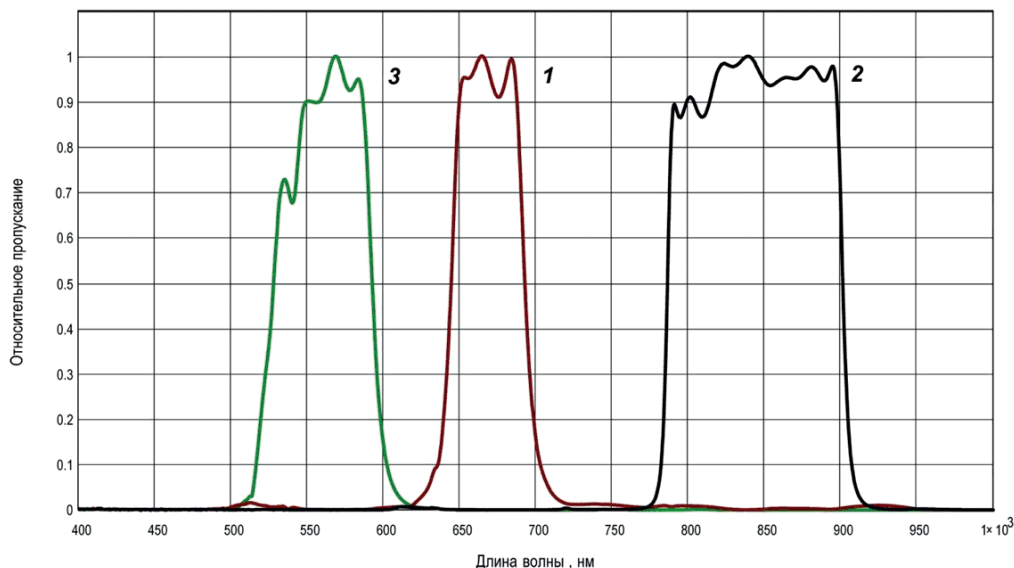


Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность каналов приборов МСУ-100ТМ (1 — красный, 2 — инфракрасный, 3 — зелёный)

## Результаты полётной геометрической калибровки камер КМСС-2/МСУ

Оценка точности связанной геометрии и географической привязки выходного изображения проводилась по изображениям, привязанным к географической сетке координат, полученным после штатной обработки данных КМСС-2/МСУ с учётом данных бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ-М) (Жуков и др., 2021, 2024), формирующего опорную секундную метку для привязки измерений, код бортового времени, а также данные об ориентации и местоположении КА. В состав БСКВУ-М входят:

- аппаратура формирования бортового времени и опорной сетки синхрочастот;
- аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS;
- три блока определения координат звёзд БОКЗ-2М.

Проводилось трансформирование полученного изображения в проекцию UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator) с использованием калибровочного файла, содержащего векторы направлений на центры пикселей всех линеек камеры в приборной системе координат, и навигационного файла, который строится с учётом данных приборов системы БСКВУ-М. Навигационный файл содержит элементы матрицы направляющих косинусов осей приборной системы координат камеры МСУ в географической системе координат, рассчитанные для каждой строки зарегистрированного камерой изображения.

Геометрическая калибровка камер проводилась с использованием банка контрольных точек, созданного на основе изображений, полученных съёмочной системой MSI на КА Sentinel-2. Выбранные контрольные точки располагались по береговым линиям бассейнов Средиземного, Чёрного и Балтийского морей, которые обладают достаточной протяжённостью по долготе для одновременной калибровки всех элементарных детекторов ЛПЗС (рис. 5, см. с. 142). Контрольные точки на береговой линии хорошо распознаваемы и стабильны. Число использованных контрольных точек изменяется от ~18 000 до ~44 000 в зависимости от канала (табл. 3).



