Методика оценки сопоставимости измерений радиометром МСС группировки КА «Канопус-В» на основе съёмки природных калибровочных полигонов

А. С. Стремов, А. И. Васильев

Научный центр оперативного мониторинга Земли AO «Российские космические системы», Москва, 127490, Россия E-mail: nova@ntsomz.ru

В статье рассмотрена задача оценки сопоставимости измерений радиометром МСС группировки космических аппаратов (KA) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) типа «Канопус-В». Для оценки сопоставимости измерений предложена экспериментальная методика, в соответствии с которой выполнена серия съёмок (более 120 эпизодов) природных калибровочных полигонов Ливия-4, Гобабеб, Нигер-3 за период 2018—2020 гг. Далее в результате обработки данных МСС «Канопус-В» в автоматизированном режиме были рассчитаны коэффициенты спектральной яркости (КСЯ). В рамках методики выполнялась нормализация измерений MCC-радиометров относительно измерений MSI Sentinel-2 этих же полигонов за рассматриваемый период. Таким образом, достигалась инвариантность наблюдений к характеристикам отражательной поверхности калибровочных полигонов. Итоговые результаты сопоставления данных радиометра МСС группировки КА «Канопус-В» относительно измерений MSI демонстрируют сопоставимость измерений между отдельными спектральными каналами группировки в пределах двух величин среднеквадратического отклонения (СКО) измерений MSI-радиометра. Кроме того, наблюдается сопоставимость точности измерений КСЯ различными спектральными каналами (за исключением красного канала «Канопус-В» № 1) в пределах одной величины СКО измерений MSI-радиометра. Вместе с тем следует отметить необходимость дополнительной взаимной калибровки сенсоров для обеспечения сопоставимости измерений всех спектральных каналов МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В».

Ключевые слова: космический аппарат «Канопус-В», радиометр МСС, группировка КА ДЗЗ, сопоставимость данных, природные калибровочные полигоны, MSI Sentinel-2

Одобрена к печати: 26.01.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-19-30

Введение

Рост числа действующих российских космических систем (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) ведёт к необходимости обеспечения единства измерений с целью сопоставимости данных сенсоров разных КС ДЗЗ. Более того, непрерывное поступление сопоставимых результатов измерений радиометрами становится ключевым фактором, обеспечивающим решение различных задач природно-ресурсного мониторинга. При этом для группировки российских КС ДЗЗ вопросы сопоставимости рассматриваются для отдельных радиометров путём кросс-калибровки с зарубежными КС ДЗЗ (см., например, работы (Васильев и др., 2017; Жуков и др., 2014)).

Действующая группировка российских космических аппаратов (КА) ДЗЗ типа «Канопус-В» (КВ) в настоящее время (2020) включает в себя шесть КА, оборудованных панхроматическим и мультиспектральным радиометрами (Боярчук и др., 2011), для которых особенности обработки данных продемонстрированы в публикациях (Васильев, 2015; Васильев и др., 2014; Крылов, Васильев, 2019; Кузнецов и др., 2014). В работах (Алексанин и др., 2019; Силюк, Катовский, 2016; Стремов, Васильев, 2019) рассмотрены задачи валидации и абсолютной радиометрической калибровки радиометра МСС (многозональная спутниковая съёмка) КА «Канопус-В» на основе сопоставления с данными зарубежных КС ДЗЗ, а также с наземными *in situ* измерениями. Вместе с тем остаётся открытой проблема сопоставимости данных МСС-радиометров в рамках самой группировки КА типа «Канопус-В».

Опираясь на исследования сопоставимости данных Landsat и Sentinel на основе длительного наблюдения псевдостабильных калибровочных полигонов (см., например, работу (Васильев, Стремов, 2018)), в рамках настоящей статьи авторы рассматривают экспериментальную методику сопоставления измерений между различными МСС-радиометрами группировки КА «Канопус-В» по результатам съёмки калибровочных полигонов. Для этого, во-первых, определены калибровочные полигоны и условия для проведения съёмки. Во-вторых, выполнена съёмка полигонов и обработка/подготовка данных для анализа. В-третьих, проведены оценки стабильности измерений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) МСС-радиометрами, а также оценки отклонения между регистрируемыми измерениями. В-четвёртых, для комплексного учёта измерений от всех полигонов предлагается подход на основе нормализации измерений относительно измерений Sentinel-2, в соответствии с которым выполнены оценки сопоставимости данных радиометров МСС группировки «Канопус-В». В заключении приведены полученные результаты исследования.

