РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2021, том 8, выпуск 4, c. 23-30

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ, ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ. ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.855, 528.835 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.23.30

# Методика замещающей калибровки данных группировки KA «Канопус-В» на основе длительного наблюдения полигонов RadCalNet

A. C. Стремов, nova@ntsomz.ru

AO «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. И. Васильев, к. ф.-м. н, nova@ntsomz.ru

AO «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

 $\mathbf{B}.\ \mathbf{\Pi}.\ \mathbf{K}$ оваленко, к. т. н., доиент, nova@ntsomz.ru

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается методика замещающей калибровки данных сенсора МСС группировки космических аппаратов (КА) «Канопус-В» на основе наблюдения полигонов RadCalNet за период 2018–2020 гг. Методика включает этап обработки наземных измерений RadCalNet за рассматриваемый период, с целью аналитической аппроксимации временного ряда в обеспечение его непрерывности при сопоставлении со съемками МСС группировки КА «Канопус-В». Вторым этапом выполнялась оценка мультипликативной и аддитивной поправки параметров абсолютной калибровки для каждого из сенсоров группировки на основе массива наблюдений МСС и измерений RadCalNet. На третьем этапе выполнялась оценка сопоставимости измерений радиометром МСС группировки КА «Канопус-В» на основе результатов съемки природных калибровочных полигонов. Полученные результаты демонстрируют существенное улучшение сопоставимости измерений радиометром МСС внутри группировки: разброс систематической ошибки измерений удалось сократить более чем в 2–3 раза в зависимости от спектрального канала.

**Ключевые слова:** космический аппарат, «Канопус-В», МСС, замещающая калибровка, наземные радиометрические полигоны, RadCalNet

## Method of Vicarious Calibration of the Kanopus-V Satellite Constellation Data Based on Long-Term Observation of RadCalNet Polygons

A.S. Stremov, nova@ntsomz.ru

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**A.I. Vasilyev**, Cand. Sci. (Phys.-Math.), nova@ntsomz.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V.P. Kovalenko, Cand. Sci. (Engineering), Assoc. Prof., nova@ntsomz.ru Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

**Abstract.** The article discusses a method of vicarious data calibration of the MSS sensor of the Kanopus-V spacecraft based on the observation of RadCalNet polygons in the 2018–2020 period. The technique includes the stage of processing ground-based RadCalNet measurements for the period, with the aim of analytical approximation of the time series to ensure its continuity when compared with the MSS imagery of the Kanopus-V spacecraft constellation. The second stage evaluates the multiplicative and additive correction of the absolute calibration parameters for each of the constellation sensors based on the array of MSS observations and RadCalNet measurements. At the third stage, the assessment of the comparability of measurements by the MSS radiometer of the Kanopus-V spacecraft constellation is carried out on the basis of the results of surveying of natural calibration sites. The results obtained demonstrate a significant improvement in the comparability of measurements with the MSS radiometer within the constellation: the spread of the systematic measurement error was reduced by more than 2–3 times (depending on the spectral channel).

Keywords: spacecraft, Kanopus-V, MSS, vicarious calibration, ground-based radiometric ranges, RadCalNet

### Введение

Одним из ключевых требований для проведения спектрометрических измерений по данным ДЗЗ, включая формирование информационных продуктов, в том числе базовых [1, 2], является обеспечение требуемой точности абсолютной радиометрической калибровки сенсоров космических систем (КС) ДЗЗ. Для решения этой задачи КС ДЗЗ, как правило, оснащены калибровочными блоками, включающими в себя различные инструменты, такие как калибровочные лампы (например, Landsat 7, Landsat 8, Канопус-В), оптико-волоконные системы передачи солнечного излучения (например, SPOT 4), солнечные диффузоры (например, Landsat 8, Sentinel 2) и др.

