

Абсолютная радиометрическая калибровка и валидация данных КА «Аист-2Д» на основе съёмки Луны

А. И. Васильев¹, А. С. Стремов¹, В. П. Коваленко¹,
С. В. Ромайкин¹, А. В. Коржиманов²

¹ Научный центр оперативного мониторинга Земли, Москва, 127490, Россия
E-mail: nova@ntsomz.ru

² АО «РКЦ «Прогресс», Самара, 443009, Россия

Рассматривается принципиальная возможность абсолютной радиометрической калибровки и валидации данных российского опытно-технологического космического аппарата (КА) «Аист-2Д» на основе съёмки Луны. Для этого, во-первых, была проведена серия съёмки Луны в период ноябрь 2021 г. – март 2022 г. и выполнена предобработка данных дистанционного зондирования Земли в части детектирования и оконтуривания лунного диска, а также оценки средних значений цифровых отсчётов в спектральных каналах. Во-вторых, на основе значений коэффициента спектральной яркости Луны, рассчитанного с использованием аналитической модели ROLO 311g, выполнен расчёт градуировочных характеристик (среднеквадратическая ошибка (СКО) регрессии для спектральных каналов составляет около $1 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$), а также оценка стабильности съёмочной системы — отклонение от медианного значения мультипликативного фактора составляет 2–3 % в зависимости от спектрального канала. В-третьих, для оценки корректности измерений с использованием рассчитанного мультипликативного фактора в период январь – март 2022 г. была выполнена съёмка полигонов RadCalNet, а также псевдоинвариантных полигонов Libya 4 и Niger 3. Учитывая, что данные наземных измерений RadCalNet были доступны только для полигона Gobabeb, выборка обогащалась на основе данных съёмки КА Landsat и Sentinel тех же полигонов пересчётом спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) с использованием методики кросскалибровки. В итоге полученные оценки демонстрируют абсолютную точность измерений СПЭЯ 4,72–11,59 % (в зависимости от спектрального канала) на основе результатов калибровки по данным съёмки Луны. При этом валидация результатов кросскалибровки (с использованием данных Sentinel) на основе измеренной СПЭЯ Луны показала 2,03–10,16 % в зависимости от спектрального канала.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, «Аист-2Д», абсолютная радиометрическая калибровка, коэффициент спектральной яркости Луны, съёмка Луны, ROLO, полигоны RadCalNet, кросскалибровка, Landsat, Sentinel

Одобрена к печати: 14.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-30-41

Введение

Абсолютная радиометрическая калибровка — одна из ключевых задач оценки и контроля характеристик оптико-электронного сенсора космического базирования для использования данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в целях решения задач природно-ресурсного мониторинга. Работа сенсора ДЗЗ в условиях открытого космоса приводит к необходимости систематической оценки стабильности параметров абсолютной радиометрической калибровки и их уточнения (когда требуется). Существуют разные методы (Dinguirard, Slater, 1999) для решения этой задачи, среди них: использование бортовых систем калибровки, проведение кросскалибровки и замещающей калибровки. Для российских космических систем ДЗЗ также применяются данные методы для оценки и уточнения параметров градуировочных характеристик съёмочных систем (например, (Васильев и др., 2017; Стремов и др., 2021)).

Поскольку Луна является источником экзотатмосферного излучения, то данное небесное светило может выступать в качестве калибровочного объекта для оценки радиометрической стабильности сенсоров ДЗЗ в процессе их эксплуатации (при возможности проведения манёвра, необходимого для съёмки лунного диска). Фотометрическая стабильность Луны была

рассчитана исходя из геологического возраста и текущего уровня метеоритного влияния на её поверхность (изменение фотометрических параметров не превышает 10^{-9} в год (Kieffer, 1997)). Кроме того, яркость поверхности Луны находится в пределах динамического диапазона любого из существующих сенсоров космических спутников (КС) ДЗЗ, а фон открытого космоса (при калибровке) позволяет оценить величину темного сигнала непосредственно по данным съёмки Луны. С учётом этих обстоятельств в последние годы для абсолютной радиометрической калибровки зарубежных КС ДЗЗ Луна выступает в качестве калибровочного эталона, яркость которого оценивается, в частности, на основе аналитической модели коэффициента спектральной яркости (Stone et al., 2020). Например, с использованием данной модели выполнена калибровка следующих КС ДЗЗ: Landsat, Pleiades, Planet (Markham, Barsi, 2017; Meygret et al., 2017; Wilson et al., 2017).

В рамках настоящей статьи исследуется принципиальная возможность абсолютной радиометрической калибровки и валидации данных российского опытно-технологического КА ДЗЗ «Аист-2Д» на основе съёмки Луны. Далее приводятся особенности съёмочной системы КА «Аист-2Д», а также результаты съёмки Луны и предобработки зарегистрированных данных ДЗЗ. Представлена аналитическая модель расчёта коэффициента спектральной яркости Луны (Stone et al., 2020) и демонстрируются результаты расчёта спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) в зависимости от фазового угла наблюдений Луны. Даются оценки стабильности мультипликативного фактора за рассматриваемый период. При этом для оценки точности абсолютных измерений в период январь – март 2022 г. была выполнена съёмка полигонов RadCalNet, а также псевдоинвариантных полигонов Libya 4 и Niger 3. Учитывая, что данные наземных измерений RadCalNet были доступны только для полигона Gobabeb, выборка обогащалась на основе данных съёмок КА Landsat и Sentinel тех же полигонов пересчётом СПЭЯ с использованием методики кросскалибровки. В заключении делаются выводы о применимости рассматриваемого подхода для абсолютной радиометрической калибровки и валидации съёмочных систем российских КС ДЗЗ.