Съёмка калибровочных полигонов МСС-радиометрами группировки КА «Канопус-В»

В качестве тестовых полигонов для совместной съёмки были выбраны псевдостабильные калибровочные полигоны. Как правило, это обширные, однородные, пустынные районы площадью до 100 кm^2 (Dinguirard, Slater, 1999) с постоянной или близкой к постоянной высокой отражательной способностью, низким содержанием аэрозолей в атмосфере и отсутствием растительности в течение года. Данные полигоны обеспечивают радиометрическую стабильность во времени: без учёта влияния атмосферы и геометрии съёмки были зафиксированы изменения яркости в переделах 1-2% в течение года (Cosnefroy et al., 1996). В настоящей работе были использованы полигоны Ливия-4 (Libya 4), Гобабеб (Gobabeb), Нигер-3 (Niger 3), показанные на *puc. 1*.

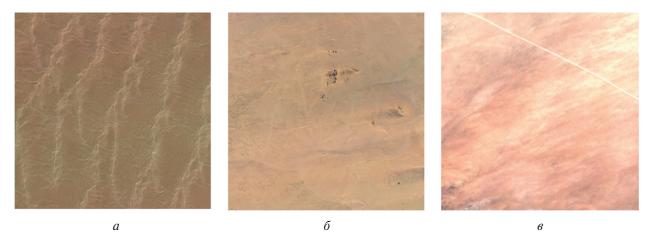


Рис. 1. Псевдостабильные калибровочные полигоны: a — Ливия-4; b — Нигер-3; b — Гобабеб

В период с ноября 2018 г. по февраль 2020 г. было произведено более 200 съёмок территории выбранных полигонов, среди них отобраны 123 безоблачные сцены, их распределение по полигонам и КА приведено на *puc. 2* (см. с. 21). Съёмка проводилась с ограничением допустимых углов крена (не более 5°) с целью минимизации влияния атмосферных эффектов и неламбертовости подстилающей поверхности.

Для каждого набора отснятых данных была выполнена стандартная обработка и расчёт средних значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) на верхней границе атмосферы на однородных участках площадью 20 км² на выбранных полигонах. В общем виде блок-схема подготовки и обработки данных показана на *рис. 3* (см. с. 21).

При этом дополнительно в обеспечение сопоставления корректности результатов съёмки MCC-радиометрами также подготавливались и анализировались данные радиометра MSI (Multispectral Instrument) KA Sentinel-2 для этих же полигонов за рассматриваемый временной интервал.

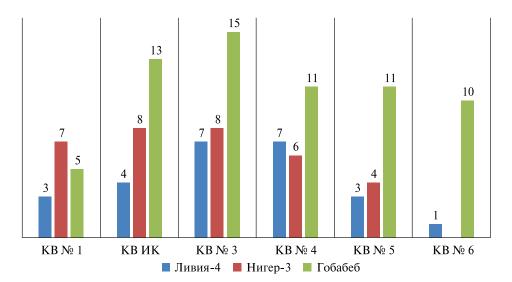


Рис. 2. Количество съёмок полигонов радиометров МСС группировки «Канопус-В» в период с ноября 2018 г. по февраль 2020 г.



Рис. 3. Блок-схема подготовки и обработки данных

На puc. 4-6 (см. с. 22–23) приведены результаты измерений КСЯ по данным МСС-радиометров группировки КА типа «Канопус-В», а также MSI Sentinel-2 (S2) для рассматриваемых полигонов.