Применительно к российским КС ДЗЗ контроль точности абсолютной радиометрической калибровки сенсоров КС ДЗЗ осуществляется также по результатам замещающей калибровки путем съемки радиометрического калибровочного полигона на плато Шатджатмаз с одновременными подспутниковыми измерениями коэффициентов спектральной яркости подстилающей поверхности в рамках системы валидационных подспутниковых наблюдений (СВПН) [3]. При этом дополнительно используются методы контроля характеристик абсолютной радиометрической калибровки оптико-электронных сенсоров российских КС ДЗЗ на основе кросс-калибровки по различным сенсорам, выбранным в качестве опорного эталона [4-6].

Далее в статье обосновывается необходимость использования полигонов RadCalNet в обеспечение замещающей калибровки, приведены результаты наблюдения полигонов в период 2018–2020 гг. с использованием группировки КА «Канопус-В». Рассматривается алгоритм аппроксимации наблюдений RadCalNet, результаты замещающей калибровки для наблюдений полигонов с использованием группировки КА «Канопус-В», а также оценка рассчитанных коэффициентов на основе наблюдения псевдоинвариантных калибровочных полигонов. В заключении сделаны выводы о целесообразности использования полигонов RadCalNet для контроля параметров абсолютной

радиометрической калибровки группировки российских КА ДЗЗ.

# Использование данных полигонов RadCalNet в обеспечение замещающей калибровки

Под замещающей калибровкой (vicarious calibration) понимается совместная съемка тестового полигона с подспутниковыми измерениями с использованием спектрометра и метеорологического оборудования [7]. Затем с помощью уравнения переноса излучения и измеренных на момент съемки параметров атмосферы рассчитывается значение спектральной плотности энергетической яркости на верхней границе атмосферы (СПЭЯ на ВГА), которое сравнивается с данными, полученными непосредственно съемочной аппаратурой КА ДЗЗ. Рассчитанные таким образом отношения предсказанного и измеренного значения СПЭЯ на ВГА [8] являются поправочными коэффициентами абсолютной радиометрической калибровки. Основная сложность замещающей калибровки — это высокая зависимость от погодных условий, а также необходимость организации экспедиций для одновременных подспутниковых измерений, что делает данный вид калибровки дорогостоящей и трудоемкой задачей.

По инициативе международной рабочей группы CEOS по калибровке и валидации с 2017 г. ведутся работы по созданию сети RadCalNet [9], предназначенной для передачи измеренных на специальных природных полигонах значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в целях проведения калибровки и валидации оптико-электронных съемочных систем космического базирования. В настоящее время (2021 г.) RadCalNet включает пять калибровочных полигонов, имеющих автоматические станции для измерения спектральных характеристик подстилающей поверхности и параметров атмосферы. Таким образом, плановая съемка территории калибровочных полигонов RadCalNet, позволяет проводить замещающую калибровку сенсоров КС ДЗЗ, в том числе не оснащенных бортовыми инструментами уточнения абсолютной радиометрической калибровки.

# Результаты длительного наблюдения полигонов RadCalNet средствами KK «Канопус-В»

Для решения задачи замещающей калибровки космического комплекса (КК) «Канопус-В» в пери-

од с 11.2018 по 12.2020 гг. было проведено более 280 съемок территории полигонов RadCalNet. Распределение съемок по полигонам показано на рис. 1. Для областей, показанных на рис. 2, были рассчитаны средние значения КСЯ на ВГА и сформированы временные ряды для каждого КА «Канопус-В».

