# Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2

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

### Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

Комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на космическом аппарате «Метеор-М» № 2-2 включает две камеры МСУ-100ТМ с разрешением в надире 55 м и суммарной полосой обзора более 1000 км. Географическая привязка изображений КМСС-2 проводится автоматически на основе сопутствующей навигационной информации и результатов геометрической калибровки камер. В случае наличия погрешностей навигационной информации могут возникать ошибки геопривязки изображений КМСС-2 до многих сотен метров, для оперативной коррекции которых используется банк контрольных точек (КТ) Landsat. Коррекция автоматической географической привязки проведена для 518 кадров КМСС-2 размером 7984×9000 пикселей на 207 маршрутах, снятых над территорией Евразии в период времени с июля 2019 г. по июль 2020 г. Всего на изображениях было опознано более 80 тыс. КТ, в основном расположенных на береговой линии морей, рек и озёр. Большинство КТ Landsat, расположенных на суше, не было идентифицировано вследствие сезонных и межгодовых изменений почвенно-растительного покрова, а также из-за различия спектральных зон КМСС-2 и эталонных изображений КТ. В большинстве случаев ошибки автоматической географической привязки изображений КМСС-2 по навигационным данным, определённые и скорректированные данным методом, не превышали 60 м, однако были зарегистрированы также аномальные ошибки до 600 м.

Ключевые слова: КМСС-2, КА «Метеор-М» № 2-2, географическая привязка, контрольные точки

Одобрена к печати: 10.02.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81

В июле 2019 г. на орбиту был выведен космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-2, в состав научной аппаратуры которого входит комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 (Полянский и др., 2019). КМСС-2 является усовершенствованной версией комплекса КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 (Аванесов и др., 2013).

КМСС-2 включает в себя две камеры МСУ-100ТМ с фокусным расстоянием 125 мм, условно обозначаемые МСУ-221 и МСУ-222, основные характеристики которых приведены ниже. В отличие от КМСС и КМСС-М плоскости наблюдения всех трёх спектральных каналов камер КМСС-2 оптически совмещены (с точностью до нескольких десятков элементов ПЗС-линеек (прибор с зарядовой связью, *англ*. ССD — Charge-Coupled Device) размером  $9 \times 9$  мкм) в плоскости, перпендикулярной направлению полёта. В этой плоскости их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол  $\pm 15$ ,2°, в результате чего обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер более 1000 км. Размер проекции пикселя на земную поверхность в плоскости наблюдения изменяется от 55 м в надире до 80 м на краю полосы съёмки. Шаг отсчёта в направлении полёта определяется частотой строк 125 Гц и равен 53 м.

Технические характеристики камер МСУ-100ТМ (КМСС-2)

| Фокусное расстояние объектива     | 125 мм         |
|-----------------------------------|----------------|
| Относительное отверстие объектива | 1:4,3          |
| Длина строки изображения          | 7984 элементов |

| Угловое поле зрения   | 32°                |
|---|--------------------|
| Размер элемента ПЗС   | 9×9 <sub>МКМ</sub> |
| Угловое разрешение  | 15 угл. с          |
| Размер проекции пикселя в плоскости наблюдения (Н = 820 км) | 55—80 м            |
| Шаг отсчёта в направлении полёта                            | 53 м               |
| Наклон оптической оси камер в плоскости, перпендикулярной   |                    |
| направлению полёта  | ±15,2°             |
| Полоса захвата двумя камерами ( <i>H</i> = 820 км)          | 1020 км            |
| Число спектральных каналов                                  | 3                  |
| Спектральные зоны (на уровне 0,5)                           | 0,520-0,590 мкм    |
|   | 0,640-0,690 мкм    |
|   | 0,785-0,900 мкм    |
| Число разрядов квантования                                  | 10                 |
| Частота строк   | 125 Гц             |

При предварительной обработке маршруты съёмки КМСС-2 нарезаются на кадры размером 7984×9000 пикселей.

Географическая привязка кадров КМСС-2 проводится автоматически на основе сопутствующей навигационной информации и результатов геометрической калибровки камер.