На рис. 6 и 7 представлены фрагменты кадров камер КМСС-2/МСУ с контрольными точками. По максимуму коэффициента корреляции каждой контрольной точки из каталога определялись её координаты на изображении ( $X, Y$ ) и смещения  $dX$  и  $dY$  в проекции UTM относительно её расчётного положения.

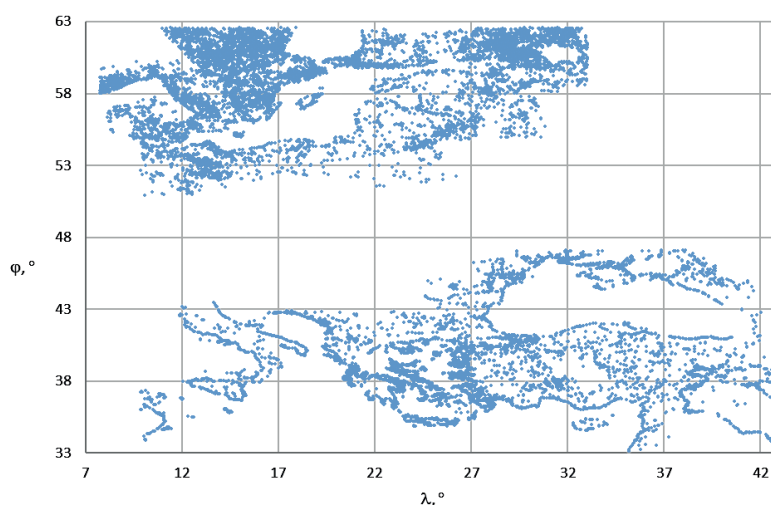


Рис. 5. Распределение географических координат контрольных точек

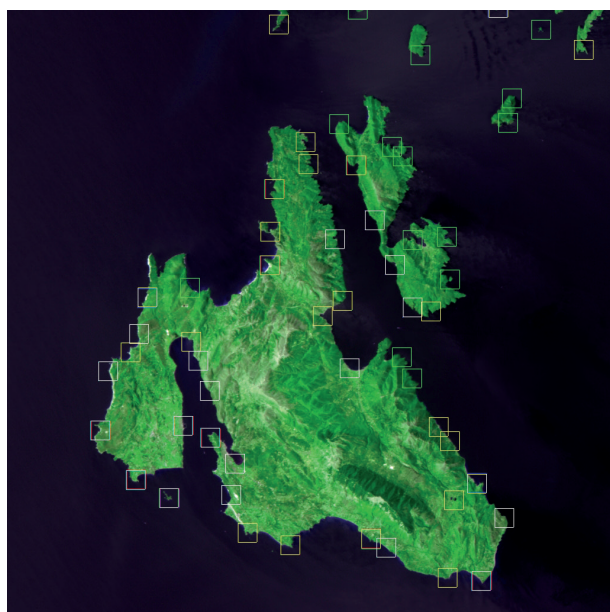


Рис. 6. Фрагмент кадра 242\_006587\_0\_0\_02 (МСУ-242) с контрольными точками (Греция, Ионические острова)

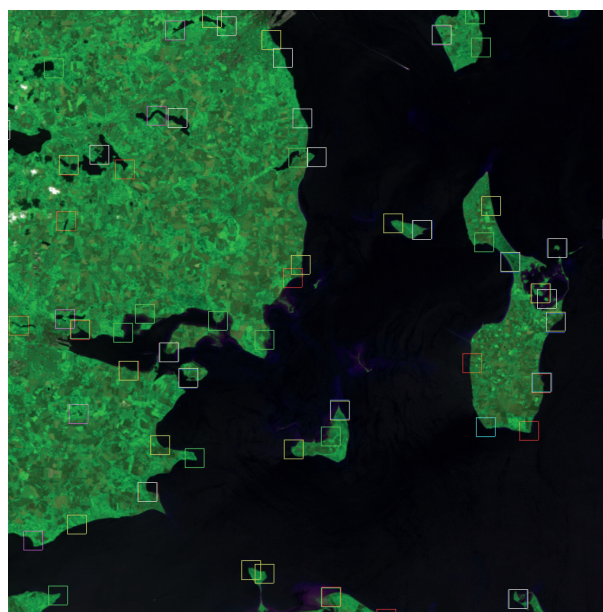


Рис. 7. Фрагмент кадра 241\_006672\_0\_0\_06 (МСУ-241) с контрольными точками (Дания, Хорсенс-фьорд и остров Самсё)