Съёмка Луны с использованием КА «Аист-2Д» для абсолютной радиометрической калибровки

Опытно-технологический (ОТ) малый космический аппарат (МКА) «Аист-2Д» (Д — демонстрационный) создан для отработки и сертификации целевой и научной аппаратуры, служебных систем и их программного обеспечения (Опытно-технологический..., 2017). При этом на борту ОТ МКА в том числе установлена экспериментальная оптико-электронная аппаратура высокого разрешения «Аврора» (основные характеристики которой приведены в *табл. 1*), изначально предназначенная для оценки принципиальных возможностей съёмки в высоком разрешении при значительной полосе захвата. Существенным достоинством МКА представляется его манёвренность (допустимы значительные отклонения от надира при съёмке), за счёт чего достигается возможность съёмки Луны на каждом витке.

Ограничение на применимость данных сенсора «Аврора» для спектрорадиометрических измерений обусловлена тем, что наземная калибровка и градуировка функций спектральной чувствительности (ФСЧ) каналов съёмочной системы (а также всего оптического тракта) не проводилась. Расчётные ФСЧ каналов на основе характеристик светофильтров и варианта квантовой эффективности матриц сенсора «Аврора» приведены на *рис. 1*.

Рис. 1. Ориентировочные функции спектральной чувствительности каналов сенсора «Аврора»

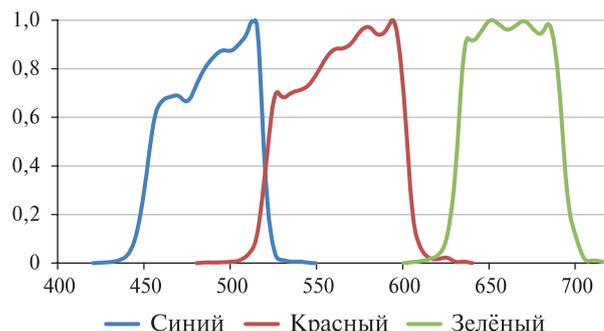


Таблица 1. Основные характеристики оптико-электронного сенсора высокого разрешения «Аврора» КА «Аист-2Д»

Фокусное расстояние, мм	2000
Полоса захвата, км	39,7
Проекция пикселя, м: • в панхроматическом канале • в мультиспектральных каналах	1,46 4,4
Спектральные диапазоны, мкм: • панхроматический канал • мультиспектральный канал	0,58–0,80 0,45–0,52 0,52–0,60 0,63–0,69
Угол поля зрения, град	5,2
Диапазон коэффициентов яркости объектов	0,07–0,9
Физический размер пикселя (мультиспектральный канал), мкм	18

Специфика съёмки сенсором «Аврора» КА «Аист-2Д» обуславливается режимами времени накопления зарядов, а также частотой сканирования, которые определяются условиями съёмки и характеристиками наблюдаемой поверхности. Соответственно, СПЭЯ, регистрируемая съёмочной системой в заданном k -м спектральном канале, определяется следующим соотношением:

$$L_{k,p} = \frac{A_k N_{k,p}}{f_p} (CN_{k,p} - Q_k),$$

где $CN_{k,p}$ — величина цифрового отсчёта, зарегистрированная сенсором в спектральном канале; A_k — коэффициент чувствительности, Дж·м⁻²·ср⁻¹·мкм⁻¹; $N_{k,p}$ — дискретный коэффициент времени накопления; f_p — строчная частота сканирования, Гц; Q_k — темновой сигнал; p — идентификатор снимка.

В период с ноября 2021 г. по март 2022 г. с использованием сенсора «Аврора» КА «Аист-2Д» было выполнено 24 съёмки Луны (рис. 2, 3, см. с. 33) при следующих условиях:

- съёмка в дни полнолуния (с поверхности Земли) с допустимым отклонением не более 4 сут;
- различные коэффициенты времени накопления при фиксированной частоте сканирования;
- изображение Луны должно быть отснято полностью и располагаться в центральной части поля зрения съёмочной системы.

В рамках первичного анализа результатов съёмки проводилась оценка величины темновых сигналов Q_k на основе вычисления среднего значения для отдельных удалённых (от изображения Луны) окрестностей. Вне зависимости от параметра времени накопления и выбора спектрального канала средний темновой сигнал составлял около 30 величин цифровых отсчётов. При этом разброс наблюдаемых значений 28–32 обуславливался подавлением младших битов 10-разрядного числа, в частности

для обеспечения компактной передачи данных на приёмный комплекс.

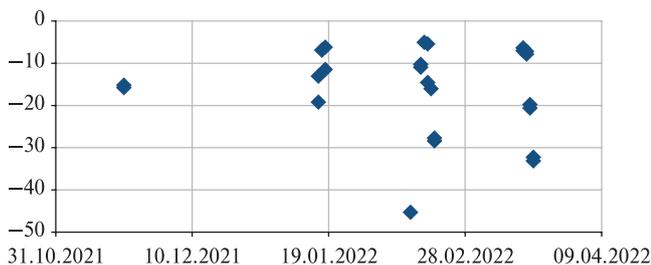


Рис. 2. Множество наблюдений Луны с использованием КА «Аист-2Д»: ось y — абсолютный фазовый угол (град); ось x — дата съёмки