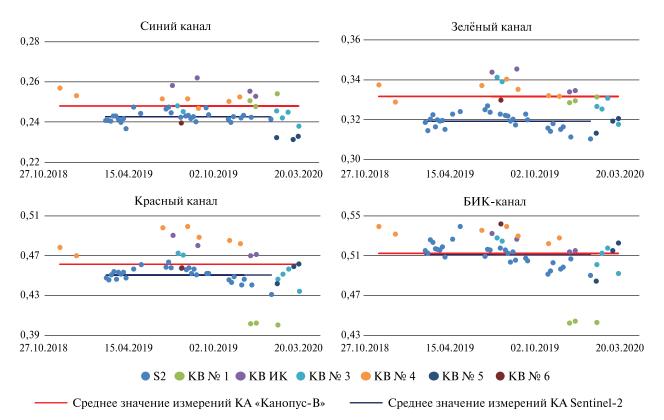


Рис. 4. Результаты наблюдения полигона Ливия-4. СКО MCC/MSI: для синего канала — 0,0082/0,0024; для зелёного — 0,0083/0,004; для красного — 0,0279/0,007; для БИК-канала — 0,0296/0,0111

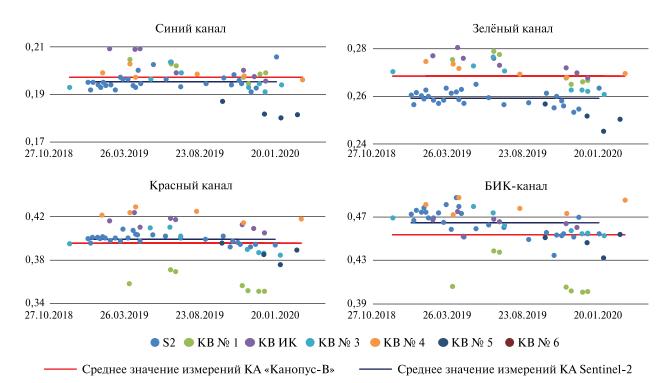


Рис. 5. Результаты наблюдения полигона Нигер-3. СКО MCC/MSI: для синего канала — 0,0072/0,0032; для зелёного — 0,0084/0,0029; для красного — 0,0241/0,0041; для БИК-канала — 0,0254/0,0121

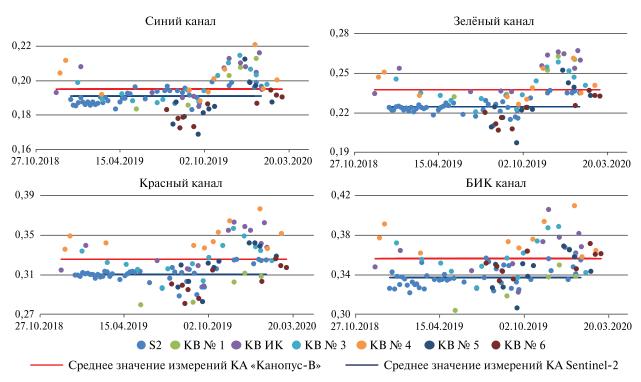


Рис. 6. Результаты наблюдения полигона Гобабеб. СКО MCC/MSI: для синего канала -0.0119/0.0046; для зелёного -0.0163/0.0059; для красного -0.0229/0.0084; для БИК-канала -0.0211/0.009

Оценки абсолютных измерений КСЯ по данным МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В» для различных полигонов

Результаты оценки средних значений КСЯ, рассчитанных на основе измерений МСС-радиометрами для соответствующих полигонов и спектральных каналов в течение заданного периода наблюдений, приведены в $maбл.\ 1$.

Таблица 1. Оценка измерений средних КСЯ, зафиксированных МСС-радиометрами космического аппарата «Канопус-В» для соответствующих полигонов и спектральных каналов в течение заданного периода наблюдений

Полигон	Канал	KB № 1	КВ-ИК	KB № 3	KB № 4	KB № 5	KB № 6	Среднее	СКО
Гобабеб	Blue	0,199	0,201	0,197	0,201	0,187	0,184	0,195	0,0074
	Green	0,248	0,25	0,239	0,241	0,226	0,222	0,238	0,0114
300	Red	0,297	0,338	0,327	0,348	0,320	0,304	0,322	0,0195
Ц	NIR	0,330	0,363	0,358	0,376	0,344	0,352	0,354	0,0159
Ливия-4	Blue	0,251	0,257	0,246	0,252	0,232	_	0,248	0,0096
	Green	0,330	0,339	0,332	0,334	0,317	_	0,330	0,0082
	Red	0,401	0,477	0,457	0,486	0,454	_	0,455	0,0330
	NIR	0,443	0,521	0,515	0,532	0,507	_	0,504	0,0351
Нигер-3	Blue	0,20	0,203	0,196	0,199	0,183	_	0,196	0,0078
	Green	0,271	0,274	0,267	0,271	0,251	_	0,267	0,0092
	Red	0,359	0,414	0,396	0,422	0,386	_	0,395	0,0248
	NIR	0,413	0,464	0,463	0,48	0,446	_	0,453	0,0255