В результате были получены файлы, содержащие:

- координаты ( $X, Y$ ) точки на изображении МСУ;
- географические координаты точки из каталога (долгота, широта и высота) в Гринвичской системе координат WGS 84 (англ. World Geodetic System 1984);
- направляющие косинусы вектора на точку во внутренней системе координат прибора МСУ;
- коэффициент корреляции;
- смещения  $dX, dY$  (в м).

Разработанное программное обеспечение позволяет, используя созданные файлы с данными контрольных точек для нескольких изображений и их навигационные файлы, уточнять файлы геометрической калибровки прибора.

При уточнении файла геометрической калибровки выполнялись:

- оценка точности географической привязки видеоданных КМСС-2;
- отбраковка точек, выходящих за доверительный интервал  $\pm 3\sigma$  ( $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение);
- определение элементов внутреннего ориентирования системы ПЗС-линейки в приборной системе координат камеры МСУ;
- определение коэффициентов полинома дисторсии;
- формирование файла геометрической калибровки прибора, содержащего направляющие косинусы всех элементов ПЗС-линейки камеры.

В результате обработки массивов контрольных точек для МСУ-241 и МСУ-242 были получены следующие параметры геометрии (табл. 3): фокусное расстояние, три угла ориентации осей внутренней системы координат для ПЗС-линейки в каждом спектральном канале относительно условной системы координат прибора МСУ-100ТМ, которая повернута относительно обобщённой системы координат звёздных датчиков БОКЗ-2М на угол  $\pm 15,2^\circ$  вокруг оси  $Y$ , и погрешности их определения, а также уточнены файлы геометрической калибровки (табл. 4).

Таблица 3. Параметры геометрии камер КМСС-2/МСУ

Спектральный канал	МСУ-241			МСУ-242		
	1	2	3	1	2	3
Фокусное расстояние, $F_{oc}$ , мм	125,281	125,233	125,313	125,140	125,190	125,137
$\alpha_x$ , град	359,626	359,616	359,608	359,592	359,606	359,596
$\alpha_y$ , град	0,835	0,837	0,821	0,101	0,193	0,153
$\alpha_z$ , град	0,192	0,187	0,131	359,992	359,957	0,049
СКО, мкм	9,4	8,6	8,9	10,0	8,9	9,3
Число точек	17 929	37 740	19 803	28 733	44 473	35 566

Примечание: СКО — среднеквадратическая ошибка.

Таблица 4. Точности географической привязки по файлам геометрии приборов КМСС-2/МСУ

Спектральный канал	МСУ-241			МСУ-242		
	1	2	3	1	2	3
$dX$ — смещение по оси $X$						
Среднее значение, м	−20,3	−40,1	−35,6	30,4	14,9	18,2
СКО, м	60,9	62,9	58,3	59,6	60,8	61,5
$dY$ — смещение по оси $Y$						
Среднее значение, м	20,9	11,9	13,8	43,3	38,7	39,5
СКО, м	45,5	46,8	45,8	58,1	60,3	60,1

Итоговые ошибки решения системы уравнений, связывающей векторы направления на контрольные точки в Гринвичской системе координат WGS-84 и в системе координат ПЗС-линейки через геометрические параметры камер КМСС-2/МСУ, не превышают 10 мкм в фокальной плоскости.

По результатам уточнения файлов геометрической калибровки приборов КМСС-2/МСУ, представленным в *табл. 4*, видно, что среднее значение ошибки географической привязки изображений составило не более 45 м, СКО — порядка 60 м, что соответствует размеру элемента разрешения системы.