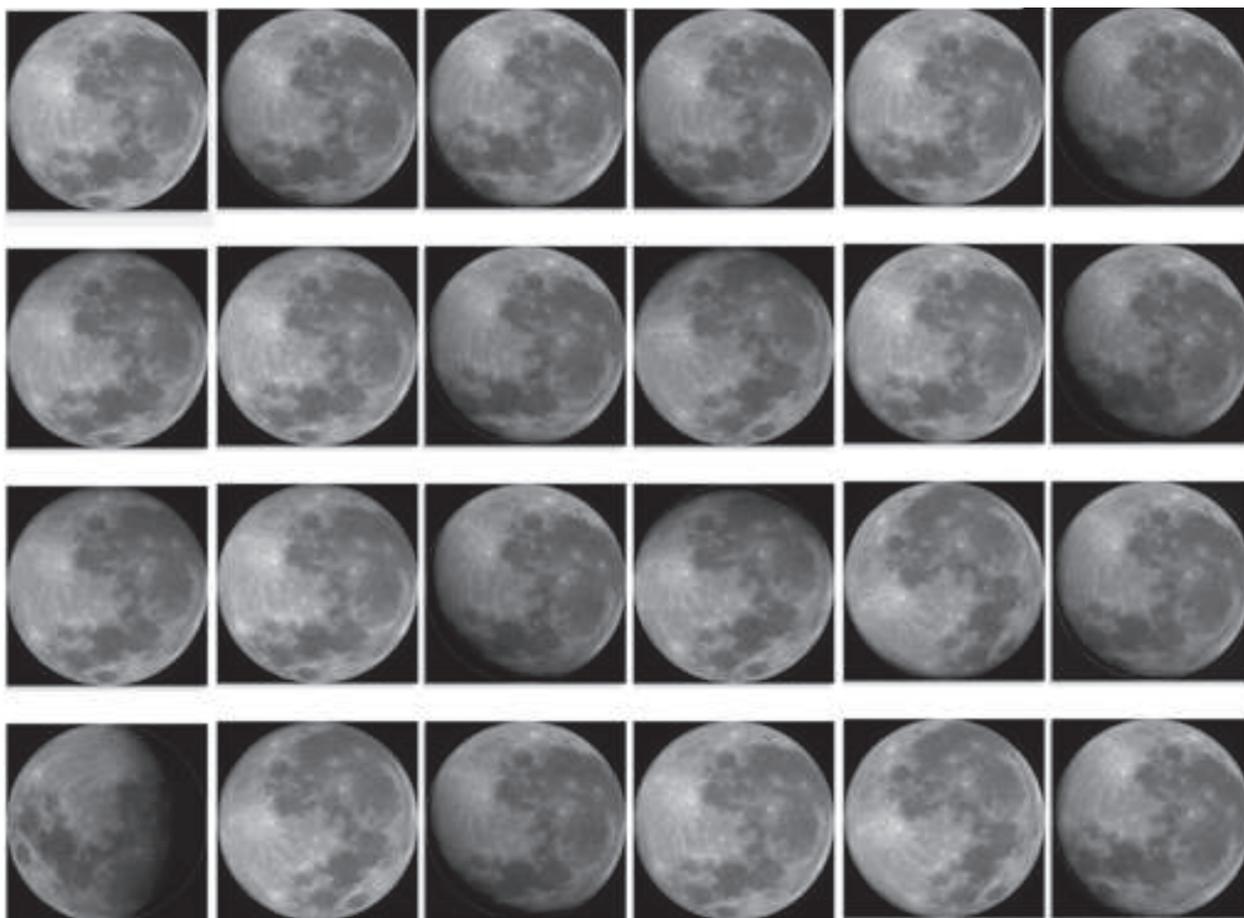


Рис. 3. Данные сенсора «Аврора» КА «Аист-2Д» по Луне в период с 20.11.2021 по 30.03.2022 (красный спектральный канал)

Далее для изображений спектральных каналов выполнялась автоматическая предобработка данных в части детектирования и векторизации лунного диска. Этапы данного алгоритма (Васильев и др., 2022) представлены на рис. 4 и включают локализацию области интереса, контурный анализ и расчёт границы видимого диска Луны.

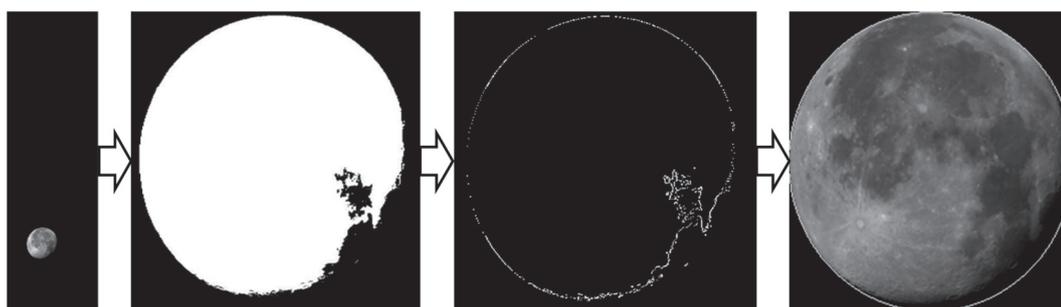


Рис. 4. Этапы процесса автоматического детектирования Луны: исходное изображение; область интереса; контурный анализ; граница видимого диска (слева направо)

На основе рассчитанных лунных контуров изображений спектральных каналов выполнялся расчёт величины её средней яркости (в единицах цифровых отсчётов) в спектральных каналах. При этом средняя яркость нормировалась с учётом номинальных параметров работы аппаратуры на основе соотношения:

$$DN_{k,p} = \frac{f_p}{f_0} \cdot \frac{N_0}{N_{k,p}} (CN_{k,p} - Q_k),$$

где $DN_{k,p}$ — нормированная величина цифрового отсчёта к номинальным условиям съёмки; N_0 — номинальный коэффициент времени накопления (синий канал — 64, зелёный — 32, красный — 32); $f_0 = 1221,54$ Гц — номинальная строчная частота сканирования.