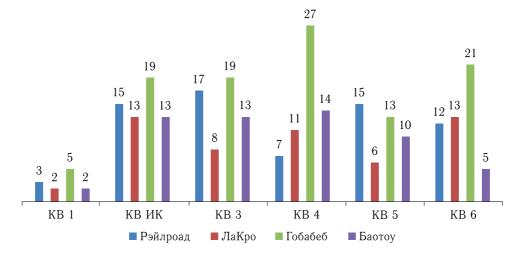


Рис. 1. Распределение съемок КК «Канопус-В» (КВ) по полигонам RadCalNet

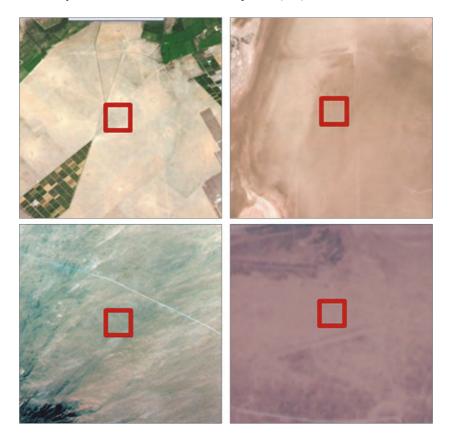


Рис. 2. Области полигонов RadCalNet для расчета средних значений КСЯ на ВГА по данным КК «Канопус-В» (слева направо и сверху вниз: ЛаКро, Рэйлроад, Гобабеб, Баотоу)

Пространственное разрешение МСС КК «Канопус-В», составляющее  $12\,$  м, позволяет использовать четыре из пяти действующих природных калибровочных полигонов RadCalNet — ЛаКро, Рэйлроад, Гобабеб и пески Баотоу. Для полигона Баотоу с набором искусственных калибровочных целей площадью  $48\,$  м $^2\,$  данного пространственного разрешения недостаточно.

Данные RadCalNet содержат информацию о спектрах КСЯ подстилающей поверхности заданного полигона, полученных в диапазоне с 9:00 до 15:00 с интервалом 30 мин по местному времени полигона. Измеренные спектры представляют собой значения КСЯ на ВГА в диапазоне от 400 нм до 2500 нм со спектральным разрешением 10 нм.

Для расчета значений КСЯ на ВГА временных рядов измерений RadCalNet с учетом функций спектральной чувствительности (ФСЧ) синего (0,46-0,52~мкм), зеленого (0,51-0,6~мкм), красного (0,63-0,69~мкм), ближнего инфракрасного (0,75-0,84) каналов МСС КК «Канопус-В» применялась формула:

$$\rho^{RCN}(\Delta \lambda_k) = \frac{\int_{\Delta \lambda_k} \rho^{RCN}(\lambda) \cdot RSR_k(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\Delta \lambda_k} RSR_k(\lambda) \cdot d\lambda}, \quad (1)$$

где  $\Delta \lambda_k$  — спектральный диапазон калибруемого канала k сенсора ДЗЗ,

 $\rho^{RCN}(\Delta\lambda_k)$  — КСЯ на ВГА для спектрального диапазона  $\Delta\lambda_k;$ 

 $RSR_k(\lambda) - \Phi$ СЧ калибруемого канала сенсора МСС КК «Канопус-В»;

 $ho^{RCN}(\lambda)$  — КСЯ на ВГА по данным RadCalNet. Усредненные значения КСЯ на ВГА, по данным RadCalNet, вычисленные с учетом ФСЧ МСС КК «Канопус-В», показаны на рис. 3.

## Аппроксимация наблюдений RadCalNet

Учитывая сезонную изменчивость значений КСЯ на ВГА, характерную для полигонов RadCalNet, периодические интервальные пропуски наблюдений (до 4 месяцев на полигоне Баотоу), разброс наблюдений измерений КСЯ для отдельных локальных временных периодов (вызванную,

в частности, атмосферными/погодными условиями) обусловливает необходимость в построении аппроксимационной модели наблюдений. Данная модель в том числе необходима для приведения наблюдений полигонов RadCalNet к временным условиям съемки с КА (путем аппроксимации и/или интерполяции временного ряда).

Алгоритм аппроксимации наблюдений RadCalNet включает следующие основные этапы:

1) для массива наблюдений (заданного спектрального канала) выполняется дискретное преобразование Фурье

$$\{Y_i, \omega_i\} = \mathbf{F}\left(\{X_i, t_i\}\right); \tag{2}$$

2) определение функции аналитической аппроксимации (на основе обратного преобразования Фурье) путем выбора несущих частот для заданного порога  $[\omega_k]$ 

$$f_k(t) = \widehat{\boldsymbol{F}}\left(\{Y_j, \omega_j\} \mid \omega_j < [\omega_k]\right); \qquad (3)$$