Рассогласование средних значений КСЯ в спектральных каналах для группировки КА вне зависимости от полигона составляет: для спектральных каналов Blue (синий), Green

(зелёный) среднеквадратическое отклонение (СКО) — не более 0,01; для спектральных каналов Red (красный), NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный (БИК)) СКО достигает 0,035. Данные показатели демонстрируют существенно более хорошую сопоставимость для спектральных каналов Blue, Green внутри группировки.

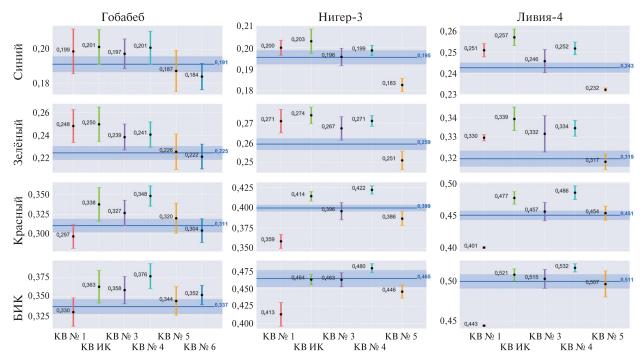
Результаты оценки среднеквадратичных значений КСЯ, рассчитанных на основе измерений МСС-радиометрами для соответствующих полигонов и спектральных каналов в течение заданного периода наблюдений, приведены в *табл. 2.* Данные показатели демонстрируют стабильность измерений КСЯ наблюдаемой поверхности полигонов (с учётом возможных атмосферных искажений) в течение заданного периода наблюдений. Наиболее существенный разброс измерений КСЯ в спектральных каналах сенсоров группировки наблюдается для полигона Гобабеб: СКО достигает 0,018—0,021 единиц КСЯ для спектральных каналов Red, NIR МСС-радиометров группировки.

Таблица 2. Оценка среднеквадратичных значений измерений КСЯ, зафиксированных МСС-радиометрами космического аппарата «Канопус-В» для соответствующих полигонов и спектральных каналов в течение заданного периода наблюдений

Полигон	Канал	KB № 1	КВ-ИК	KB № 3	KB № 4	KB № 5	KB № 6
Гобабеб	Blue	0,013	0,01	0,009	0,010	0,012	0,008
	Green	0,014	0,015	0,011	0,011	0,016	0,011
	Red	0,015	0,021	0,016	0,013	0,019	0,015
	NIR	0,018	0,021	0,018	0,016	0,018	0,012
Ливия-4	Blue	0,003	0,004	0,006	0,003	0,001	_
	Green	0,002	0,006	0,009	0,004	0,004	_
	Red	0,001	0,010	0,014	0,011	0,011	_
	NIR	0,001	0,009	0,015	0,006	0,020	_
Нигер-3	Blue	0,003	0,006	0,004	0,002	0,003	_
	Green	0,006	0,004	0,006	0,003	0,005	_
	Red	0,008	0,006	0,011	0,005	0,008	_
	NIR	0,017	0,008	0,010	0,007	0,009	_

Таблица 3. Относительное отклонение измерения средних КСЯ радиометром МСС космического аппарата «Канопус-В» относительно значений радиометра MSI для соответствующих полигонов и спектральных каналов (в процентах)

Полигон	Канал	KB № 1	КВ-ИК	KB № 3	KB № 4	KB № 5	KB № 6
Гобабеб	Blue	4,2	5,2	3,1	5,2	2,1	3,7
	Green	10,2	11,1	6,2	7,1	0,4	1,3
300	Red	4,5	8,7	5,1	11,9	2,9	2,3
	NIR	2,1	7,7	6,2	11,6	2,1	4,5
Ливия-4	Blue	3,3	5,8	1,2	3,7	4,5	_
	Green	3,4	6,3	4,1	4,7	0,6	_
	Red	11,1	5,8	1,3	7,8	0,7	_
	NIR	13,3	2,0	0,8	4,1	0,8	_
Нигер-3	Blue	2,6	4,1	0,5	2,1	6,2	_
	Green	4,6	5,8	3,1	4,6	3,1	_
	Red	10,0	3,8	0,8	5,8	3,3	_
	NIR	11,2	0,2	0,4	3,2	4,1	_