Соответственно, градуировочную характеристику для спектральных каналов съёмочной системы «Аврора» относительно нормированных значений цифровых отсчётов можно задать следующим образом:

$$L_{k,p} = a_k \cdot DN_{k,p},$$

где a_k — мультипликативный фактор чувствительности для спектрального канала, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{мкм}^{-1}$.

В результате обработки всего множества снимков был сформирован массив средних значений нормированных цифровых отсчётов видимого диска Луны — $\{DN_{k,p}\}$. Скатерограмма рассчитанных значений приведена на рис. 5. Данный график показывает линейный характер межканальных зависимостей эффективных СПЭЯ Луны, фактически демонстрирующий корректность результатов автоматической обработки — стабильность соотношения этих величин.

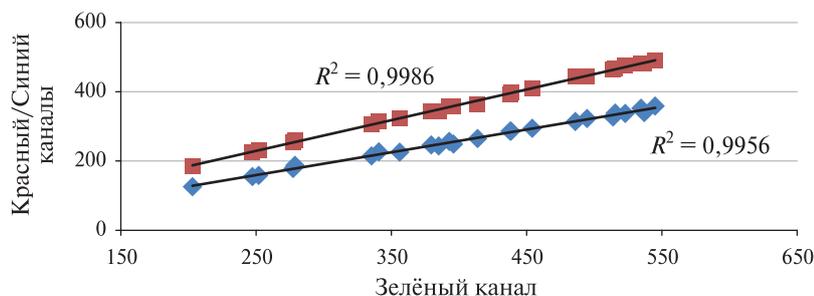


Рис. 5. Скатерограмма средних значений нормированных цифровых отсчётов, рассчитанных для съёмки Луны. По оси x — значения цифровых отсчётов для зелёного канала; по оси y — нормированные значения цифровых отсчётов для красного и синего спектральных каналов

Оценка параметров градуировочной характеристики на основе аналитической модели расчёта СПЭЯ Луны

Начиная с 1995 г. Геологическая служба США (*англ.* United States Geological Survey — USGS) организовала программу по калибровке сенсоров КС ДЗЗ по Луне. В наземной лунной обсерватории на вершине горы Макмиллан Меса (*англ.* McMillan Mesa) во Флагстаффе, штат Аризона, в период с 1995 по 2003 г. было проведено порядка 110 000 съёмок Луны. Собрана информация о её яркости в 23 каналах видимого и ближнего инфракрасного электромагнитного диапазона (350–950 нм), а также в 9 каналах коротковолнового диапазона (950–2350 нм). Для калибровки съёмочных систем ДЗЗ специалистами астрономической обсерватории RObotic Lunar Observatory (ROLO), США, на основе многочисленных наземных и космических измерений была разработана аналитическая модель спектрального излучения Луны — ROLO (311g), позволяющая рассчитывать средний по поверхности Луны коэффициент её спектральной яркости (КСЯ), используя выражение (Stone et al., 2020):

$$\ln(\rho_q) = \sum_{i=0}^3 a_{i,q} g^i + \sum_{l=1}^3 b_{j,q} \Lambda^{2l-1} + c_1 \lambda + c_2 \varphi + c_3 \Lambda \lambda + c_4 \Lambda \varphi + d_{1,q} e^{-g/p_1} + d_{2,q} e^{-g/p_2} + d_{3,q} \cos\left(\frac{g-p_3}{p_4}\right),$$

где ρ_q — КСЯ видимого диска для q -й длины волны модели ROLO 311g; a, b, c, d — постоянные модели 311g для соответствующих длин волн модели (Kieffer, Stone, 2005); p — постоянные

ная модели 311g; g — абсолютный фазовый угол на момент съёмки; φ, λ — селенографическая широта и долгота сенсора на момент съёмки; Λ — селенографическая долгота Солнца на момент съёмки.

В соответствии с работой (Stone et al., 2020) дополнительно выполняется приведение спектральной кривой КСЯ реголита с учётом брекчии к измерениям КСЯ на основе ROLO. После чего значение СПЭЯ видимого диска Луны рассчитывается по формуле:

$$L_{k,p} = \frac{1}{\pi D_p^2} \cdot \frac{\int \rho_p(\lambda) E(\lambda) S_k(\lambda) d\lambda}{\int S_k(\lambda) d\lambda} \cdot \frac{N_{k,p} \Omega_A}{\Omega_M},$$

где D_p — расстояние от Солнца до Луны для p -й съёмки, а. е.; $E(\lambda)$ — средняя солнечная экзoатмосферная плотность излучения (например, (Thuillier, 2003)); $S_k(\lambda)$ — функция относительной спектральной чувствительности k -го канала сенсора целевой аппаратуры МКА; $\rho_p(\lambda)$ — функция КСЯ видимого диска Луны, рассчитанная по модели ROLO 311g, для p -й съёмки целевой аппаратурой МКА; Ω_A — телесный угол пикселя сенсора «Аврора» КА «Аист-2Д», ср; $N_{k,p}$ — количество пикселей внутри границ лунного диска на изображении k -го спектрального канала для p -й съёмки; $\Omega_M = 6,418 \cdot 10^{-5}$ — телесный угол Луны, ср.

На рис. 6 приведены графики величин СПЭЯ, рассчитанных на основе аналитической модели в зависимости от фазового угла для различных спектральных каналов. Эти зависимости демонстрируют полиномиальное ослабление величины энергетической яркости с увеличением абсолютного значения фазового угла. В свою очередь, скатерограмма величин цифровых отсчётов и рассчитанных СПЭЯ, а также градуировочных характеристик демонстрируется на рис. 7. В табл. 2 приведены доверительные интервалы (с уровнем доверия 0,95) рассчитанных параметров абсолютной радиометрической калибровки.