Оценка точности совмещения изображений спектральных каналов приборов КМСС-2/МСУ была проведена по контрольным точкам из каталога, используя их координаты по осям  $X$  и  $Y$  (строки, столбцы) на изображениях, полученных в разных каналах. За начало отсчёта принимались значения координат во втором спектральном канале, относительно которого были рассчитаны разности координат объекта для первого и третьего спектральных каналов.

*Таблица 5. Ошибки межканального совмещения в приборах КМСС-2/МСУ*

Спектральные каналы	МСУ-241			МСУ-242		
	1	2	3	1	2	3
$dX$ — смещение по оси $X$						
Среднее значение, м	19	0	4	15	0	3
СКО, м	8	0	9	10	0	6
$dY$ — смещение по оси $Y$						
Среднее значение, м	9	0	4	4	0	3
СКО, м	5	0	9	6	0	6

Среднее значение ошибки межканального совмещения, определённое как разность среднего смещения контрольных точек между каналами, во всех случаях не превышало 20 м (т.е. не превышало 0,5 элемента разрешения — размера проекции пикселя на земную поверхность), СКО составляло не более 10 м (*табл. 5*).

Результаты геометрической калибровки камер КМСС-М используются при автоматической геопривязке изображений по данным о положении и ориентации КА.

### Результаты полётной радиометрической калибровки камер КМСС-2/МСУ

Радиометрическое качество целевой информации в ходе штатной эксплуатации комплекса КМСС-2 было подтверждено с помощью оценки и сравнения яркостных характеристик естественных природных объектов. Работы проводились по хорошо зарекомендовавшей себя методике, применённой на КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 (Кондратьева и др., 2018) и на КМСС-2 КА «Метеор-М» № 2-2 (Кондратьева и др., 2020). Была осуществлена съёмка полигонных участков на территории Антарктиды (в сезон январь — февраль 2025 г.) с характерным однородным снежным покровом, со стабильными отражательными характеристиками, регистрируемых в безоблачных условиях.

Съёмка проводилась в конфигурации ПЗС-линеек (1-1-1) приборов КМСС-2/МСУ, используемой в процессе эксплуатации КМСС-2 на борту КА «Метеор-М» № 2-4.

Для указанной конфигурации по методике, описанной в работе (Жуков и др., 2014), по снежным полям Антарктиды определялись коэффициенты коррекции чувствительности элементарных детекторов ПЗС-линеек камер КМСС-2/МСУ относительно полученных ранее при проведении лётных испытаний, где в качестве полигона был выбран однородный снежный покров острова Гренландия (Полянский и др., 2024). Для этого для каждого элементарного детектора было выполнено от 10 000 до 20 000 измерений коэффициента яркости. Полученные в результате коэффициенты коррекции коэффициентов чувствительности элементарных детекторов камер представлены на *рис. 8* и *9* (см. с. 145). Отклонение коэффициентов коррекции от 1 не превышает 10 % и в большинстве случаев находится в пределах 5 %.



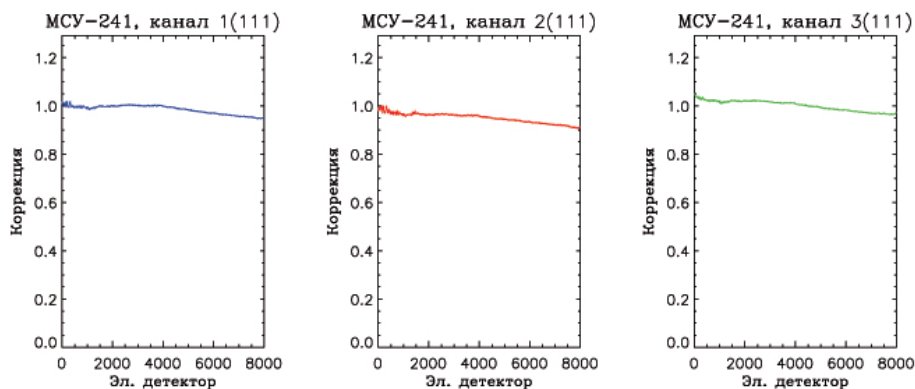


Рис. 8. Коррекция коэффициентов чувствительности элементарных детекторов камеры МСУ-241 по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды в зимний сезон (январь – февраль) 2025 г.

