

Оценки погрешности бортовой радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 по данным сканера SEVIRI

Д.А. Козлов², А.А. Козлов¹, Ф.С. Завелевич², Ю.В. Киселева¹, И.А. Козлов²,
А.В. Кухарский¹, А.Н. Рублев¹, А.Б. Успенский¹, И.С. Черкашин²

¹НИЦ «Планета», Москва, 123242, Россия

E-mail: rublev@planet.iitp.ru

²ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша», Москва, 125438, Россия

ИК-зондировщик ИКФС-2, установленный на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2 (запущен 08.07.2014 г.), является одним из основных приборов для решения задач оперативной метеорологии и изменения климата. Зондировщик ИКФС-2 обеспечивает измерение интенсивности уходящего ИК излучения в диапазоне 5–15 мкм с высоким спектральным разрешением. В статье рассмотрен метод проверки радиометрической калибровки ИК-зондировщика ИКФС-2 по данным сканера SEVIRI, установленного на европейском геостационарном спутнике Meteosat-10. Выбор измерений сканера SEVIRI в качестве эталона для сравнения с данными ИКФС-2 объясняется тем, что этот прибор обладает достаточно высокой точностью и стабильностью радиометрической калибровки. По результатам сравнения с данными SEVIRI установлено, что погрешность калибровки данных ИКФС-2 для длин волн 7,3; 8,7; 9,7; 10,8 и 12,0 мкм (центры ИК-каналов SEVIRI) не превышает 0,1–0,2 К. Для 13,4 мкм яркостная температура, измеряемая SEVIRI, меньше эффективной яркостной температуры для ИКФС-2 в среднем на 1,0 К из-за смещения калибровки канала самого SEVIRI. Аналогичные результаты были получены рабочей группой GSICS (Global Space-based Inter-calibration System) Всемирной метеорологической организации при сравнении измерений SEVIRI с западноевропейским интерферометром IASI.

Ключевые слова: инфракрасный зондировщик, радиометрическая калибровка, яркостные температуры, ИКФС-2, SEVIRI, оперативная метеорология, климатология, GSICS

Одобрена к печати: 25.10.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-264-272

Введение

8 июля 2014 г. с космодрома Байконур был запущен второй российский полярно-орбитальный метеоспутник серии «Метеор-М». На его борту установлен инфракрасный зондировщик ИКФС-2 (Головин и др., 2013) – фурье-спектрометр температурного и влажностного зондирования, впервые включенный в состав бортовой целевой аппаратуры спутников серии «Метеор-М». По своей информативности и области применения ИКФС-2 близок к зарубежным гиперспектральным ИК-зондировщикам (Успенский, Рублев, 2013): IASI (западноевропейский спутник Metop) и CrIS (спутник США S-NPP).

С помощью ИКФС-2 (Головин и др., 2013) измеряются спектры уходящего ИК-излучения системы «атмосфера–подстилающая поверхность» в диапазоне 5–15 мкм ($660 \dots 2000 \text{ см}^{-1}$) со спектральным разрешением $0,4 \text{ см}^{-1}$ (без аподизации). Полоса обзора зондировщика составляет до 2500 км с пространственным разрешением в надире 35 км. Радиометрическая точность зондировщика зависит от конкретного участка спектра, например, в области 15 мкм погрешность измерений в пересчете на яркостную температуру не превышает 0,3 К, для 12 мкм – 0,5 К. С результатами наземной радиометрической калибровки ИКФС-2 можно ознакомиться в (Козлов, 2013). В период летных испытаний и последующей эксплуатации проведены работы по подтверждению заданных технических характеристик ИКФС-2.

Для оценки погрешности бортовой радиометрической калибровки ИКФС-2 проведено сопоставление измерений прибора ИКФС-2 с независимыми измерениями сканера SEVIRI (геостационарный спутник Meteosat-10). При сопоставлении проводился анализ расхождений между измерениями SEVIRI с совмещенными по времени и пространству спектрами ИКФС-2, проинтегрированными с учетом спектральных аппаратных функций SRF (Spectral Response Function) соответствующих каналов сканера. Выбор SEVIRI в качестве эталонного прибора обусловлен рекомендациями работы (Hewison et al., 2013), в которой отмечается стабильность работы сканера и высокая точность системы его бортовой калибровки.