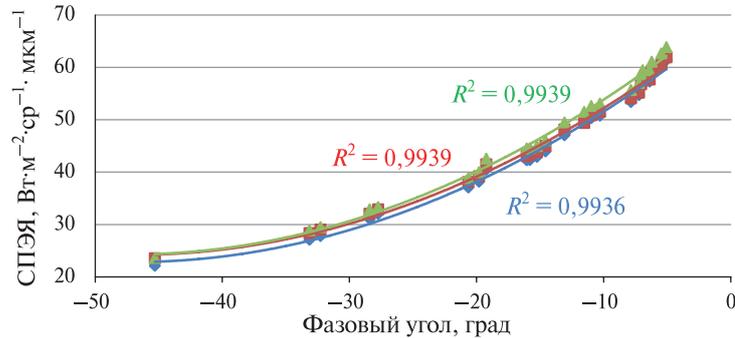


Рис. 6. Скатерограмма величин СПЭЯ, рассчитанных на основе модели ROLO 311g, в зависимости от фазового угла наблюдения для соответствующих (отмечены цветом) спектральных каналов КА «Аист-2Д»

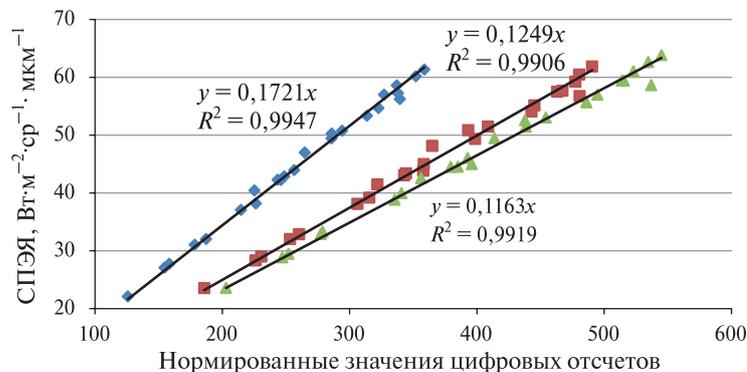


Рис. 7. Скатерограмма величин СПЭЯ, рассчитанных на основе модели ROLO 311g, в зависимости от средней яркости лунного диска для соответствующих (отмечены цветом) спектральных каналов КА «Аист-2Д»

Таблица 2. Доверительные интервалы (с уровнем доверия 0,95) параметров абсолютной радиометрической калибровки спектральных каналов сенсора «Аврора» КА «Аист-2Д» и СКО линейных регрессий

Спектральный канал	Мультипликативный фактор, Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹	СКО регрессии, Вт·м ⁻² ·ср ⁻¹ ·мкм ⁻¹
Синий	0,1721±0,00539	0,831
Зелёный	0,1163±0,00451	1,052
Красный	0,1249±0,00523	1,084

При этом оценку стабильности мультипликативного фактора чувствительности рассмотрим на основе следующего относительного критерия стабильности:

$$r_{k,p} = a_{k,p} / a^*$$

где $a^* = \text{med}(\{a_{k,p}\})$ — медианное значение для множества мультипликативных факторов.

На рис. 8 приведены значения критерия $r_{k,p}$ для множества снимков, демонстрирующие значения преимущественно в диапазоне 0,95–1,05. Соответственно, расчёт среднеквадратической ошибки относительного критерия позволяет судить о высокой стабильности градуировочной характеристики за рассматриваемый период съёмки: для синего канала ошибка составляет 1,74 %, для зелёного — 1,92 %, для красного — 2,08 %.

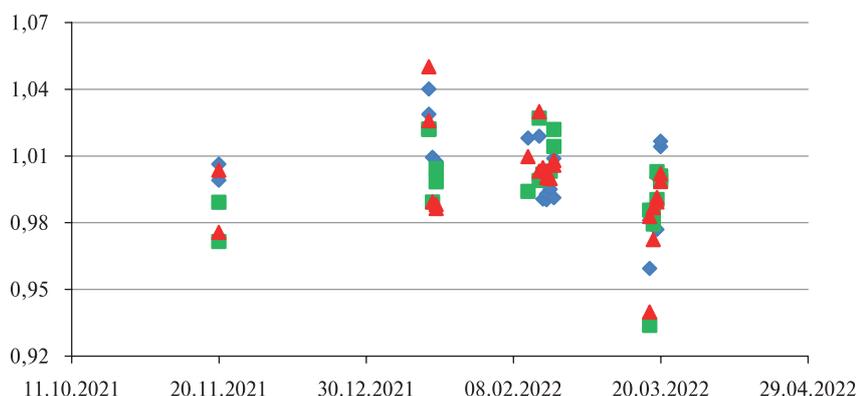


Рис. 8. Относительный критерий стабильности различных спектральных каналов (отмечены соответствующим цветом) для множества съёмок Луны съёмочной системой КА «Аист-2Д»

Анализ точности измерений СПЭЯ наземных полигонов

В рассматриваемый период наблюдения Луны дополнительно проводилась съёмка полигонов из состава сети RadCalNet (Bouvet et al., 2019), а также псевдоинвариантных полигонов Libya 4 и Niger 3. В общей сложности удалось выполнить более 20 съёмок. При этом только для 5 съёмок полигона GONA сети RadCalNet были соблюдены условия съёмки и доступны данные наземных измерений портала (<https://www.radcalnet.org>). Координаты и типы поверхности калибровочных полигонов RadCalNet представлены в табл. 3.