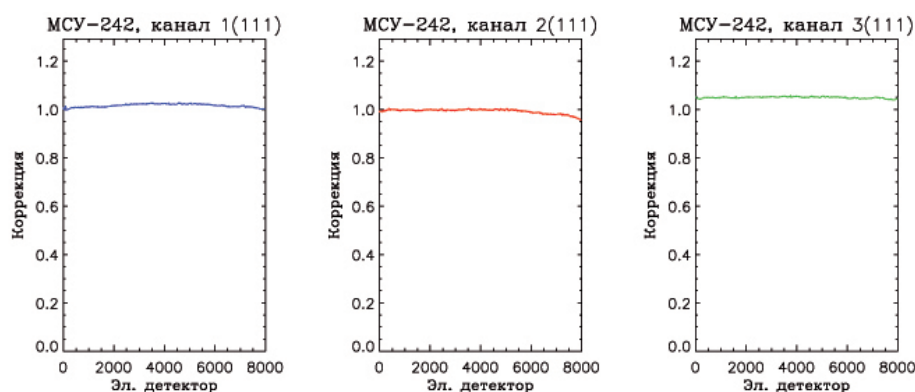


Рис. 9. Коррекция коэффициентов чувствительности элементарных детекторов камеры МСУ-242 по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды в зимний сезон (январь – февраль) 2025 г.

На рис. 10, 11 (см. с. 146) приведено распределение коэффициентов чувствительности элементарных детекторов в спектральных каналах камер МСУ-241 и МСУ-242 в конфигурации ПЗС-линеек (1-1-1) по результатам радиометрической калибровки по снежным полям Антарктиды в сезон январь – февраль 2025 г. Для сравнения на графиках представлено распределение коэффициентов чувствительности элементарных детекторов МСУ, вычисленное в ходе проведения лётных испытаний в 2024 г., по яркостным характеристикам снегов Гренландии.

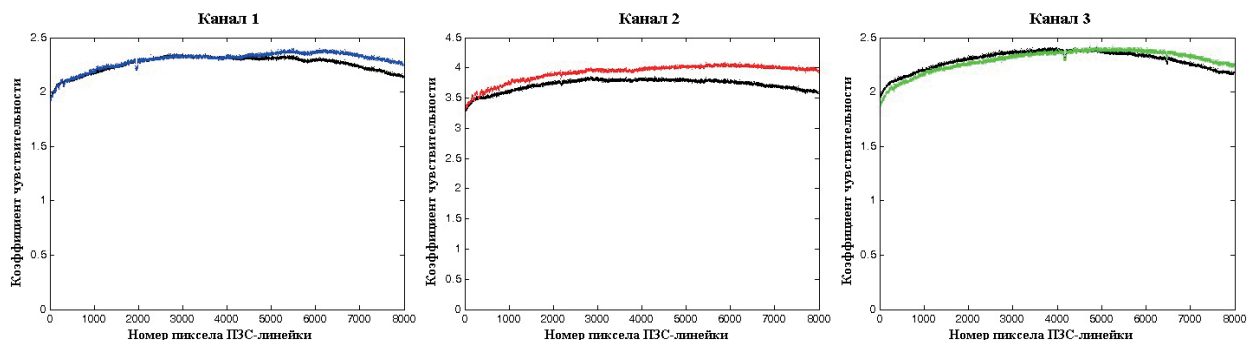


Рис. 10. Распределение коэффициента чувствительности элементарных детекторов камеры МСУ-241 в спектральных каналах по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды (январь – февраль 2025 г.) и Гренландии (апрель – май 2024 г.) (показано чёрным цветом)