 оценка допустимости аналитической аппроксимации осуществляется на основе соотношения

$$\frac{\|\{X_i, t_i\}, |f_k(t_i) - X_i| < \varepsilon\|}{\|\{X_i, t_i\}\|} > \theta, \tag{4}$$

|| || — оператор мощности множества,

 $\varepsilon$  — локальный порог допуска для наблюдений, удовлетворяющих аппроксимирующей модели (является параметром алгоритма);

 $\theta$  — интегральный порог допуска согласованности аппроксимирующей модели имеющимся наблюдениям (является параметром алгоритма);

4) если критерий допустимости аппроксимации не выполнен, то корректируется  $[\omega_k]$  и осуществляется переход к этапу 2, иначе выход.

В рамках обработки данных в качестве локального порога отклонения результатов наземных измерений использовался порог не более 5–10% (например, предельные точности измерения КСЯ для MSI Sentinel 2, OLI Landsat 8 составляют 5% [10,11]). Для интегрального порога применялся допуск согласованности — не хуже 90%. На рис. 4 приведены результаты аппроксимации наблюдений RadCalNet для калибровочного полигона Гобабеб, показаны рассчитанные модели для четырех спектральных каналов МСС КК «Канопус-В».

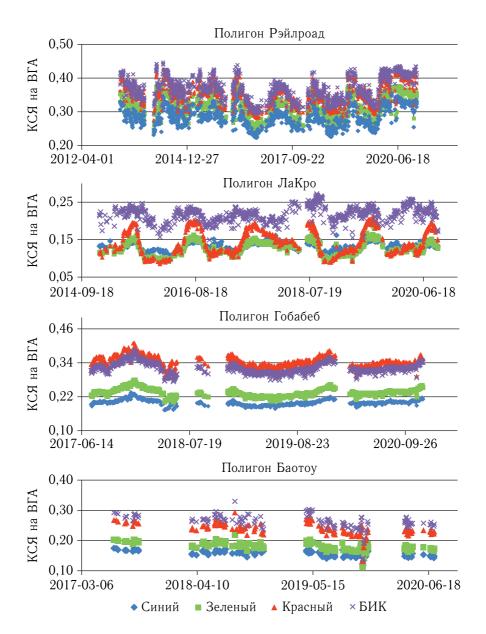


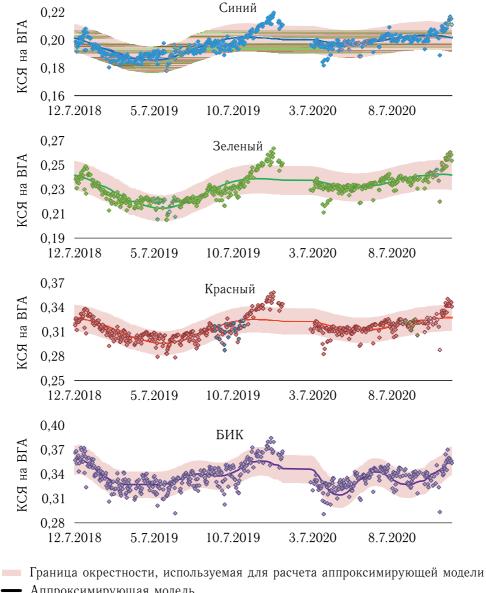
Рис. 3. Усредненные значения КСЯ на ВГА по данным RadCalNet, вычисленные с учетом времени съемки и ФСЧ МСС КК «Канопус-В» за период с 11.2018 по 12.2020 гг.

