

## Оценка стабильности радиометрической калибровки коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» № 2

А. А. Филей<sup>1</sup>, А. Н. Рублев<sup>2</sup>, Ю. В. Киселева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Дальневосточный центр «НИЦ «Планета», Хабаровск, 680000, Россия  
E-mail: vmer@dvrspod.ru*

<sup>2</sup> *«НИЦ «Планета», Москва, 123242, Россия  
E-mail: rublev@planet.iitp.ru*

В настоящей работе оценивается стабильность радиометрической калибровки трёх коротковолновых каналов сканера космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2 — многоканального спутникового устройства (МСУ-МР). С этой целью с декабря 2014 по май 2018 г. проводилось сопоставление коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы коротковолновых каналов МСУ-МР и его аналога AVHRR — сканера КА Meteor-A. Выбор AVHRR в качестве эталонного прибора был обусловлен тем, что его измерения постоянно корректируются и имеют схожие с МСУ-МР спектральные характеристики. Сопоставление КСЯ проводилось над участками земной поверхности с высокой отражательной способностью в безоблачных условиях. Измерения выбирались таким образом, чтобы разница по времени между съёмками обоих спутниковых приборов не превышала 20 мин, зенитные углы Солнца (SZA) и наблюдения (VZA) отличались не более чем на 5°. При сопоставлении КСЯ также были учтены имеющиеся различия в функциях спектральной чувствительности коротковолновых каналов обоих приборов. В результате проведённого исследования удалось рассчитать смещение калибровки трёх коротковолновых каналов прибора МСУ-МР за рассматриваемый период, которое составило 23, 32 и 17 %. При этом скорость увеличения временного тренда калибровки составила примерно 7,3, 9,8 и 5,1 % в год для каждого канала соответственно.

**Ключевые слова:** МСУ-МР, AVHRR, радиометрическая калибровка, коэффициент спектральной яркости

Одобрена к печати: 08.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-71-77

### Введение

Важность проверки стабильности калибровки каналов любого спутникового прибора состоит в том, что от точности калибровки зависит достоверность получаемых информационных продуктов. Изначально калибровка проводится перед запуском космического аппарата, однако во время запуска или длительного пребывания на орбите могут происходить изменения в настройках аппаратуры или деградация чувствительности фотоприёмника, влияющие на качество измерения (Zhou et al., 2015). В связи с этим необходимо периодически проводить проверку стабильности характеристик радиометрических каналов. Одним из основных способов такой проверки является сопоставление КСЯ на верхней границе атмосферы эталонного и поверяемого приборов, полученных примерно при одинаковых условиях измерений.

В настоящей работе оценивается стабильность калибровки коротковолновых каналов прибора МСУ-МР космического аппарата (КА) «Метеор-М» № 2 за последние три года пребывания на орбите. С этой целью проводилось сопоставление КСЯ коротковолновых каналов приборов МСУ-МР и AVHRR и рассчитывались коэффициенты пропорциональности (калибровочные коэффициенты), показывающие, как отличаются значения КСЯ прибора МСУ-МР от значений эталонного прибора. Прибор AVHRR, установленный на КА Meteor-A, был выбран в качестве эталонного ввиду того, что его измерения постоянно корректируются (<http://www.ospo.noaa.gov/Products/ppp/notices.html>) и имеют схожие с МСУ-МР спектральные характеристики. Сопоставление КСЯ проводилось над участками земной поверхности с высокой отражательной способностью в условиях безоблачной погоды.

## Моделирование КСЯ в каналах МСУ-МР и AVHRR

Сканер МСУ-МР установлен на борту полярно-орбитального российского КА «Метеор-М» № 2, запущенного 8 июля 2014 г. Данные МСУ-МР используются при решении следующих задач: анализ и прогноз погоды в региональном и глобальном масштабах, мониторинг изменчивости климата, анализ и прогноз состояния акваторий морей и океанов, мониторинг состояния лесов и т.д. (Асмус и др., 2014). Прибор осуществляет многоспектральную съёмку Земли в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн с пространственным разрешением 1 км.