Формирование навигационной информации проводится на борту КА в бортовом синхронизирующем координатно-временном устройстве (БСКВУ-М), в состав которого входит:

- аппаратура формирования бортового времени и опорной сетки синхрочастот;
- аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS (ГЛОНАСС Глобальная навигационная спутниковая система; GPS — *англ*. Global Positioning System, система глобального позиционирования);
- три звёздных датчика БОКЗ-М2 (блок определения координат звёзд).

В полёте направление наблюдения для каждого элемента ПЗС-линеек привязывается к обобщённой системе координат звёздных датчиков (через вспомогательную приборную систему координат камер). Точность измерения угла поворота вокруг оптической оси БОКЗ-М2 составляет ~30 угл. с (1 $\sigma$ ), что значительно хуже точности измерения двух углов направления оптической оси, равной ~5 угл. с (1 $\sigma$ ). Поэтому в штатном режиме используются два звёздных датчика, оптические оси которых направлены под углом 90° друг к другу, что обеспечивает равноточные измерения ориентации по всем трём углам.

Геометрическая калибровка камер КМСС-2 проводилась на Земле и уточнялась в полёте по создаваемому в Институте космических исследований РАН банку контрольных точек (КТ, GCP — англ. Ground Control Point), выбранных по изображениям Sentinel в районе Чёрного и Эгейского морей (Жуков и др., 2019). Описание контрольной точки включает её идентификатор, эталонное изображение, его картографическую проекцию, пространственное разрешение и географические координаты центра, а также другую информацию (например, последнюю дату верификации, сезоны, в которых КТ распознаваема, и др.). Ошибка географической привязки изображений по результатам полётной калибровки не превышала 100 м, а точность межканального совмещения — 8 м (0,15 пикселя).

В декабре 2019 г. на борту космического аппарата произошла нештатная ситуация, вероятно вследствие попадания в КА микрометеорита, что потребовало перестройки системы управления КА и, как следствие, периодического использования одного звёздного датчика. Кроме того, изменение температурного режима КА повлияло на геометрическую привязку систем координат камер КМСС-2 к системе координат звёздных датчиков, что потребовало повторной полётной геометрической калибровки КМСС-2, а для учёта возможных погрешностей навигационной информации — оперативной проверки и коррекции геопривязки получаемых изображений. При этом существенно, что, несмотря на ошибки геореференцирования, точность межканального совмещения каналов существенно не ухудшилась и осталась на субпиксельном уровне благодаря оптическому сведению каналов. Это даёт возможность корректировать ошибки геореференцирования по одному каналу. Поскольку банк КТ Sentinel, применявшийся при полётной калибровке камер КМСС-2, в настоящее время имеет ограниченное покрытие, для коррекции получаемых изображений использовался глобальный банк КТ Landsat (http://landsat.usgs.gov/ground control points/php), который содержит более 3 млн КТ. Банк КТ Landsat сформирован в основном по полученным в 1999–2002 гг. изображениям ETM+/Landsat (*англ*. Enhanced Thematic Mapper Plus). Начиная с 2014 г. банк КТ пополняется по данным OLI/Landsat-8 (*англ*. Operational Land Imager). Эталонные изображения КТ получены в спектральной зоне 1,55–1,75 мкм коротковолнового инфракрасного (ИК) диапазона с разрешением 30 м, имеют размер 64×64 пикселя и представлены в проекции UTM (*англ*. Universal Transverse Mercator). Точность географической привязки КТ оценивается в ~20 м (1 $\sigma$ ), что достаточно для коррекции геопривязки изображений КМСС-2 с субпиксельной точностью. Вследствие большого срока, прошедшего с начала формирования банка КТ Landsat, содержащиеся в нём КТ требуют верификации.

Проверка и коррекция географической привязки кадров КМСС-2 с одновременной верификацией КТ Landsat проводилась по изображениям, полученным в ближней ИК-зоне 0,785–0,900 мкм и прошедшим штатную процедуру потоковой предварительной обработки (Жуков и др., 2008). В результате обработки осуществляется автоматическая геопривязка изображений КМСС-2 по навигационным данным без орторектификации и их представление в проекции UTM на геоид WGS-84 с разрешением 60 м. Орторектификация изображений КМСС-2 по запросу пользователей.