Условия совмещения данных ИКФС-2 и SEVIRI

Пространственно-временное совмещение данных измерений двух приборов, один из которых установлен на геостационарном спутнике, а второй – на полярно-орбитальном с солнечно-синхронной орбитой (ССО), проводится в поле обзора геостационарного спутника. В (Wu et al., 2009) из геометрических соображений предложено ограничить область сопоставления пикселей границами, удаленными на $\pm 52^\circ$ по долготе и широте от подспутниковой точки геостационарного спутника. В пределах этой области для любого пикселя сканера зенитный угол наблюдения геостационара относительно местной нормали земной поверхности не превышает 60° . Следует отметить, что максимальный зенитный угол для зондировщика на ССО также не превышает 60° ($\sim 58^\circ$) для полосы обзора 2200 км). Математически данное условие выражается следующим образом:

$$\cos \varphi \times \cos(\lambda - \lambda_{GEO}) < 0,5.$$

Здесь λ, φ – долгота и широта точки наблюдения прибора, установленного на спутнике с ССО, λ_{GEO} – долгота и широта точки стояния геостационарного спутника. Для спутника Meteosat-10 имеем $\lambda_{GEO} = 0$.

Для допустимого рассогласования по времени между измерениями выбран критерий:

$$|t_{LEO} - t_{GEO}| < 300 \text{ [с]}.$$

Здесь t_{LEO} и t_{GEO} – время съемки приборов на полярно-орбитальном и геостационарном спутниках соответственно. При вычислении t_{GEO} учитывается, что сканирование прибором SEVIRI в режиме съемки полного диска Земли (Full Disc Imaging mode) проводится от Южного полюса к Северному, состоит из 3712 строк и длится 742,4 с. Периодичность формирования изображений диска – 15 минут.

Так как оптическая длина в атмосфере линии визирования наблюдаемого пикселя в первом приближении обратно пропорциональна косинусу зенитного угла относительно локальной нормали, то критерий совмещения для двух приборов по зенитному углу записывается в следующем виде:

$$\left| \frac{\cos(SZA_{GEO})}{\cos(SZA_{LEO})} - 1 \right| < h,$$

где SZA – зенитные углы приборов на спутниках с геостационарной и солнечно-синхронной орбитах, вычисляемые для каждого подспутникового пикселя; h – порог.

Допустимое пороговое значение h в этом выражении зависит от конкретного спектрального канала SEVIRI и может быть выбрано $h = 0,05$ для каналов в окне прозрачности атмосферы (например, канал 10,8 мкм), где преобладает практически изотропное излучение подстилающей поверхности, но не более $h = 0,02$ – для «поглощающих» каналов (например, канал 13,4 мкм), где собственное излучение атмосферы вносит основной вклад в уходящее ИК-излучение. В данной работе пороговое значение выбрано одинаковым $h = 0,01$ для всех спектральных каналов в соответствии с рекомендациями GSICS (EUMETSAT, 2012). Для близких к надирным измерениям это условие соответствует разности зенитных углов в 8° .

На *рис. 1* изображены маршруты съемки ИК-зондировщика ИКФС-2 КА «Метеор-М» № 2 в районе подспутниковой точки сканера SEVIRI КА Meteosat-10; красным цветом отмечены измерения ИКФС-2, удовлетворяющие условиям совмещения. Характерный вид множества совмещенных измерений в (Hewison et al., 2013) получил название «slanted hourglass».