Puc. 7. Распределение средних значений и СКО измерений МСС «Канопус-В» по полигонам относительно измерений MSI Sentinel-2 (в процентах)

На основе *табл.* 1—2 на *рис.* 7 показаны средние значения и СКО измерений для спектральных каналов МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В», а также для сравнения приведены средние значения и СКО измерений для спектральных каналов MSI-радиометра КА Sentinel-2. Для данных графиков наблюдаются неоднозначно систематизируемые отклонения в измерениях КСЯ для радиометра МСС относительно измерений радиометра MSI. Вместе с тем в *табл.* 3 показаны относительные отклонения измерений средних КСЯ радиометрами МСС относительно радиометра MSI для соответствующих полигонов и спектральных каналов. Полученные оценки демонстрируют сопоставимость измерений МСС и MSI преимущественно в пределах 10—12 % вне зависимости от полигона.

Сопоставление измерений КСЯ по данным МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В» между различными полигонами

Определим задачу нормализации измерений КСЯ радиометра МСС для полигона в течение заданного периода в следующем виде:

$$\rho' = \frac{(\rho - \mu_{S2})}{\sigma_{S2}},$$

где для рассматриваемого полигона ρ' — нормализованное измерение КСЯ на верхней границе атмосферы (ВГА) заданного МСС-радиометра; ρ — измерение КСЯ на ВГА заданного МСС-радиометра; μ_{S2} — среднее значение измерений КСЯ на ВГА «эталонного» радиометра; σ_{S2} — СКО измерений КСЯ на ВГА «эталонного» радиометра.

В качестве «эталонного» радиометра рассмотрим MSI Sentinel-2. Для этого предварительно оценим сопоставимость измерений MCC и MSI на основе критерия соответствия измеряемой оптико-электронными приборами эффективной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) (Васильев и др., 2018):

$$KLK = \frac{\int f_{\rm MSI}(\lambda) L(\lambda) \, d\lambda \cdot \int f_{\rm MCC}(\lambda) \, d\lambda}{\int f_{\rm MCC}(\lambda) L(\lambda) \, d\lambda \cdot \int f_{\rm MSI}(\lambda) \, d\lambda},$$

где $f_{\text{MCC}}(\lambda)$, $f_{\text{MSI}}(\lambda)$ — функции спектральной чувствительности (ФСЧ) сенсора МСС КА «Канопус-В» и MSI Sentinel-2 соответственно ($puc.~\delta$); $L(\lambda)$ — функция спектральной плотности энергетической яркости наблюдаемого объекта на верхней границе атмосферы.

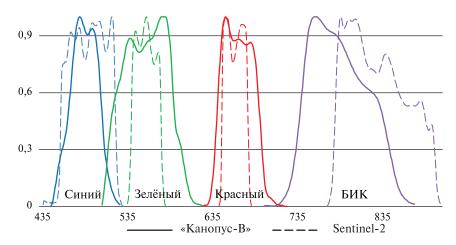


Рис. 8. Функции спектральной чувствительности МСС «Канопус-В» и MSI Sentinel-2

В качестве наблюдаемых объектов для моделирования были использованы библиотечные спектры программного комплекса MODTRAN для различных типов поверхности. Полученные оценки приведены в *табл. 4*. На основе рассчитанных средних значений КСЯ и СКО наблюдается хорошая сопоставимость измерений спектральных каналов видимого диапазона (систематическое отклонение — в пределах 2 % и случайное — в пределах 2,5 %), при этом для БИК могут наблюдаться более существенные расхождения в измерениях, имеющие как систематический (в пределах 8 %) так и случайный характер (в пределах 7,5 %).