Как уже указывалось выше, в качестве эталонного был выбран сканер AVHRR КА Метор-А. Основные параметры коротковолновых каналов двух приборов представлены в *табл. 1* (<https://www.wmo-sat.info/oscar/instruments/view/326>, <https://www.wmo-sat.info/oscar/satellites/view/307>).

Таблица 1. Параметры спектральных каналов МСУ-МР и AVHRR

Характеристика	МСУ-МР	AVHRR
Спектральные диапазоны (мкм)	0,54–0,72 0,70–1,0 1,62–1,78	0,58–0,68 0,73–1,0 1,57–1,63
Разрешение (км)	1	1,09
Полоса обзора (км)	2900	2950

Для коротковолновых каналов МСУ-МР конструктивно предусмотрена система внутренней калибровки, которая состоит из блоков радиометрической калибровки (по одному блоку на каждый канал) в виде эталонного стабилизированного источника излучения (лампа накаливания) (Акимов и др., 2015). Задачей блока калибровки коротковолновых каналов является формирование эталонных потоков излучения определённого спектрального состава и заданной интенсивности с целью коррекции деградации светочувствительного слоя приёмника излучения.

На *рис. 1* представлены функции спектральной чувствительности (ФСЧ) коротковолновых каналов двух приборов. Можно заметить имеющиеся различия значений чувствительности, ширины и положения спектральных линий каналов обоих спутниковых приборов.

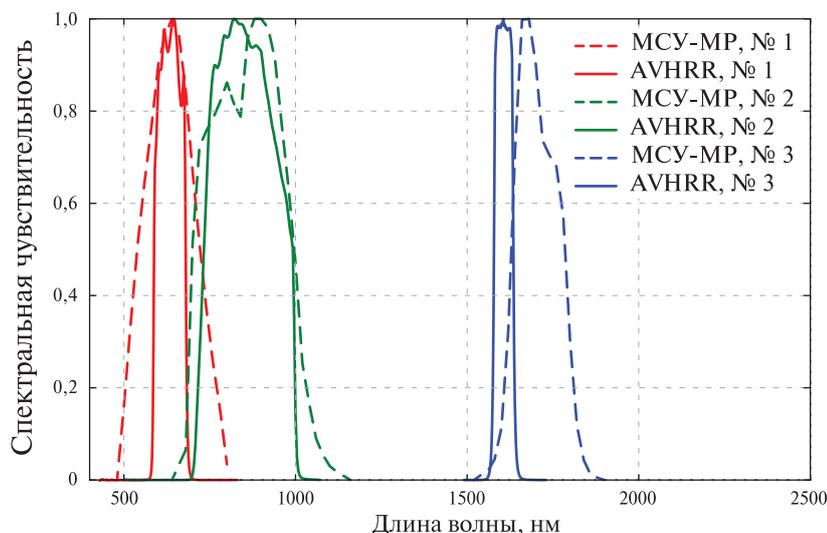


Рис. 1. Функции спектральной чувствительности коротковолновых каналов приборов МСУ-МР и AVHRR

Чтобы компенсировать эти различия, были рассчитаны коэффициенты коррекции спектральных функций (spectral band adjustment factors, SBAF). Расчёт SBAF производился при помощи моделирования значений КСЯ на верхней границе атмосферы в каналах обоих спутниковых приборов при различных углах наблюдения и Солнца, а также при различном содержании водяного пара. Моделирование отражённого от земной поверхности солнечного излучения в каналах приборов МСУ-МР и AVHRR с последующим расчётом коэффициентов SBAF осуществлялось с помощью быстрой радиационной модели (RTM) на основе программного кода DISORT (Discrete Ordinates Radiative Transfer) (Buras et al., 2011), входящего в состав библиотеки libRadtran ([www.libradtran.org](http://www.libradtran.org)) (Mayer et al., 2017).