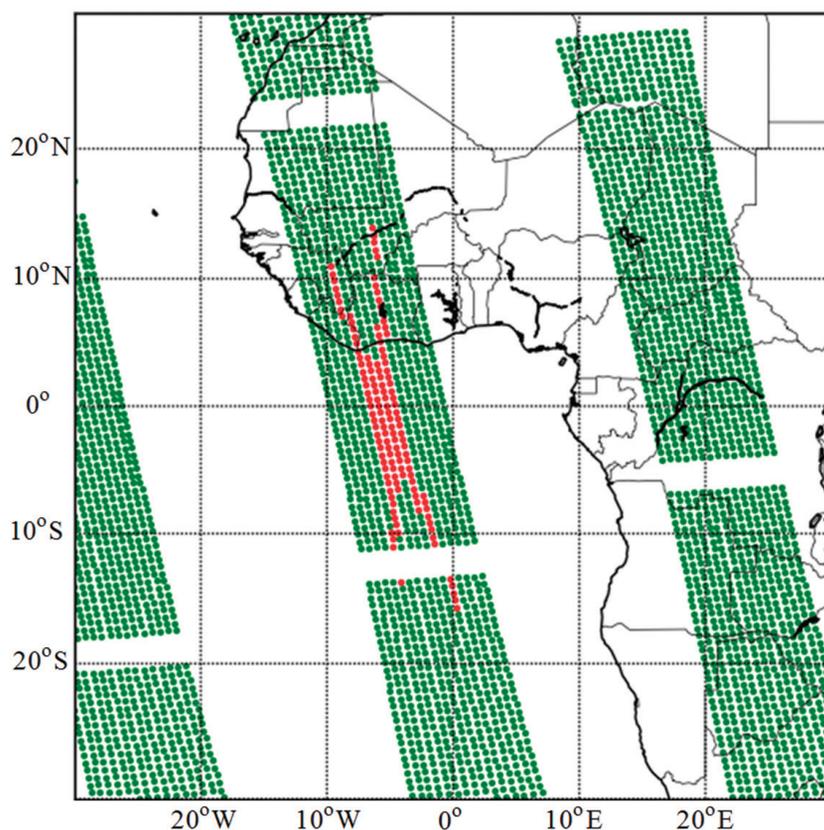


Рис. 1. Маршруты съемки ИКФС-2 в районе подспутниковой точки Meteosat-10

Вычисление эффективных яркостей и яркостных температур

В спектральном диапазоне ИКФС-2 (5–15 мкм) находится семь каналов SEVIRI. Аппаратные функции SRF каналов SEVIRI представлены на *рис. 2* вместе с примером спектра уходящего ИК-излучения. Измерения ИКФС-2, обладающие высоким спектральным разрешением, для последующего сравнения с реальными результатами измерений сворачиваются с функциями SRF ИК-каналов SEVIRI для получения эффективной яркости $L_{\text{эфф}}^i$ – моделированного аналога данных SEVIRI. Эффективная яркость для нормированных SRF_i определяется выражением:

$$L_{\text{эфф}}^i = \int L(\nu) SRF_i(\nu) d\nu,$$

где $L(\nu)$ – измеренный ИКФС-2 спектр уходящего ИК-излучения; ν – волновое число (частота), обычно выражаемое в обратных сантиметрах.