Таблица 3. Координаты и типы поверхности калибровочных полигонов

Название полигона	Координаты	Тип поверхности
Gobabeb	23,6° ю. ш., 15,12° в. д.	Гравийная равнина
Railroad Valley Playa	38,5° с. ш., 115,69° з. д.	Дно пересохшего озера
LaCrau	43,55° с. ш., 4,55° в. д.	Галечная почва с редким растительным покровом
Baotou Sands	40,87° с. ш., 109,69° в. д.	Песчаные дюны

С целью обогащения выборки наблюдений дополнительно были подобраны пары данных Landsat OLI (*англ.* Operational Land Imager) и Sentinel MSI (*англ.* Multispectral Instrument) (*табл. 4*), измерения СПЭЯ которых пересчитывались на основе соотношения кросскалибровки:

$$L = L_{ref} \left(\frac{D_{ref}}{D_A} \right)^2 \left(\frac{E_A}{E_{ref}} \right) \left(\frac{\cos \theta_A}{\cos \theta_{ref}} \right),$$

где L_{ref} — СПЭЯ, измеренная сенсором КА Landsat или Sentinel, Вт·м⁻²·ср⁻¹·мкм⁻¹; D_{ref} — расстояние от Солнца до Земли для подобранных данных КА Landsat или Sentinel, а. е.; D_A — расстояние от Солнца до Земли для данных КА «Аист-2Д», а. е.; E_{ref} — средняя солнечная экзоатмосферная плотность излучения спектрального канала КА Landsat или Sentinel, Вт·м⁻²·мкм⁻¹; E_A — средняя солнечная экзоатмосферная плотность излучения спектрального канала КА «Аист-2Д», Вт·м⁻²·мкм⁻¹; θ_{ref} — зенитный угол Солнца для данных КА Landsat или Sentinel; θ_A — зенитный угол Солнца для данных КА «Аист-2Д».

Таблица 4. Подобранные пары наблюдений КА Landsat и Sentinel, используемые для обогащения выборки

Полигон	Дата съёмки		
	«Аист-2Д»	Landsat	Sentinel
BTCN	02.02.2022	02.02.2022	02.02.2022
	10.02.2022	10.02.2022	10.02.2022
	26.02.2022	26.02.2022	25.02.2022
	06.03.2022	06.03.2022	04.03.2022
GONA	27.02.2022	22.02.2022	28.02.2022
	07.03.2022	10.03.2022	05.03.2022
LCFR	29.01.2022	28.01.2022	27.01.2022
	22.02.2022	21.02.2022	23.02.2022
Libya 4	05.02.2022	04.02.2022	06.02.2022
	01.03.2022	28.02.2022	—
	17.03.2022	16.03.2022	—
Niger 3	18.01.2022	18.01.2022	20.01.2022
	03.02.2022	03.02.2022	04.02.2022
	15.03.2022	15.03.2022	16.03.2022
	23.03.2022	23.03.2022	21.03.2022

При этом в рамках обработки данных также выполнялось нормирование величин цифровых отсчётов с учётом номинальных параметров работы аппаратуры, что обеспечивало условия съёмки Луны. На *рис. 9* (см. с. 38) приведена градуировочная характеристика, рассчитанная на основе кросскалибровки данных КА «Аист-2Д» и Sentinel по нормированным величинам цифровых отсчётов.

Для оценки точности градуировочной характеристики на основе результатов множества наблюдений наземных полигонов применялась следующая формула:

$$\varepsilon_k = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_j \left(\frac{DN_{k,j} - L_{k,j}/a_k}{DN_{k,j}} \right)^2} \times 100 \%,$$

где N — размер выборки, на основе которой оценивается точность; $L_{k,j}$ — величина СПЭЯ j -го наблюдения в k -м спектральном канале, рассчитанная на основе данных RadCalNet либо

пересчитанных значений энергетической яркости КА Landsat или Sentinel; $DN_{k,j}$ — нормированная величина цифрового отсчёта для j -го наблюдения в k -м спектральном канале данных КА «Аист-2Д».

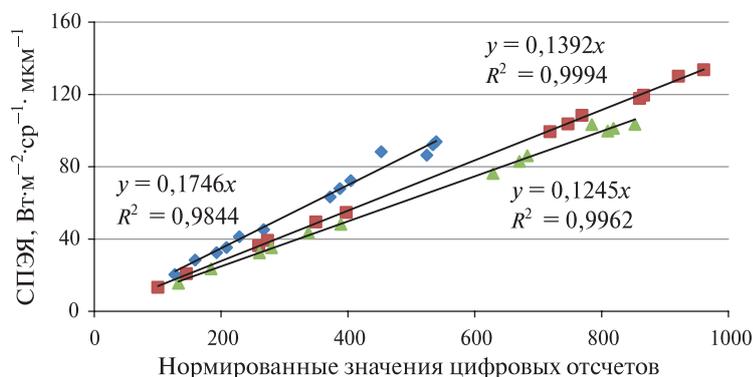


Рис. 9. Скатерограмма величин СПЭЯ, рассчитанных на основе кросскалибровки данных КА «Аист-2Д» и Sentinel, в зависимости от нормированных величин цифровых отсчётов для соответствующих (отмечены цветом) спектральных каналов

Таблица 5. Результаты оценки точности измерений СПЭЯ для различных методов калибровки относительно множества наблюдений наземных полигонов

Метод калибровки	Синий канал, %	Зелёный канал, %	Красный канал, %
Кросскалибровка по данным Landsat	4,20	4,27	1,85
Кросскалибровка по данным Sentinel	4,17	4,94	1,78
Калибровка на основе модели ROLO 311g	4,72	11,02	11,59