Уравнение регрессии для пересчёта КСЯ коротковолновых каналов имеет следующий вид:

$$A_{AVHRR} = SBAF_N \cdot A_{МСУ-МР}, \quad (1)$$

где  $A_{AVHRR}$  — КСЯ прибора AVHRR;  $A_{МСУ-МР}$  — КСЯ прибора МСУ-МР;  $N$  — номер канала.

При моделировании КСЯ необходимо учитывать поглощение коротковолнового излучения (включая континуальное) атмосферным водяным паром (Smith et al., 2004), оказывающим наибольшее влияние на прохождение солнечного излучения в атмосфере в коротковолновом диапазоне длин волн (McClatchey et al., 1972). Для этого моделирование отражённого от земной поверхности солнечного излучения в каналах приборов МСУ-МР и AVHRR было проведено для различных вариаций водяного пара. Учёт поглощения солнечного излучения водяным паром проводился с использованием параметризации REPTRAN (Gasteiger et al., 2014), которая является частью библиотеки libRadtran. Выбор данной параметризации обусловлен тем, что она даёт более точные и быстрые результаты моделирования КСЯ на верхней границе атмосферы, чем, например, известная параметризация LOWTRAN (Gasteiger et al., 2014). В *табл. 2* представлены коэффициенты SBAF для каждой пары сравниваемых каналов при различном содержании водяного пара в атмосфере.

*Таблица 2.* Коэффициенты SBAF для каждой пары сравниваемых каналов при различном общем содержании водяного пара в атмосфере

Общее содержание водяного пара, мм	SBAF <sub>1</sub>	SBAF <sub>2</sub>	SBAF <sub>3</sub>
5,00	0,968	1,006	1,051
10,0	0,974	1,006	1,086
15,0	0,976	1,006	1,114
20,0	0,979	1,005	1,138
25,0	0,981	1,005	1,160
30,0	0,983	1,005	1,181
35,0	0,985	1,005	1,201

Можно заметить, что для третьего канала МСУ-МР содержание водяного пара существенно влияет на SBAF. В связи с этим при сравнениях КСЯ третьих каналов обоих приборов для оценки SBAF нужно знать количество водяного пара в атмосфере на момент измерений.

### Оценка стабильности калибровки

Оценка стабильности калибровки проводилась по данным измерений спутниковых приборов над специальными тестовыми полигонами в рамках проекта CEOS (The Committee on Earth Observation Satellites, [https://calval.cr.usgs.gov/rst-resources/sites\\_catalog/radiometric-sites/test-site-gallery/](https://calval.cr.usgs.gov/rst-resources/sites_catalog/radiometric-sites/test-site-gallery/)). Полигоны CEOS представляют собой однородные участки земной поверхности (пустыни, горные плато и т. п.), обладающие высокой отражательной способностью в видимой области спектра. Содержание водяного пара в атмосфере для вычисления SBAF

для третьего канала оценивалось по данным радиометра MODIS (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>).

Оценка стабильности калибровки каналов МСУ-МР проводилась с декабря 2014 по май 2018 г. Измерения МСУ-МР и AVHRR выбирались таким образом, чтобы разница как между SZA, так и VZA лежала в пределах 5 град, при этом разница по времени между съёмками обоих спутниковых приборов не превышала 20 мин.

Измерения КСЯ в каналах прибора AVHRR были получены с сайта NOAA (<https://www.bou.class.noaa.gov/saa/products/welcome>). Информация с прибора МСУ-МР поступает в оперативном режиме через оператора бортовых измерительных комплексов (БИК) (НИЦ «Планета») и представлена в виде значений интенсивности излучения, на основании которых происходит вычисление КСЯ по следующей формуле:

$$A = \frac{\pi R d^2}{F_0 \cdot \cos(SZA)}, \quad (2)$$

где  $A$  — КСЯ;  $R$  — интенсивность излучения, Вт/(м<sup>2</sup>×ср);  $F_0$  — эффективный (с учётом ФСЧ) интегральный поток солнечного излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $d$  — среднее расстояние от Земли до Солнца в астрономических единицах.