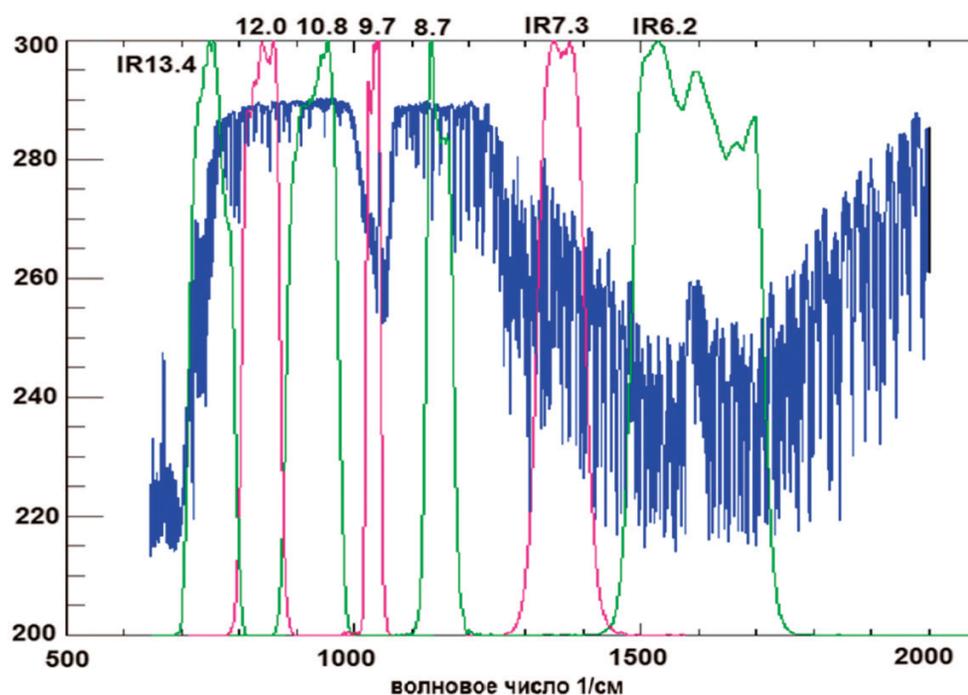


Рис. 2. График спектральных чувствительностей каналов SEVIRI (Meteosat-10) в спектральном диапазоне ИКФС-2

Поскольку линейный размер поля зрения ИКФС-2 в надире составляет ~ 30 км, а размер пикселя сканера SEVIRI примерно 3,5 км, то для адекватного сравнения данные измерений SEVIRI нужно усреднить по области 11×11 пикселей. Дополнительно по этой области вычисляется среднеквадратическое отклонение яркостей SEVIRI, которое может быть использовано как критерий равномерности (равнояркости) сцены. На *рис. 3* изображена область усреднения пикселей измерений SEVIRI с учетом поля зрения ИКФС-2.

Эффективные яркости $L_{\text{эфф}}$ ИКФС-2 пересчитывались в яркостные температуры T_b (ЯТ) по формуле Планка. В расчетах использовались калибровочные значения α и β из

таблиц и аппроксимации (EUMETSAT, 2012) для измерений SEVIRI КА Meteosat-10. С учетом калибровочных коэффициентов ЯТ определяется выражением:

$$T_b = \frac{c_2 \cdot v_c}{\alpha \cdot \ln \left[c_1 v_c^3 / L_{eff} + 1 \right]} - \frac{\beta}{\alpha},$$

где $c_1 = 2hc^2$ и $c_2 = hc/k$ – радиационные константы, а переменные c, h и k – скорость света, постоянная Планка и постоянная Больцмана соответственно.

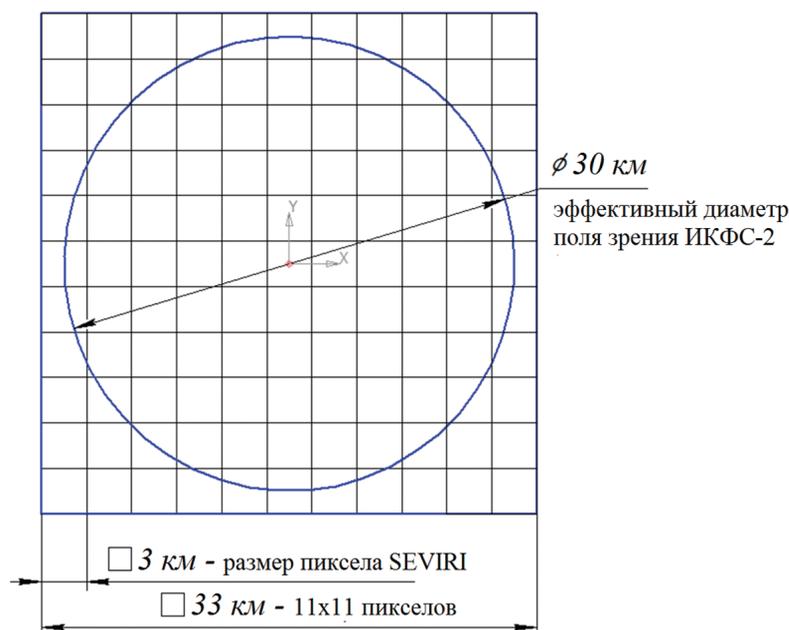


Рис. 3. Область усреднения пикселей SEVIRI с учетом поля зрения ИКФС-2

Результаты сравнительного анализа

Для сопоставления были отобраны измерения ИК-зондировщика ИКФС-2 и сканера SEVIRI (7,3; 8,7; 9,7; 10,8; 12,0; и 13,4 мкм) за период февраля–июля 2015 гг.