<i>Таблица 4.</i> Отношение эффективной	СПЭЯ различных типов	з поверхности для данных 1	MCC/MSI

Тип поверхности	KLK синий	KLK зелёный	KLK красный	КІК БИК
Лиственные леса	0,985	1,034	0,991	0,973
Хвойные леса	0,993	1,030	0,983	0,967
Луг	0,973	1,001	0,960	1,013
Снег (Антарктида)	0,983	1,004	1,026	0,869
Лёд	0,981	1,003	1,036	0,761
Океан	0,964	1,000	1,027	0,850
Гранит	0,979	1,003	1,024	0,918
Город	0,972	1,003	1,022	0,954
Супесь	0,994	1,006	1,020	0,948
Песок (Арабия)	0,996	0,994	1,019	0,962
Среднее значение	0,982	1,008	1,011	0,921
СКО	0,010	0,013	0,024	0,075

В результате для измерений, приведённых на puc. 5-7, выполнена нормализация (относительно сенсора MSI) и рассчитаны средние значения КСЯ и СКО для нормализованных измерений по всем полигонам. Результаты сопоставления средних значений различных спектральных каналов МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В» для нормализованных измерений приведены на puc. 9 (см. с. 27). Результаты сопоставления СКО — на puc. 10 (см. с. 27).

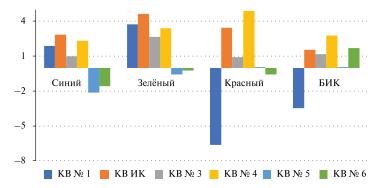
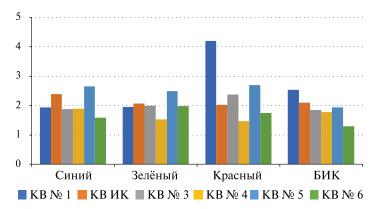


Рис. 9. Систематические отклонения (рассчитанные для всех полигонов) для спектральных каналов нормализованных измерений MCC-радиометров относительно измерений MSI Sentinel-2



Puc. 10. Оценка СКО измерения КСЯ на ВГА по данным МСС КА «Канопус-В» относительно MSI Sentinel-2

Полученные результаты позволяют сделать следующие основные заключения:

- 1. Наилучшая сопоставимость измерений (в пределах двух величин измерений СКО радиометра MSI) достигается:
 - для каналов Blue и Green между KA «Канопус-В» № 1, 3, 4 и «Канопус-В-ИК»;
 - для канала Red между KA «Канопус-В» № 3, 5, 6;
 - для канала NIR между KA «Канопус-В» № 3, 4, 6 и «Канопус-В-ИК».
- 2. Для всех спектральных каналов (за исключением канала Red «Канопус-В» № 1) наблюдается сопоставимость точности измерений (в пределах одной величины измерений СКО радиометра MSI).

Таким образом, для отдельных спектральных каналов МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В» наблюдается сопоставимость измерений, при этом имеются систематические отклонения для разных групп (например, для канала Blue можно выделить группу КА «Канопус-В» № 1, 3, 4 и группу КА «Канопус-В» № 5, 6). При этом следует отметить приблизительно одинаковую точность радиометров, что обуславливает возможность сопоставимости измерений внутри группировки при условии проведения работ, например по взаимной калибровке МСС-радиометров.

Заключение

В рамках статьи рассмотрена задача оценки сопоставимости измерений МСС-радиометрами группировки космических аппаратов ДЗЗ типа «Канопус-В». Для этого предложена экспериментальная методика, заключающаяся в съёмке различных природных калибровочных полигонов с использованием группировки для заданного временного интервала (2018–2020)

и дальнейшем сопоставлении измерений различных полигонов путём нормализации этих измерений на основе характеристик измерений выбранного эталонного радиометра. В качестве последнего в статье предлагается использовать MSI-радиометр KA Sentinel-2, учитывая близость ФСЧ спектральных каналов МСС и MSI. В результате обработки экспериментальных данных наблюдается сопоставимость измерений различными спектральными каналами группировки в пределах двух величин СКО измерений MSI-радиометра. Кроме того, наблюдается сопоставимость точности измерений КСЯ различными спектральными каналами (за исключением канала Red «Канопус-В» № 1) в пределах одной величины СКО измерений MSI-радиометра. Вместе с тем следует отметить необходимость дополнительной взаимной калибровки сенсоров для обеспечения сопоставимости измерений всех спектральных каналов МСС-радиометров группировки КА «Канопус-В».