При расчёте эффективного интегрального потока солнечного излучения  $F_0$  (табл. 3) для каждого канала прибора МСУ-МР была использована информация о солнечном спектре ASTM G-173-03 (<http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/astmg173/astmg173.html>).

Таблица 3. Эффективный интегральный поток солнечного излучения каналов прибора МСУ-МР

Канал	1	2	3
Эффективный интегральный поток солнечного излучения, Вт/м <sup>2</sup>	294,356	275,612	29,875

При сопоставлении КСЯ тестовых полигонов по данным спутниковых приборов выбирались даты, когда происходило пересечение орбит двух КА, при этом рассматривалось не менее пяти тестовых полигонов для каждой даты. По результатам измерений над каждым полигоном строилась регрессия в виде прямо пропорциональной зависимости для сравниваемых пар каналов. Коэффициенты пропорциональности  $k_N$  рассчитывались по следующей формуле:

$$k_N = \frac{A_{AVHRR}}{SBAF_N \cdot A_{МСУ-МР}}. \quad (3)$$

В табл. 4 (см. с. 75) представлены средневзвешенные коэффициенты пропорциональности между тремя парами каналов приборов МСУ-МР и AVHRR для каждой выбранной даты.

Изменение коэффициентов пропорциональности каналов МСУ-МР и AVHRR надо учитывать при совместном использовании приборов, например, для построения карт различных индексов (влажности почвы, NDVI и др.), характеризующих состояние подстилающей поверхности. Учёт изменчивости позволяет добиться однородности получаемых изображений. На рис. 2 (см. с. 75) представлен ход изменчивости калибровочных коэффициентов (в процентах) для каналов прибора МСУ-МР за период с декабря 2014 по май 2018 г.

При построении кривых хода изменчивости калибровочных коэффициентов на рис. 2 за точку отсчёта был выбран декабрь 2014 г., когда данные с МСУ-МР начали стабильно поступать в «НИЦ «Планета» в оперативном режиме.

Анализируя табл. 4 и рис. 2, можно заметить, что начиная с конца 2016 г. происходит резкое снижение точности калибровки в каналах прибора МСУ-МР. Это никак не связано со снижением точности калибровки трёх коротковолновых каналов прибора AVHRR, которая, согласно данным (Askermann, 2017), стабильна и равна снижению приблизительно на 0,6, 1,12 и 0,75 в год для каждого канала соответственно. Таким образом, процент снижения точности калибровки трёх коротковолновых каналов прибора МСУ-МР за период с декабря 2014

по май 2018 г. составил примерно 23, 32 и 17 % соответственно. При этом скорость увеличения временного тренда калибровки составила примерно 7,3, 9,8 и 5,1 % в год для каждого канала соответственно.

Таблица 4. Коэффициенты пропорциональности между тремя парами каналов приборов МСУ-МР и AVHRR

Дата (год. месяц)	Канал № 1		Канал № 2		Канал № 3		Кол-во сравниваемых пар КСЯ
	$k_1$	St.dev	$k_2$	St.dev	$k_3$	St.dev	
2014.12	1,049	0,012	1,088	0,012	1,063	0,022	10960
2015.04	1,065	0,014	1,090	0,010	1,072	0,011	9289
2015.07	1,052	0,031	1,107	0,017	1,068	0,016	40004
2015.11	1,098	0,032	1,148	0,023	1,121	0,015	12932
2016.03	1,093	0,026	1,134	0,018	1,108	0,029	23836
2016.07	1,077	0,011	1,140	0,007	1,083	0,011	30920
2016.10	1,111	0,021	1,172	0,008	1,088	0,017	14828
2017.02	1,153	0,043	1,248	0,023	1,171	0,022	21352
2017.07	1,149	0,036	1,252	0,022	1,127	0,026	14552
2017.10	1,205	0,027	1,314	0,037	1,187	0,032	24968
2018.02	1,288	0,014	1,384	0,021	1,210	0,027	17856
2018.05	1,297	0,012	1,438	0,013	1,239	0,019	16848