Таблица 6. Результаты оценки точности измерений СПЭЯ для различных методов калибровки относительно множества наблюдений Луны

Метод калибровки	Синий канал, %	Зелёный канал, %	Красный канал, %
Кросскалибровка по данным Landsat	3,51	10,82	9,71
Кросскалибровка по данным Sentinel	2,03	6,56	10,16
Калибровка на основе модели ROLO 311g	1,78	1,94	2,10

В табл. 5 приведены результаты оценки точности измерений с использованием градуировочных характеристик, рассчитанных на основе кросскалибровки по данным Landsat и Sentinel, а также на основе модели ROLO 311g. Кроме того, в табл. 6 приведены результаты валидации (оценки точности измерений СПЭЯ) градуировочных характеристик кросскалибровки на основе результатов наблюдений Луны.

Заключение

В рамках статьи демонстрируется результат использования съёмок Луны для оценки и верификации параметров абсолютной калибровки данных КА «Аист-2Д». Показана возможность применения открытых аналитических моделей спектральной яркости Луны для расчёта параметров градуировочных характеристик, а также оценки их стабильности. Применительно к данным МКА отмечена высокая стабильность мультипликативного фактора чувствительности — не хуже 2 %, а также СКО регрессий — около $1 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{мкм}^{-1}$. Для оценки корректности измерений СПЭЯ на основе градуировочных характеристик дополнительно была

выполнена съёмка наземных калибровочных полигонов, для которых значения СПЭЯ были пересчитаны с использованием методики кросскалибровки по данным наблюдений КА Landsat и Sentinel. Рассогласование измерений СПЭЯ составило 4,7–11,6 % в зависимости от спектрального канала. Достаточно существенные величины рассогласования могут быть в том числе обусловлены ошибками калибровки зарубежных КА (например, (Czapla-Myers et al., 2015)), поэтому в дальнейшем требуется дополнительная оценка точности градуировочной характеристики по результатам *in situ* измерений.

Вместе с тем полученные результаты свидетельствуют о возможности применения съёмки Луны, во-первых, для оценки стабильности оптико-электронных съёмочных систем отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ. Во-вторых — для обеспечения единства и сопоставимости измерений действующих группировок типовых КА ДЗЗ (в частности, спутников «Канопус-В») и перспективных многоспутниковых группировок, создаваемых в рамках Федеральной целевой программы «Сфера».

Таким образом, дальнейшее развитие настоящей работы целесообразно вести в следующих направлениях: применение рассмотренных в статье решений для калибровки и валидации данных перспективного создаваемого КА «Ресурс-ПМ», длительное регламентированное наблюдение Луны и наземных полигонов с использованием МКА «Аист-2Д» и других действующих российских КА ДЗЗ с целью объективной оценки точности измерений СПЭЯ и (при необходимости) разработки поправок аналитической модели в обеспечение уменьшения случайной ошибки модели (Meygret et al., 2017).

Литература

1. Васильев А. И., Стрёмов 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.
2. Васильев А. И., Ромайкин С. В., Коржманов А. В. Алгоритмы обработки изображений Луны для абсолютной калибровки съёмочных систем ДЗЗ // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2022. С. 23. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
3. Опытнo-технологический малый космический аппарат «Аист-2Д». Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2017. 324 с.
4. Стрёмов А. С., Васильев А. И., Коваленко В. П. Методика замещающей калибровки данных группировки КА «Канопус-В» на основе длительного наблюдения полигонов RadCalNet // Ракетно-косм. приборостроение и информац. системы. 2021. Т. 8. Вып. 4. С. 23–30. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.23.30.
5. Bouvet M., Thome K., Berthelot B. et al. RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range // Remote Sensing. 2019. V. 11. Article 2401. <https://doi.org/10.3390/rs11202401>.
6. Czapla-Myers J., McCorkel J., Anderson N. et al. The Ground-Based Absolute Radiometric Calibration of Landsat 8 OLI // Remote Sensing. 2015. V. 7. P. 600–626. <https://doi.org/10.3390/rs70100600>.
7. Dinguirard M., Slater P. N. Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors // Remote Sensing of Environment. 1999. V. 68(3). P. 194–205. DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00111-4.
8. Kieffer H. H. Photometric Stability of the Lunar Surface // Icarus. 1997. No. 130(2). P. 323–327. <https://doi.org/10.1006/icar.1997.5822>.
9. Kieffer H. H., Stone T. C. The Spectral Irradiance of the Moon // The Astronomical J. 2005. No. 129(6). P. 2887–2901. DOI: 10.1086/430185.
10. Markham B. L., Barsi J. A. Landsat-8 operational land imager on-orbit radiometric calibration // 2017 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). 2017. P. 4205–4207. DOI: 10.1109/igarss.2017.8127929.
11. Meygret A., Blanchet G., Colzy S., Mounier F., Gross-Colzy L., Buil C. Progress on Extra-terrestrial Target Based Calibration techniques using PLEIADES-HR satellites // Working Group on Calibration and Validation (WGCV): 41: Infrared Visible and Optical Sensors (IVOS). Tucson, 15–17 March 2017. 28 p.
12. Stone T. C., Kieffer H., Lukashin C., Turpie K. The Moon as a Climate-Quality Radiometric Calibration Reference // Remote Sensing. 2020. V. 12(11). Article 1837. DOI: 10.3390/rs12111837.