Литература

- 1. Алексанин А. И., Дьяков С. Е., Качур В. А., Морозов М. А., Фомин Е. В. Качество первичной обработки данных спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В» // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11—15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 507.
- 2. *Боярчук К.А.*, *Волков С.Н.*, *Горбунов А.В.* Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическим аппаратом «Канопус-В» № 1. М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. 110 с.
- 3. *Васильев А. И.* Калибровка съемочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203—214.
- 4. Васильев А. И., Стремов А. С. Эксперимент по сопоставлению данных OLI Landsat 8 и данных MSI Sentinel-2A на основе псевдоинвариантного калибровочного полигона Libia 4 // 16-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. Москва, 12—16 нояб. 2018. 2018. С. 507.
- 5. Васильев А. И., Крылов А. В., Райченко Б. В. Программный комплекс для построения фотосхем местности по данным с космического аппарата «Канопус-В» № 1 // Вопросы электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. Приложение за 2014 г.: Материалы 2-й международной научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». 2014. С. 205–212.
- 6. 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. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51.
- 7. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48.
- 8. *Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В., Пермитина Л. И.* Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на KA «Метеор-М» № 1 по спектрорадиометру MODIS на KA Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 123—137.
- 9. *Кузнецов А. Е.*, *Побаруев В. И.*, *Пошехонов В. И.*, *Пресняков О. А.* Программный комплекс обработки информации от сканерно-кадровых съемочных систем КА «Канопус-В» и «БКА» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 1. С. 287—300.
- 10. *Крылов А. В.*, *Васильев А. И.* Построение бесшовного сплошного покрытия по данным группировки КА Канопус-В // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 509.
- 11. *Силюк О. О.*, *Катковский Л. В.* Методика и результаты кросс-калибровки изображений Белорусского космического аппарата и других съемочных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 261—270. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270.
- 12. *Стремов А. С.*, *Васильев А. И.*, Эксперимент по сопоставлению данных МСС группировки КА «Канопус-В» // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11—15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 511.

- 13. *Cosnefroy H.*, *Leroy M.*, *Briottet X.* Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. P. 101–114. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1.
- 14. *Dinguirard M.*, *Slater P. N.* Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors: A Review // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 68. P. 194–205. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00111-4.

Methodology for assessing the comparability of measurements by the MSS radiometer of the Kanopus-V satellite constellation based on the survey of natural calibration sites

A. S. Stremov, A. I. Vasilyev

Research Center for Earth Operative Monitoring of Russian Space Systems JSC, Moscow 127490, Russia E-mail: nova@ntsomz.ru

The article considers the problem of assessing the comparability of measurements by the MSS radiometer of the Kanopus-V Earth observation satellite constellation. To assess the comparability of measurements, an experimental technique was proposed, in accordance with which a series of measurements (more than 120) of natural calibration sites Libya 4, Gobabeb, Niger was carried out for the period 2018–2020. Further, in result of data processing of the Kanopus-V MSS data in an automated mode, the spectral reflectance was calculated. Within the framework of the methodology, MSS measurements were normalized relative to the measurements of Sentinel-2 MSI for the same polygons and the same period under consideration. Thus, the invariance of observations to the characteristics of the surface of the calibration sites was achieved. The final results of comparing the data of Kanopus-V MSS and the Sentinel-2 MSI measurements demonstrate comparability between individual spectral bands measurements within 2 STD values of the MSI measurements. In addition, accuracy of reflectance measurements demonstrate the comparability (except for the RED band of Kanopus-V No. 1) within 1 STD value of the MSI measurements. At the same time, it is crucial to have additional intercalibration of sensors to ensure the comparability of measurements for all spectral bands of Kanopus-V MSS radiometers.