Для коррекции автоматической геопривязки использовались следующие процедуры:

- отбор из каталога тех контрольных точек Landsat, которые попадают в область, покрываемую изображением КМСС-2;
- загрубление эталонных изображений КТ путём осреднения до разрешения 60 м;
- определение расчётного положения каждой КТ на изображении с использованием её географических координат, высоты и навигационных данных;
- определение области поиска каждой отобранной КТ на изображении КМСС-2; размер области поиска определяется размером эталонного изображения КТ и максимальной ошибкой автоматической географической привязки изображений КМСС-2, которая с запасом принималась равной ±20 пикселей;
- нахождение положения образа каждой КТ на изображении КМСС-2 корреляционным методом с пиксельной точностью и его уточнение методом наименьших квадратов с субпиксельной точностью; КТ считалась опознанной, если коэффициент корреляции реального и эталонного изображений КТ превышал 0,8;
- определение среднего смещения всех распознанных КТ по координатам X и Y соответствующей зоны UTM;
- фильтрация аномальных отклонений КТ (превышающих 2 о хотя бы по одной координате) и пересчёт среднего смещения КТ;
- коррекция географической привязки кадра КМСС-2 в соответствии со средним смещением КТ, практически сводящаяся к изменению координат *X* и *Y* первого элемента изображения в ENVI-заголовке изображения (*анел*. Environment for Visualizing Images) без пересчёта самого изображения.

Одновременно осуществляется верификация KT Landsat.

Проверка и коррекция географической привязки была проведена для 518 кадров, снятых в малооблачных условиях на 207 маршрутах над территорией Евразии в период с июля 2019 г. по июль 2020 г. Всего было распознано более 80 тыс. КТ, в основном на береговой линии морей, рек и озёр (*puc. 1*, см. с. 78).

Пример результата распознавания КТ на фрагменте одного из изображений КМСС-2, полученного в районе дельты Днепра, показан на *рис. 2* (см. с. 78). Наряду с распознанными КТ на границе «вода – суша» имеется большое число недетектированных КТ на суше. Сопоставление эталонных изображений нераспознанных КТ с их изображениями, полученными КМСС-2, показывает существенное изменение их структуры и контраста, вследствие чего для них коэффициент корреляции оказался ниже порога, принятого равным 0,8.



*Рис. 1.* Пространственное распределение верифицированных контрольных точек Landsat (показаны жёлтым цветом); проекция: долгота – широта





б

*Рис. 2.* Эталонные изображения контрольных точек Landsat в районе дельты Днепра (*a*); результат распознавания КТ на фрагменте снимка КМСС-2, полученного 5 июля 2020 г. (*б*). Красные квадраты — распознанные КТ, зелёные квадраты — нераспознанные КТ

Контрольные точки, выбранные на границе «суша – вода», при пространственном разрешении КМСС-2 устойчивы по отношению к сезонным и межгодовым изменениям, за исключением участков с сильными приливами, а также участков, подверженных антропогенным изменениям (Балдина и др., 2016). Их хорошая распознаваемость определяется высоким контрастом «суша – вода» как в ближнем ИК, так и в коротковолновом ИК-диапазоне (КВИК).

Плохая распознаваемость KT Landsat на суше может быть объяснена высокой чувствительностью их изображений к сезонным и межгодовым изменениям почвенно-растительного покрова, особенно в районах активной сельскохозяйственной деятельности. Кроме того, существенную роль играет различие спектральных зон камер КМСС-2 и эталонных изображений KT Landsat (*puc. 3*). Например, контраст «зелёная трава — почвы» обращается при переходе от ближнего ИК к КВИК-диапазону и имеет тот же знак в указанных диапазонах после пожелтения травы.



*Рис. 3.* Спектры отражения некоторых объектов из спектральной библиотеки ASTER; серым показаны спектральные зоны 1, 2 и 3 камер КМСС-М и спектральная зона эталонных изображений KT Landsat



*Рис. 4.* Гистограммы ошибок геопривязки изображений КМСС-2 по навигационным данным, скорректированных данным методом

На *рис.* 4 приведены гистограммы ошибок географической привязки изображений КМСС-2 по навигационным данным, определённых и скорректированных данным методом. В большинстве случаев ошибки геопривязки не превышали 1 пикселя (60 м), однако были

зарегистрированы и аномальные ошибки: до 480 м по *X* и до 600 м по *Y*, связанные с погрешностями навигационной информации.