St.dev — стандартное отклонение

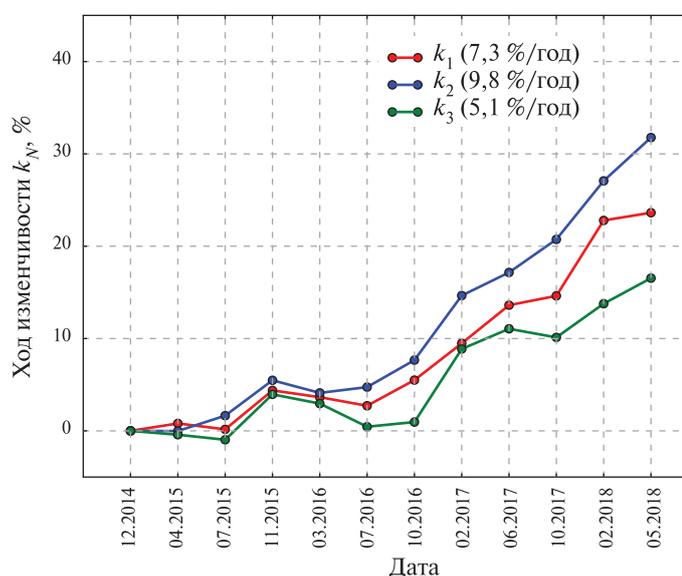


Рис. 2. Ход изменчивости (в процентах) калибровочных коэффициентов каналов прибора МСУ-МР с декабря 2014 по май 2018 г.

### Заключение

В ходе проведённой работы удалось оценить стабильность калибровки трёх коротковолновых каналов прибора МСУ-МР КА «Метеор-М» № 2 за период с декабря 2014 по май 2018 г. Итоги работы привели к не совсем ожидаемым результатам: за три с небольшим года пребывания на орбите процент снижения точности калибровки трёх коротковолновых каналов

МСУ-МР составил 23, 32 и 17 % соответственно. При этом сильнее всего снижению точности калибровки подвергся второй канал на длине волны 0,86 мкм. Периодическая проверка стабильности калибровки каналов МСУ-МР позволит скорректировать измеренные КСЯ для их правильного использования при построении тематических продуктов, а также оценить дальнейшую степень деградации съёмочной аппаратуры МСУ-МР.

## Литература

1. *Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжиков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г.* Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 4. С. 30–39.
2. *Асмус В. В., Загребяев Л. А., Макриденко О. Е., Милехин О. Е., Соловьев В. И., Успенский А. Б., Фролов А. В., Хайлов М. Н.* Система полярно-орбитальных метеорологических спутников серии «Метеор-М» // Метеорология и гидрология. 2014. № 12. С. 5–16.
3. *Ackermann J.* AVHRR/3 operational calibration / Workshop on Radiometric Calibration for European Optical Missions. 2017. 25 p.
4. *Buras R., Dowling T., Emde C.* New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2011. V. 112(12). P. 2028–2034. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.03.019.
5. *Gasteiger J., Emde C., Mayer B., Buras R., Buehler S., Lemke O.* Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2014. V. 148. P. 99–115. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.06.024.
6. *Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B.* LibRadtran user's guide. Edition for libRadtran version 2.0.2. 2017. 155 p.
7. *McClatchey R. A., Fenn R. W., Volz F. E., Selby J. E. A., Garing J. S.* Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition) // AFCRL Environmental Research Paper. 1972. No. 411. 108 p.
8. *Smith K. M., Ptashnik I., Newnham D. A., Shine K. P.* Absorption by water vapour in the 1 to 2 um region // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2004. V. 83(3). P. 735–749. DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00119-5.
9. *Zhou G., Li G., Yue T., Jiang L., Liu N., Sun Y., Li M.* An overview of in-orbit radiometric calibration of typical satellite sensors // Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2015. V. XL-7/W4. P. 235–240.