13. Thuillier G. The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureca missions // Solar Physics. 2003. V. 214(1). P. 1–22. DOI: 10.1023/a:1024048429145.
14. Wilson N., Greenberg J., Jumpasut A., Collison A., Weichelt H. Absolute Radiometric Calibration of Planet Dove Satellites, Flocks 2p & 2e. San Francisco, CA, USA: Planet Labs, 2017. 2 p.

Absolute radiometric calibration and validation of Aist-2D satellite data based on Moon imagery

A. I. Vasilyev¹, A. S. Stremov¹, V. P. Kovalenko¹, S. V. Romaikin¹, A. V. Korzhimanov²

¹ *Research Center for Earth Operative Monitoring, Moscow 127490, Russia*
E-mail: nova@ntsomz.ru

² *JSC SRC Progress, Samara 443009, Russia*

The article deals with the fundamental possibility of absolute radiometric calibration and validation of data from the Russian experimental and technological satellite Aist-2D on the basis of Moon observation. To do this, firstly, data collecting of the Moon was carried out in the period November 2021 – March 2022 and pre-processing of the resulting data was performed in terms of detecting and contouring the lunar disk, as well as estimating the average digital numbers for each spectral channel. Then, based on the values of the spectral reflectance of the Moon, the data was calculated using the ROLO 311g analytical model, calibration characteristics were calculated (RMS of regressions for spectral channels is about $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, as well as an assessment of the stability of the sensor was assessed — the deviation from the median value of the multiplicative factor is 2–3 % depending on the spectral channel. The third step, to assess the correctness of the measurements using the calculated multiplicative factor in the period January – March 2022, the data over RadCalNet test sites were collected, as well as the data over pseudo-invariant calibration sites Libya 4 and Niger 3. Considering that RadCalNet ground-based measurement data were available only for the Gobabeb test site, the sample was enriched using Landsat and Sentinel data for the same test sites, by recalculating the radiance with a cross-calibration technique. As a result, the estimates obtained demonstrate an absolute accuracy of spectral radiance measurements of 4.72–11.59 % (depending on the spectral channel) based on the calibration results with the Moon imagery data. At the same time, the validation of the cross-calibration results (using Sentinel data) based on the measured lunar spectral radiance gave 2.03–10.16 %, depending on the spectral channel.

Keywords: remote sensing, satellite, Aist-2D, absolute radiometric calibration, lunar reflectance, Moon observation, ROLO, RadCalNet test-sites, Landsat, Sentinel

Accepted: 14.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-30-41

References

1. Vasilyev A. I., Stremov A. S., Kovalenko V. P., Study of Resurs-P wide-swath multispectral equipment data applicability to spectrometric tasks, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 14, pp. 36–51 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-36-51.
2. Vasilyev A. I., Romaikin S. V., Korzhimanov A. V., Moon Image Processing Algorithms for Absolute Calibration of Remote Sensing Imaging Systems, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 20th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2022, p. 23 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
3. *Opytno-tekhnologicheskii malyi kosmicheskii apparat "AIST-2D"* (Experimental and technological small spacecraft "Aist-2D"), Samara: Izd. SamNTs RAN, 2017, 324 p. (in Russian).

4. Stremov A. S., Vasilyev A. I., Kovalenko V. P., Method of Vicarious Calibration of the Kanopus-V Satellite Constellation Data Based on Long-Term Observation of RadCalNet Polygons, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2021, Vol. 8, Issue 4, pp. 23–30 (in Russian), DOI: 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.23.30.
5. Bouvet M., Thome K., Berthelot B. et al., RadCalNet: A Radiometric Calibration Network for Earth Observing Imagers Operating in the Visible to Shortwave Infrared Spectral Range, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Article 2401, <https://doi.org/10.3390/rs11202401>.
6. Czapla-Myers J., McCorkel J., Anderson N. et al., The Ground-Based Absolute Radiometric Calibration of Landsat 8 OLI, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, pp. 600–626, <https://doi.org/10.3390/rs70100600>.
7. Dinguirard M., Slate P. N., Calibration of Space-Multispectral Imaging Sensors, *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 68(3), pp. 194–205, DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00111-4.
8. Kieffer H. H., Photometric Stability of the Lunar Surface, *Icarus*, 1997, Vol. 130(2), pp. 323–327, <https://doi.org/10.1006/icar.1997.5822>.
9. Kieffer H. H., Stone T. C., The Spectral Irradiance of the Moon, *The Astronomical J.*, 2005, Vol. 129(6), pp. 2887–2901, DOI: 10.1086/430185.
10. Markham B. L., Barsi J. A., Landsat-8 operational land imager on-orbit radiometric calibration, *IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, 2017, pp. 4205–4207, DOI: 10.1109/igarss.2017.8127929.
11. Meygret A., Blanchet G., Colzy S., Mounier F., Gross-Colzy L., Buil C., Progress on Extra-terrestrial Target Based Calibration techniques using PLEIADES-HR satellites, *Working Group on Calibration and Validation (WGCV): 41: Infrared Visible and Optical Sensors (IVOS)*, Tucson, 15–17 March 2017, 28 p.
12. Stone T. C., Kieffer H., Lukashin C., Turpie K., The Moon as a Climate-Quality Radiometric Calibration Reference, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12(11), Article 1837, DOI: 10.3390/rs12111837.
13. Thuillier G., The solar spectral irradiance from 200 to 2400 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer from the Atlas and Eureka missions, *Solar Physics*, 2003, Vol. 214(1), pp. 1–22, DOI: 10.1023/a:1024048429145.
14. Wilson N., Greenberg J., Jumpasut A., Collison A., Weichelt H., *Absolute Radiometric Calibration of Planet Dove Satellites, Flocks 2p & 2e*, San Francisco, CA, USA: Planet Labs, 2017, 2 p.