Рассмотренный метод позволяет скорректировать лишь общий сдвиг изображения КМСС-2 по двум координатам. Остаётся нескорректированным возможное вращение и более сложная деформация изображений, для коррекции которых число и полнота покрытия кадра детектированными КТ Landsat обычно недостаточны. Величину указанных остаточных искажений можно оценить по среднеквадратическому отклонению (СКО) положения КТ в пределах кадра после коррекции. На разброс положения КТ, помимо погрешностей навигационных данных, влияют ошибки установления корреляции, ошибки геопривязки самих КТ Landsat, ошибки внутренней калибровки камер КМСС-М и др. Суммарное влияние этих ошибок в большинстве случаев приводило к значениям СКО положения КТ, не превышающим размера пикселя. Однако в горных районах СКО положения КТ доходило до 3 пикселей, что связано с влиянием рельефа на положение КТ на неорторектифицированных изображениях КМСС-2.

В заключение необходимо отметить актуальность создания глобального каталога стабильных КТ для географической привязки изображений космических съёмочных систем, а также для решения задач автономной оптической навигации космических аппаратов.

## Литература

- 1. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
- 2. Балдина Е.А., Бессонов Р.В., Гришин В.А., Жуков Б.С., Харьковец Е.Г. Оценка возможности использования карты береговых линий GSHHG для автономной оптической навигации космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 217–228.
- 3. Жуков Б. С., Василейский А. С., Жуков С. Б., Зиман Я. Л., Полянский И. В., Бекренев О. В., Пермитина Л. И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 1. С. 260–266.
- 4. Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Пермитина Л.И., Полянский И.В. Полетная геометрическая калибровка Комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100.
- 5. Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Прохорова С. А., Сметанин П. С. Комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92.

## Correction of automatic image georeferencing for the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite

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

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

The KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite consists of two MSU-100TM cameras with a nadir resolution of 55 m and a total swath of more than 1000 km. Geographic referencing of KMSS-2 images is performed automatically based on the accompanying

navigation information and on the camera geometric calibration. In case of errors in the navigation information, geo-referencing errors of KMSS-2 images up to many hundreds of meters may occur. For their operative correction, the bank of Landsat ground control points (GCP) is used. Geo-referencing was checked and refined for 518 KMSS-2 frames with a size of 7984×9000 pixels on 207 imaging tracks that were acquired over Eurasia from July 2019 to July 2020. In total, more than 80 thousand GCPs were recognized in the images, mainly located on sea coastline and on rivers and lakes. Most of the Landsat GCPs located on land were not identified due to seasonal and inter-annual changes in the land cover, as well as due to the difference in the spectral bands of the KMSS-2 and of the reference GCP images. In most cases, the errors of KMSS-2 automatic geo-referencing based on the navigation information, which were estimated and corrected by this method, did not exceed 60 m, however, anomalous errors of up to 600 m were also recorded.

Keywords: KMSS-2, Meteor-M No. 2-2, image georeferencing, ground control points

Accepted: 10.02.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81

# References

- 1. Avanesov G.A., Polyanskiy I.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Forsh A.A., Multispectral satellite imaging system on-aboard Meteor-M No. 1: three years in orbit, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 2, pp. 74–83 (in Russian).
- 2. Baldina E. A., Bessonov R. V., Grishin V. A., Zhukov B. S., Kharkovets E. G., Suitability estimation of GSHHG coast line map for autonomous optical spacecraft navigation, *Sovremennye problemy distantsion-nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 217–228 (in Russian).
- 3. Zhukov B. S., Vasileiskiy A. S., Zhukov S. B., Ziman Ya. L., Polyanskiy I. B., Bekrenev O. V., Permitina L. I., Preprocessing of imaging data from KMSS on Meteor-M s/c, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 1, No. 5, pp. 260–266 (in Russian).
- 4. Zhukov B. S., Grishantseva L. A., Kondratieva T. V., Nikitin A. V., Permitina L. I., Polyanskiy I. V., In-flight geometric calibration of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 93–100 (in Russian).
- 5. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hygrometeorological spacecraft, *Sovremennye problemy distantsi- onnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92 (in Russian).