Сравнительный анализ измерений ИКФС-2 и SEVIRI проводился с помощью специально разработанного программного комплекса, который формирует базу данных, содержащую измерения приборов, дату, время, географические координаты точки наблюдения, зенитные углы спутников, а также рассчитывает яркости и яркостные температуры ИКФС-2 и SEVIRI для семи каналов. На рис. 4 показан интерфейс программного комплекса.

Сравнение измерений ИКФС-2 и SEVIRI проводилось при условиях, описанных выше; использовались ночные и дневные измерения приборов ИКФС-2 и SEVIRI.

Результаты сравнительного анализа измерений ИК-зондировщика ИКФС-2 и сканера SEVIRI представлены на рис. 5 в виде диаграмм рассеяния разностей яркостных температур SEVIRI (T_{bSEV}) и ИКФС-2 (T_{bIKFS}). Для спектральных диапазонов четырех каналов (8,7;

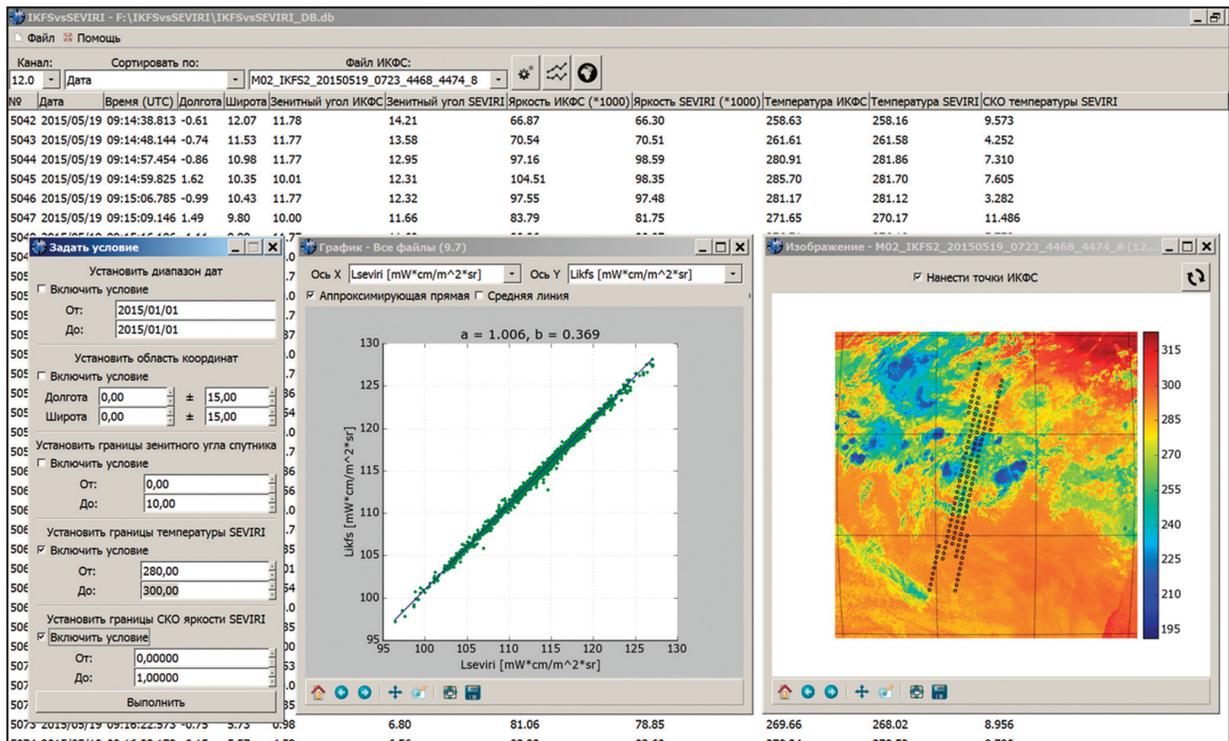


Рис. 4. Интерфейс программного комплекса

9,7; 10,8; и 12,0 мкм) среднее значение разности яркостных температур T_{bSEV} и T_{bIKFS} не превышает 0,1 К.