## Замещающая калибровка на основе наблюдений RadCalNet

Замещающая калибровка по данным RadCalNet состоит из следующих этапов:

- 1. Формирование временного ряда измерений КСЯ на ВГА по результатам съемки полигонов RadCalNet калибруемым сенсором ДЗЗ.
- 2. Расчет значений КСЯ на ВГА, полученных по данным автоматических измерений на полиго-
- нах RadCalNet на дату и время космической съемки с учетом функций спектральной чувствительности каналов калибруемого сенсора ДЗЗ.
- 3. Расчет коэффициентов функции линейной зависимости измерений КСЯ на ВГА на основе решения следующей задачи:

$$\boldsymbol{\vartheta} = \arg\min_{\boldsymbol{\vartheta}} \sum_{i} \sum_{j} (f(\rho_{i,j}, \boldsymbol{\vartheta}) - \rho_{i,j}^{RCN})^{2}, \quad (5)$$



- Аппроксимирующая модель
- Измерения RadCalNet КСЯ на ВГА

Рис. 4. Рассчитанные аналитические модели для четырех спектральных каналов МСС КК «Канопус-В» по данным наземных измерений на полигоне Гобабеб сети RadCalNet

i — индекс заданного полигона;

j — индекс наблюдения для заданного полигона;

 $f(\rho, \vartheta)$  — функции линейной зависимости измерений КСЯ на ВГА.

В таблице приведены рассчитанные мультипликативный (gain) и аддитивный (offset) параметры для сенсоров МСС КК «Канопус-В».

### Сопоставление результатов измерения КСЯ КК «Канопус-В» до и после замещающей калибровки

Для оценки результатов замещающей калибровки была применена методика, описанная в [12]. Для данных МСС КК «Канопус-В», полученных в период с 11.2018 по 02.2020 гг. на территории

This is in a paint the state of					
KA	Пара- метр	Синий	Зеленый	Крас- ный	БИК
«Кано- пус-В» № 1	Gain	1,07	1,03	1,08	1,03
	Offset	-0,01	-0.01	0,01	0,02
«Кано- пус-В-ИК»	Gain	1,02	1,02	0,94	0,93
	Offset	-0,01	-0,01	0,01	0,01
«Кано- пус-В» № 3	Gain	1,06	1,00	0,93	0,88
	Offset	-0,01	-0.01	0,02	0,03

0.66

0,06

1,16

-0.01

1.03

0,01

0.74

0,05

1,07

0.00

0.96

0,02

0.78

0,05

0,92

0,04

0.92

0,04

0.71

0,07

0,93

0,03

0,81

0,05

Gain

Offset

Gain

Offset

Gain

Offset

«Канопvc-В» № 4

«Кано-

«Канопус-В» № 6

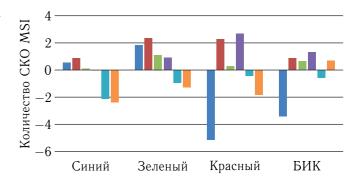
пус-В» № 5

Таблица. Рассчитанные мультипликативный и аддитивный параметры для сенсоров МСС КК «Канопус-В»

трех псевдостабильных природных калибровочных полигонов — Ливия 4, Нигер 3, Гобабеб, были применены рассчитанные с периодичностью в шесть месяцев корректирующие коэффициенты.

В соответствии с [12] выполнялась нормализация КСЯ на ВГА МСС КК «Канопус-В» в обеспечение сопоставимости результатов измерения между различными полигонами в единицах количества СКО КСЯ на ВГА сенсора MSI Sentinel 2 для соответствующих полигонов. Нормализованные значения являются безразмерными и рассчитываются на основе центрирования и нормирования относительно среднего значения и СКО соответственно, рассчитанных по данным наблюдений КСЯ на ВГА сенсора MSI Sentinel 2 соответствующих полигонов.

Результаты сопоставления средних значений и величин СКО, рассчитанных для нормализованных величин КСЯ на ВГА различных спектральных каналов МСС, до и после замещающей калибровки приведены на диаграммах 5 и 6 соответственно. В соответствии с [12] данные результаты оцениваются в безразмерных величинах — количестве величин СКО сенсора MSI Sentinel 2, предварительно приведенных/смещенных относительно среднего значения сенсора MSI Sentinel 2.