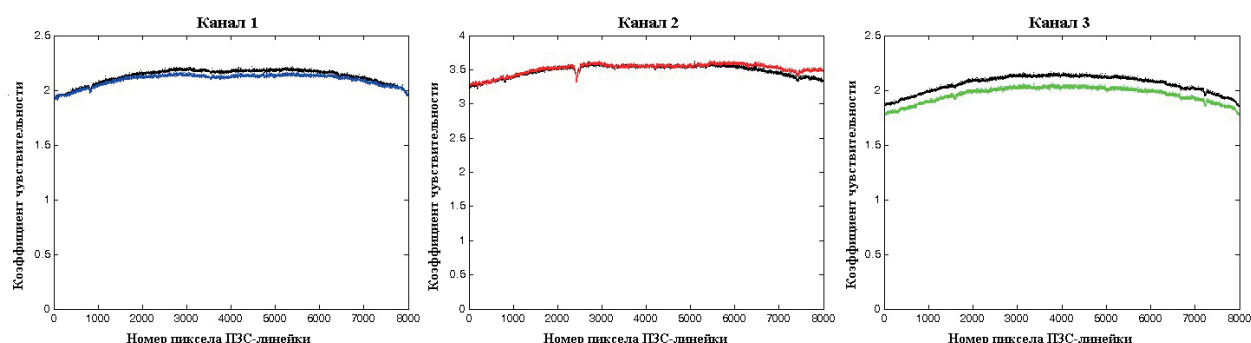


Рис. 11. Распределение коэффициента чувствительности элементарных детекторов камеры МСУ-242 в спектральных каналах по результатам калибровки по снежному покрову Антарктиды (январь – февраль 2025 г.) и Гренландии (апрель – май 2024 г.) (показано чёрным цветом)

С учётом скорректированных коэффициентов чувствительности элементарных детекторов камер КМСС-2/МСУ были выполнены расчёты средних яркостных характеристик безоблачных изображений наземных полигонов площадью в несколько сотен квадратных километров, расположенных на территориях Антарктиды и пустыни Каракумы. По указанным полигонам проведена кросс-калибровка камер комплекса КМСС-2 со спектрорадиометром MODIS на КА Aqua по коррелируемым по времени и географически привязанным данным. Сравнивались коэффициенты спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы, регистрируемые в спектральных каналах КМСС-2 и в близких к ним спектральных каналах MODIS/Aqua (каналы 1 (620–670 нм), 2 (841–876 нм), 4 (545–565 нм) и 17 (890–920 нм)). Для этого выполнялся пересчёт с использованием регрессионных соотношений, приведённых в табл. 6.

Таблица 6. Регрессионные соотношения для пересчёта КСЯ между спектральными каналами камер КМСС-2/МСУ и MODIS/Aqua

Спектральный канал	Регрессионные соотношения
<b>МСУ-241</b>	
1 (640–690 нм)	1,023mod_1
2 (785–900 нм)	0,676mod_2+0,333mod_17
3 (520–590 нм)	0,981mod_4
<b>МСУ-242</b>	
1 (640–690 нм)	1,021mod_1
2 (785–900 нм)	0,711mod_2+0,297mod_17
3 (520–590 нм)	0,978mod_4

Результаты сопоставления значений КСЯ, регистрируемых в спектральных каналах КМСС-2/МСУ и в соответствующих спектральных каналах MODIS/Aqua, приведены на рис. 12, 13 (см. с. 147) и в табл. 7.

В верхних частях графиков представлены результаты кросс-калибровки по Антарктиде, в нижних — по пескам пустыни Каракумы.