Для канала 13,4 мкм яркостная температура, измеряемая SEVIRI, меньше эффективной яркостной температуры для ИКФС-2 в среднем на 1,0 К. Наиболее вероятной причиной такого расхождения является смещение калибровки канала 13,4 мкм SEVIRI, т.к. оно установлено исследованиями, проводимыми в рамках GSICS (<http://gsics.tools.eumetsat.int/plotter/>) при сопоставлении измерений SEVIRI с данными европейского ИК-зондировщика IASI.

В канале 7,3 мкм средняя разность яркостных температур SEVIRI и ИКФС-2 чуть более 0,1 К. В то же время эта разность линейно зависит от яркостной температуры сцены (по данным измерений SEVIRI) и составляет +0,3 К для сцены с $T_b = 255$ К и -0,3 К при $T_b = 275$ К. Следует отметить, что требование технического задания на погрешность бортовой радиометрической калибровки ИКФС-2 составляет 0,5 К для спектрального диапазона 11–12 мкм и температур сцены 280–300 К.

Проверка работоспособности предложенного метода проводилась в (EUMETSAT, 2012) путем интеркалибровки сканера SEVIRI и европейского Фурье-спектрометра (IASI). Результаты сравнительного анализа за февраль–июль 2015 г. представлены в табл. 1. Как видно из таблицы, по точности бортовой калибровки аппаратура ИКФС-2 не уступает ИК-зондировщику IASI, обладающему хорошо отработанной бортовой калибровкой и рекомендованному GSICS к использованию в качестве эталонного прибора в спутниковых интеркалибровках.