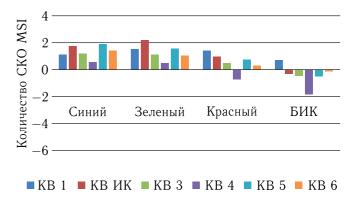


Рис. 5. Результаты сопоставления средних значений нормализованных наблюдений КСЯ на ВГА различных спектральных каналов МСС «Канопус-В» (КВ), рассчитанных по всем полигонам, до (вверху) и после (внизу) замещающей калибровки. Ось ординат — безразмерная величина, характеризующая количество величин СКО сенсора MSI Sentinel 2 для измерений сенсора МСС, предварительно приведенных относительно его среднего значения

#### Заключение

В статье приведена методика замещающей калибровки данных сенсора МСС группировки КА «Канопус-В» на основе наблюдения полигонов RadCalNet за период 2018–2020 гг. Данная методика демонстрирует возможность и целесообразность использования наблюдений RadCalNet для контроля и уточнения параметров абсолютной калибровки в течение длительных временных интервалов. Рассчитанные параметры абсолютной калибровки показывают существенно улучшенную сопоставимость измерений между спектральными каналами сенсора МСС группировки КА «Канопус-В», более чем в 2–3 раза (в зависимости от спектрального канала).

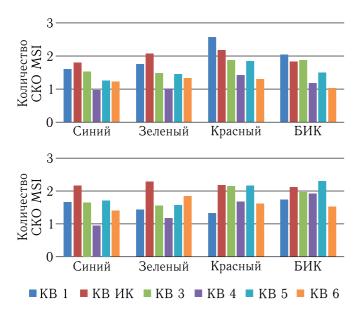


Рис. 6. Результаты сопоставления СКО различных спектральных каналов МСС «Канопус-В» (КВ), рассчитанных для нормализованных наблюдений КСЯ на ВГА по всем полигонам, до (вверху) и после (внизу) замещающей калибровки. Ось ординат — безразмерная величина, характеризующая количество величин СКО сенсора MSI Sentinel 2 для измерений сенсора МСС, предварительно приведенных относительно его среднего значения

### Список литературы

- 1. *Лупян Е.А.*, *Саворский В.П.* Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы ДЗЗ из космоса. 2012. Т. 9, № 2. С. 87–96.
- 2. Васильев А.И., Коршунов А.П., Ольшевский Н.А., Стремов А.С. Программные технологии создания и распространения базовых продуктов дистанционного зондирования Земли // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2, вып. 3. С. 23–32.
- 3. Бочарников А.И., Жиличкин А.Г., Коваленко В.П., Кондратов А.В., Тихонычев В.В., Худяков А.В. Технологии определения характеристик целевой аппаратуры КК ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2, вып. 2. С. 18–31.

- 4. Васильев А.И., Стремов А.С., Морозов Е.А. Методы верификации базовых продуктов ДЗЗ межведомственного использования // Доклад на XIII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2015 г. http://smiswww.iki.rssi.ru/d33\_conf/thesisshow.aspx? page=109&thesis=5105 (2021)
- 5. Васильев А.И., Стремов А.С., Коваленко В.П. Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 4. С. 36–51.
- 6. Васильев А.И., Стремов А.С., Коваленко В.П., Михеев А.А. Методика сопоставления базовых продуктов МСС КА «Канопус-В» и Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 4. С. 36–48.
- Helder D. L., Karki S., Bhatt R., Micijevic E., Aaron D., & Jasinski B. Radiometric Calibration of the Landsat MSS Sensor Series // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2012. 50(6). P. 2380–2399. doi:10.1109/tgrs.2011.2171351 15 (16) Schott 2007; Naughton et al., 2011.
- 8. *Schott J.* Remote Sensing: The Image Chain Approach. 2nd Edition. (2007).
- Bouvet M., Thome K., Berthelot B., Bialek A., Czapla-Myers J., Fox N.P., Goryl P., Henry P., Ma L., Marcq S., Meygret A., Wenny B.N., Woolliams E.R. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range // Remote Sens. 2019. 11, 2401. https://doi.org/10.3390/rs11202401
- 10. SENTINEL-2 User Handbook 2015.
- 11. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook 2019.
- 12. Стремов А. С., Васильев А. И. Методика оценки сопоставимости измерений радиометром МСС группировки КА «Канопус-В» на основе съемки природных калибровочных полигонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 1. С. 19–30.