Из данных, приведённых в табл. 7, видно, что значения КСЯ, измеренные в спектральных зонах КМСС-2 и пересчитанные по данным MODIS/Aqua, хорошо согласуются. Их расхождение находится в диапазоне 0,03–3,5 %, СКО КСЯ составляет не более 0,019.

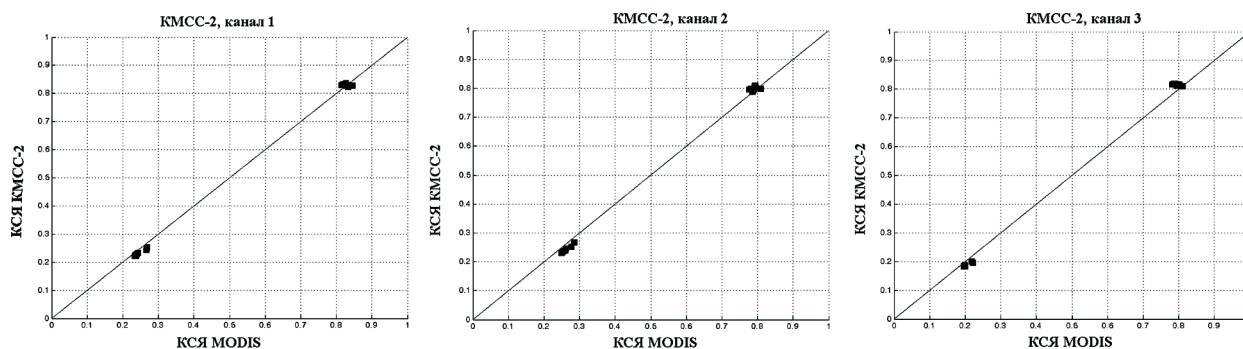


Рис. 12. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-241 (конфигурация линеек (1-1-1)) и MODIS/Aqua

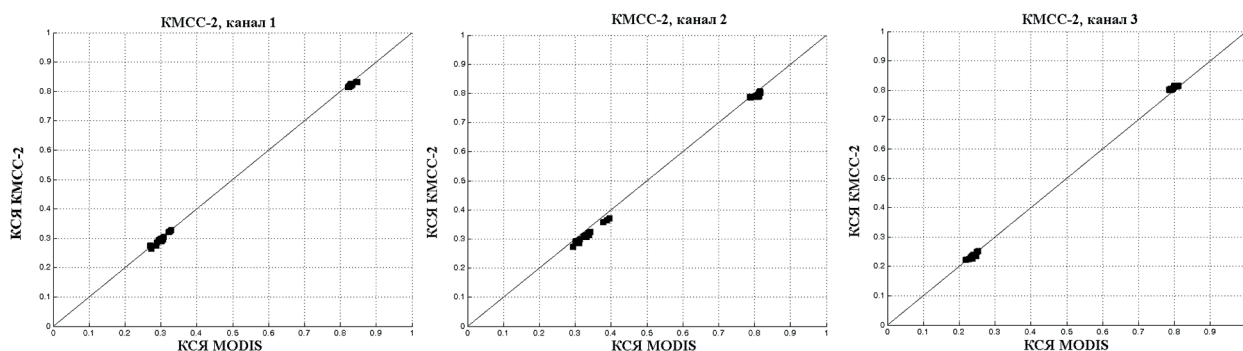


Рис. 13. Соотношение КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 по измерениям МСУ-242 (конфигурация линеек (1-1-1)) и MODIS/Aqua

Таблица 7. Сопоставление КСЯ в спектральных каналах КМСС-2 (по данным КМСС-2 и MODIS/Aqua)