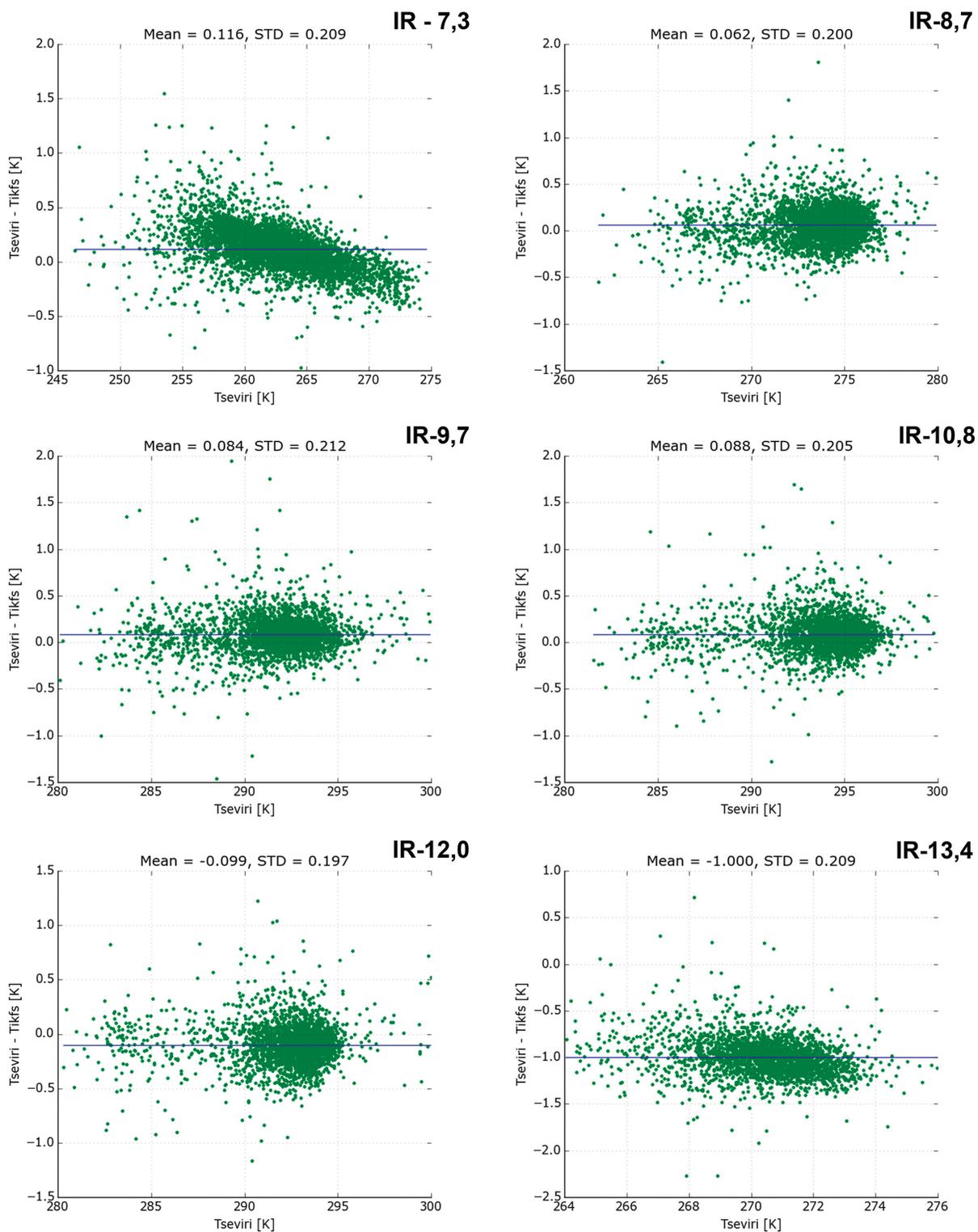


Рис. 5. Диаграммы рассеяния разностей $T_{SEVIRI} - T_{IKFS}$ в зависимости от температуры сцены

Таблица 1. Результаты интеркалибровки ИК-зондировщиков ИКФС-2 и IASI по данным SEVIRI

Канал SEVIRI	11 (IR 13,4)	10 (IR 12,0)	9 (IR 10,8)	8 (IR 9,7)	7 (IR 8,7)	6 (IR 7,3)
Спектральный диапазон, мкм (*)	12,52 - 14,18	11,37 - 12,57	10,15 - 11,45	9,50 - 9,83	8,47 - 8,96	7,04 - 7,69
Спектральный диапазон, см ⁻¹	705,2 - 798,7	795,5 - 879,5	873,4 - 985,2	1015 - 1145	1116,1 - 1180,6	1300,4 - 1420,5

Среднее смещение SEVIRI-ИКФС-2, К	-1,00	-0,099	+0,088	+0,084	+0,062	+0,116
Среднее смещение SEVIRI-IASI, К (EUMETSAT, 2012)	-1,0 ± 0,2	0 ± 0,1	0 ± 0,1	0 ± 0,1	0 ± 0,1	0 ± 0,2

* - по уровню 0,1 от максимума спектральной чувствительности

Выводы

Рассмотренный метод сопоставления данных измерений ИК-зондировщика ИКФС-2 КА «Метеор-М» № 2 и сканера SEVIRI КА Meteosat-10 позволил оценить погрешность радиометрической калибровки ИКФС-2.

Среднее значение погрешности калибровки ИКФС-2 для каналов с центральными длинами волн 13,4; 12,0; 10,8; 9,7; 8,7 и 7,3 мкм не превышает 0,1–0,2 К. В каналах 7,3 мкм и 13,4 мкм выявлена зависимость погрешности радиометрической калибровки от яркостной температуры сцены. Проведенные исследования не обнаружили временного тренда (ухода) калибровки в течение полугода, что подтверждает стабильность бортовой калибровки ИКФС-2. Исследование и коррекция зависимости при 7,3 мкм и 13,4 мкм, вызванной, по-видимому, остаточной (неустраненной) нелинейностью амплитудной характеристики фотоприемного устройства ИКФС-2, требует проведения дополнительного анализа.