## Estimation of the stability of radiometric calibration of Multi-Channel Scanning Unit shortwave channels on board Meteor-M No. 2

A. A. Filei<sup>1</sup>, A. N. Rublev<sup>2</sup>, Yu. V. Kiseleva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Far-Eastern Center of State Research Center of Space Hydrometeorology “Planeta”, Khabarovsk 680000 Russia  
E-mail: vmer@dvrpod.ru

<sup>2</sup> State Research Center “Planeta”, Moscow 123242, Russia  
E-mail: rublev@planet.iitp.ru

In this paper, we have estimated the stability of radiometric calibration of Multi-Channel Scanning Unit (MSU-MR) shortwave channels on-board Meteor-M No. 2 from December 2014 to May 2018. We compared the top of atmosphere (TOA) reflectance of MSU-MR and Metop-A AVHRR channels. The AVHRR measurements were selected as a reference, because they are continually updated and are similar to MSU-MR spectral characteristics. The comparison of TOA reflectance was carried out over

the regions of the Earth's surface with high reflectivity in stable atmospheric conditions. The measurements of both satellites were chosen in such a way that the time difference between them did not exceed 20 minutes; the solar zenith angle (SZA) and view zenith angle (VZA) differed by 5 degrees or less. The differences in the spectral sensitivity functions of the shortwave channels of both instruments were taken into account when comparing TOA reflectances. As a result, we calculated the percentage of sensitivity loss for three MSU-MR shortwave channels for the period under review, that amounted to 23, 32 and 17 %. The rate of sensitivity loss was about 7.3, 9.8 and 5.1 % per year for each channel, respectively.

**Keywords:** MSU-MR, AVHRR, radiometric calibration, TOA reflectance

Accepted: 08.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-71-77

## References

1. Akimov N. P., Badaev K. V., Gektin Yu. M., Ryzhakov A. V., Smeljansky M. B., Frolov A. G., *Mnogozonal'noe skaniruyushchee ustroystvo malogo razresheniya MSU-MR dlya kosmicheskogo informatsionnogo kompleksa "Meteor-M". Printsip raboty, evolyutsiya, perspektivy (Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based informational system Meteor-M. The principle of operation and development prospects)*, *Rocket-Space Device Engineering and Information System*, 2015, Vol. 2, No. 4, pp. 30–39.
2. Asmus V. V., Zagrebaev L. A., Makridenko O. E., Milekhin O. E., Solovyev V. I., Uspensky A. B., Frolov A. V., Khaylov M. N., *Sistema polyarno-orbital'nykh meteorologicheskikh sputnikov serii "Meteor-M" (The system of polar-orbiting meteorological satellites of the Meteor-M series)*, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2014, No. 12, pp. 5–16.
3. Ackermann J., AVHRR/3 operational calibration, *Workshop on Radiometric Calibration for European Optical Missions*, 2017, 25 p.
4. Buras R., Dowling T., Emde C., New secondary-scattering correction in DISORT with increased efficiency for forward scattering, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, Vol. 112(12), pp. 2028–2034, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.03.019.
5. Gasteiger J., Emde C., Mayer B., Buras R., Buehler S., Lemke O., Representative wavelengths absorption parameterization applied to satellite channels and spectral bands, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, Vol. 148, pp. 99–115, DOI: 10.1016/j.jqsrt.2014.06.024.
6. Mayer B., Kylling A., Emde C., Buras R., Hamann U., Gasteiger J., Richter B., *LibRadtran user's guide*, Edition for libRadtran version 2.0.2, 2017, 155 p.
7. McClatchey R. A., Fenn R. W., Volz F. E., Selby J. E. A., Garing J. S., *Optical Properties of the Atmosphere (Third Edition)*, *AFCRL Environmental Research Paper*, 1972, No. 411, 108 p.
8. Smith K. M., Ptashnik I., Newnham D. A., Shine K. P., Absorption by water vapour in the 1 to 2 um region, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2004, Vol. 83(3), pp. 735–749, DOI: 10.1016/S0022-4073(03)00119-5.
9. Zhou G., Li G., Yue T., Jiang L., Liu N., Sun Y., Li M., An overview of in-orbit radiometric calibration of typical satellite sensors, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, Vol. XL-7/W4, pp. 235–240.