Параметры	Канал 1 (640–690 нм)	Канал 2 (785–900 нм)	Канал 3 (520–590 нм)
МСУ-241			
СКО КСЯ	0,013	0,015	0,019
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,975\rho_{\text{MODIS}}$	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,974\rho_{\text{MODIS}}$	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,98\rho_{\text{MODIS}}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1, %	–2,5	–2,6	–2,0
МСУ-242			
СКО КСЯ	0,010	0,018	0,009
Уравнение линейной регрессии значений КСЯ	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,985\rho_{\text{MODIS}}$	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,965\rho_{\text{MODIS}}$	$\rho_{\text{МСУ}} = 0,997\rho_{\text{MODIS}}$
Отклонение коэффициента регрессии от 1, %	–1,5	–3,5	–0,03

## Выводы

Функционирование аппаратуры КМСС-2 на борту КА «Метеор-М» № 2-4 в условиях космического полёта в ходе штатной эксплуатации успешно подтверждено проведёнными расчётами и оценками технических характеристик. Качество получаемой целевой информации соответствует требованиям заказчика.

Работы по контролю геометрических свойств приборов КМСС-2/МСУ, оценке точности межканального совмещения и географической привязки целевых данных, а также при необходимости по корректировке файлов геометрической коррекции планируется проводить ежегодно. Для контроля радиометрических характеристик аппаратуры КМСС-2, выполнения кросс-калибровки и уточнения коэффициентов радиометрической коррекции в период январь – март следует осуществлять съёмки протяжённых полигонных участков с известной яркостью в Антарктиде.

## Литература

1. Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С. и др. Комплекс многозональной спутниковой съёмки 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., Кондратьева Т. В., Полянский И. В., Пермитина Л. И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки на КА «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123–137.
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. 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 Terra 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.
6. 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.
7. 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.
8. Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В. Первые результаты и оценка качества целевой информации комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-4 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 77–93. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-77-93.



## Radiometric and geometric characteristics of the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-4 satellite

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

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: tkondratieva@cosmos.ru

The KMSS-2 medium spatial resolution multispectral satellite imaging system on board the Meteor-M No. 2-4 satellite was transferred to regular operation following successful completion of flight tests in September 2024. KMSS-2 includes two MSU-100TM multispectral imaging devices, which form an image of the Earth surface at a swath of more than 1000 km with a spatial resolution better than 60 m. The paper presents the evaluation results of the KMSS-2 geometric and radiometric characteristics obtained in 2025 during in-flight calibrations. A catalog of control points along the coastlines of the Black, Mediterranean, and Baltic Seas, created using data obtained from the Sentinel-2 MSI (Multispectral Imager) instrument, was used for geometric calibration. As a result, the geometric parameters of the KMSS-M cameras and the parameters linking their reference systems to the reference system of star sensors were calibrated, allowing for geographic referencing of KMSS-2 images with a root-mean-square error of about 60 m. The sensitivity distribution of the elementary detectors of the linear CCD (charge-coupled device) arrays was calibrated over the homogeneous snowfields of Antarctica. The calibration results were verified by comparing the average spectral reflectance of test sites in Antarctica and in the Karakum desert, obtained from KMSS-2 and from MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) aboard the Aqua satellite. It was found that the discrepancy between reflectance values from the KMSS-2 and MODIS data does not exceed 3.5 %. It is planned to repeat the in-flight KMSS-2 geometric and radiometric calibration annually.

**Keywords:** KMSS-2, MSU, remote sensing of the Earth, hydrometeorology, multispectral imaging, Meteor-M, MODIS

Accepted: 04.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-137-150

### References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S. et al., Multispectral Satellite Imaging System aboard the Meteor-M No. 1: three years in orbit, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961413020012.
2. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Permitina L. I., In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System on-board Meteor-M No. 1 relative spectroradiometer MODIS on-board Terra, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, V. 11, No. 2, pp. 123–137 (in Russian).
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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 1, pp. 185–193 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193.
5. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15., No. 2, pp. 19–28 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-19-28.
6. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 7, pp. 67–76 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-67-76.

7. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V. et al., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hydrometeorological spacecraft, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 6, pp. 83–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
8. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., First results of work and target information quality estimation of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-4 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 77–93 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-77-93.