Литература

1. Головин Ю.М., Завелевич Ф.С., Никулин А.Г., Козлов Д.А. Бортовые инфракрасные Фурье-спектрометры для температурно-влажностного зондирования атмосферы Земли // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 25–37.
2. Козлов Д.А. Радиометрическая калибровка бортового инфракрасного фурье-спектрометра для температурного и влажностного зондирования атмосферы Земли // Научно-технический «Оптический журнал». 2013. № 2. С. 52–58.
3. Успенский А.Б., Рублев А.Н. Современное состояние и перспективы спутникового гиперспектрального атмосферного зондирования // Исследование Земли из космоса. 2013. № 6. С. 4–15.
4. Hewison T.J., Wu X., Yu F., Tahara Y., Hu X., Kim D., Koenig M. GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI // Transactions on geoscience and remote sensing. 2013. Vol. 51. No. 3. P. 1160–1170.
5. Wu X., Hewison T., Tahara Y. GSICS GEO-LEO inter-calibration: Baseline algorithm and early results. In: Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization V: Readiness for GEOSS III, Proc. SPIE. 2009. Vol. 7456. 745604-1-745604-12.

IRFS-2 onboard radiometric calibration errors evaluation by comparison with SEVIRI/Meteosat-10 data

D.A. Kozlov², A.A. Kozlov¹, F.S. Zavelevich², Yu.V. Kiseleva¹, I.A. Kozlov²,
A.V. Kukharsky¹, A.N. Rublev¹, A.B. Uspensky¹, I.S. Cherkashin²

¹State Research Center "Planeta", Moscow 123242, Russia

E-mail: rublev@planet.iitp.ru

²SSC Keldysh Research Centre, Moscow 125438, Russia

Among payload of Meteor-M No.2 satellite (launched July 8th, 2014) the hyperspectral infrared sounder IRFS-2 is considered to be one of the key instruments for operational meteorology and climatology. The hyperspectral infrared sounder IRFS-2 provides measurements of the IR spectra in the range 5–15 μm . This paper describes the algorithm of comparison between radiances observed from IRFS-2 with SEVIRI (Meteosat-10) data. SEVIRI can be used as a reference instrument because its radiometric calibration has proven to be stable and high-accuracy. According to the comparison results, an average IRFS-2 calibration error for channels 7.3, 8.7, 9.7, 10.8, and 12.0 μm does not exceed 0.1–0.2 K. In the mean for channel 13.4 μm the brightness temperature measured by SEVIRI is less on 1K than effective temperature calculated from IASI data because of the shift in own calibration of SEVIRI. Similar findings were reported in the survey of WMO's Global Space-based Inter-Calibration System (GSICS) where the comparison of radiances measured by SEVIRI and IASI (Metop-A, -B) was performed.

Keywords: infrared sounder, radiometric calibration, brightness temperatures, IRFS-2, SEVIRI, operational meteorology, climatology, GSICS.

Accepted: 25.10.2016

DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-264-272

References

1. Golovin Yu.M., Zavelevich F.S., Nikulin A.G., Kozlov D.A., Bortovye infrakrasnye Fur'e-spektrometry dlya temperaturno-vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli (Airborne Infrared Fourier Spectrometer for the Temperature and Humidity Sensing the Earth's Atmosphere), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 6, pp. 25–37.
2. Kozlov D.A., Radiometricheskaya kalibrovka bortovogo infrakrasnogo fur'e-spektrometra dlya temperaturnogo i vlazhnostnogo zondirovaniya atmosfery Zemli (Radiometric calibration onboard Infrared Fourier Spectrometer for the Temperature and Humidity Sensing the Earth's Atmosphere), *Nauchno-tehnicheskii Opticheskii zhurnal*, 2013, No. 2, pp. 52–58.
3. Uspenskii A.B., Rublev A.N., Sovremennoe sostoyanie i perspektivy sputnikovogo giperspektral'nogo atmosfer-nogo zondirovaniya (Current state and prospects of satellite hyper spectral atmospheric sounding), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 6, pp. 4–15.
4. Hewison T.J., Wu X., Yu F., Tahara Y., Hu X., Kim D., Koenig M., GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI, *Transactions on geoscience and remote sensing*, 2013, Vol. 51, No. 3, pp. 1160–1170.
5. Wu X., Hewison T., Tahara Y., GSICS GEO-LEO inter-calibration: Baseline algorithm and early results. In: *Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization V: Readiness for GEOSS III*, Proc. SPIE, 2009, 7456, 745604-1-745604-12.