Keywords: Kanopus-V, MSS radiometer, Earth observation satellite constellation, Earth observation data comparability, natural calibration sites, Sentinel-2 MSI

Accepted: 26.01.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-19-30

References

- Aleksanin A. I., D'yakov S. E., Kachur V. A., Morozov M. A., Fomin E. V., Kachestvo pervichnoi obrabotki dannykh sputnikov Resurs-P i Kanopus-V (The quality of the primary data processing of the Resurs-P and Kanopus-V satellites), *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 507.
- 2. Boyarchuk K.A., Volkov S. N., Gorbunov A. V., *Kosmicheskii kompleks operativnogo monitoringa tekhno-gennykh i prirodnykh chrezvychainykh situatsii "Kanopus-V" s kosmicheskim apparatom "Kanopus-V" No. 1* (Space system Kanopus-V for operative monitoring of man-made and natural emergencies with spacecraft Kanopus-V No. 1), Moscow, FGUP "NPPVNIIEM", 2011, 110 p.
- 3. Vasil'ev A. I., Kalibrovka s"emochnoi apparatury kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" v protsesse ego ekspluatatsii (Calibration of Kanopus-V satellite sensor during its operation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 1, pp. 203–214.
- 4. Vasil'ev A.I., Stremov A.S., Eksperiment po sopostavleniyu dannykh OLI Landsat 8 i dannykh MSI Sentinel-2A na osnove psevdo invariantnogo kalibrovochnogo poligona Libia 4 (An experiment of comparison

- OLI Landsat 8 data and MSI Sentinel-2A data based on the pseudo-invariant calibration site LIBIA 4), 16-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (16th All-Russia Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of abstr., 12–16 Nov. 2018, Moscow: IKI RAN, 2018, p. 507.
- 5. Vasil'ev A. I., Krylov A. V., Raichenko B. V., Programmnyi kompleks dlya postroeniya fotoskhem mestnosti po dannym s kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" No. 1 (A software package for photoschemes composition based on data from the Kanopus-V No. 1), *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM. Prilozhenie za 2014 g. Materialy 2-i mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (Materials of the 2th international scientific and technical conf. "Actual problems of creation of space remote sensing systems of the Earth"), Electromechanical matters, VNIIEM studies, 2014, pp. 205–212.
- 6. Vasil'ev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Issledovanie dannykh kompleksa shirokozakhvatnoi mul'tispektral'noi apparatury KA "Resurs-P" dlya resheniya spektrometricheskikh zadach (Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 36–51, DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51.
- 7. Vasil'ev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Mikheev A. A., Metodika sopostavleniya bazovykh produktov MSS KA "Kanopus-V" i Landsat ETM+(Methodology of Kanopus-V MSS and Landsat ETM+ basic product comparison), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 36–48, DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-36-48.
- 8. Zhukov B.S., Kondrat'eva T.B., Polyanskii I.V., Permitina L.I., Poletnaya radiometricheskaya kross-kalibrovka kompleksa mnogozonal'noi sputnikovoi s"emki na KA "Meteor-M" No. 1 po spektroradiometru MODIS na KA Terra (In-flight radiometric cross-calibration of Multispectral Satellite Imaging System onboard Meteor-M No. 1 relative to spectroradiometer MODIS on-board Terra), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 123–137.
- 9. Kuznetsov A. E., Pobaruev V. I., Poshekhonov V. I., Presnyakov O. A., Programmnyi kompleks obrabotki informatsii ot skanerno-kadrovykh s"emochnykh sistem KA "Kanopus-V" i "BKA" (A software system for information processing from scanner-frame imaging systems SC "Kanopus-V" and "BKA"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11. No. 1, pp. 287–300.
- 10. Krylov A. V., Vasil'ev A. I., Postroenie besshovnogo sploshnogo pokrytiya po dannym gruppirovki KA Kanopus-V, *Materialy Semnadtsatoi Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 509.
- 11. Silyuk O.O., Katkovskii L.V., Metodika i rezul'taty kross-kalibrovki izobrazhenii Belorusskogo kosmicheskogo apparata i drugikh s"emochnykh sistem (Methods and results of image cross-calibration of the Belarusian satellite and other sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 261–270, DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-261-270.
- 12. Stremov A. S., Vasil'ev A. I., Eksperiment po sopostavleniyu dannykh MSS gruppirovki KA Kanopus-V (An experiment of comparison MSS sensor of Kanopus-V constellation), *Materialy Semnadtsatoi Vserossii-skoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 511.
- 13. Cosnefroy H., Leroy M., Briottet X., Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical satellite sensors, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, pp. 101–114, DOI: 10.1016/0034-4257(95)00211-1.
- 14. Dinguirard M., Slater P. N., Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors: A Review, *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 68, pp. 194–205, DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00111-4.