

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

УДК 528.835 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.2.44.55

**Радиометрическая калибровка  
мультиспектральной аппаратуры ДЗЗ по Луне и звездам**

**В. Е. Квитка**, к. т. н., *kva-vasja@yandex.ru*

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация*

**А. А. Никитин**, магистрант МФТИ, *andrei.naa@yandex.ru*

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация  
Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация*

**В. Д. Блинов**, *v\_blinov@mail.ru*

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация*

**А. С. Забиякин**, *optecs@samspace.ru*

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация*

**В. О. Прасолов**, *optecs@samspace.ru*

*Филиал АО «РКЦ «Прогресс»–НПП «ОПТЭКС», г. Москва, Зеленоград, Российская Федерация*

**Аннотация.** В статье рассмотрена проблема абсолютной полетной радиометрической калибровки космических камер для спутниковых систем ДЗЗ, имеющих пространственное разрешение 0,3–10 м и снимающих в спектральных каналах из области длин волн 0,4–1,1 мкм. Показано, что калибровка по наземным полигонам имеет неустранимые погрешности, неприемлемые с учетом возрастающих требований к радиометрии спутниковых снимков. Изучены различные способы определения эффективной чувствительности при летной эксплуатации съемочных систем: калибровка по Луне и по звездам. Определены основные требования к фотометрии эталонных площадок (калибровочных полигонов) на поверхности Луны с учетом особенностей ее свечения: оппозиционного эффекта, затенения при лунном затмении. На примере снимков реального космического аппарата показано, что абсолютная калибровка по Луне возможна и обеспечивает точность 7%. Сформированы требования к звездам, используемым при калибровке. Создана фотометрическая модель съемки звезд космическим аппаратом. Ожидаемая погрешность при данном способе калибровки составит не более 5%.

**Ключевые слова:** ДЗЗ, мультиспектральная аппаратура, радиометрическая калибровка, эффективная чувствительность

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

## Radiometric Calibration of Multispectral Cameras for Earth Remote Sensing by the Moon and Stars

**V. E. Kvitka**, *Cand. Sci. (Engineering)*, [kva-vasja@yandex.ru](mailto:kva-vasja@yandex.ru)

*Branch of Joint Stock Company "Space Rocket Centre "Progress"–Scientific and Production Enterprise "OPTEKS",  
Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

**A. A. Nikitin**, *master student of Moscow Institute of Physics and Technology*, [andrei.naa@yandex.ru](mailto:andrei.naa@yandex.ru)

*Branch of Joint Stock Company "Space Rocket Centre "Progress"–Scientific and Production Enterprise "OPTEKS",  
Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russian Federation*

**V. D. Blinov**, [v\\_blinov@mail.ru](mailto:v_blinov@mail.ru)

*Branch of Joint Stock Company "Space Rocket Centre "Progress"–Scientific and Production Enterprise "OPTEKS",  
Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

**A. S. Zabiyakin**, [optecs@samspace.ru](mailto:optecs@samspace.ru)

*Branch of Joint Stock Company "Space Rocket Centre "Progress"–Scientific and Production Enterprise "OPTEKS",  
Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

**V. O. Prasolov**, [optecs@samspace.ru](mailto:optecs@samspace.ru)

*Branch of Joint Stock Company "Space Rocket Centre "Progress"–Scientific and Production Enterprise "OPTEKS",  
Moscow, Zelenograd, Russian Federation*

**Abstract.** The article describes the problem of the absolute flight radiometric calibration of space cameras for Earth remote sensing satellite systems. These cameras have a spatial resolution of 0.3–10 m and their spectral channels are in the wavelength area of 0.4–1.1  $\mu\text{m}$ . It is shown that calibration by ground polygons has unrecoverable errors, which are unacceptable taking into account the increasing requirements for satellite imagery radiometry. Various methods for determining the effective sensitivity during the flight operation of imaging systems are studied: calibration by the Moon and by stars. The main requirements for the photometry of reference areas (calibration polygons) on the surface of the Moon are determined considering the features of its glow, for example opposition effect and shading during a lunar eclipse. On the example of images of a real spacecraft, it is shown that absolute calibration by the Moon is possible and provides the 7% accuracy. The requirements for the stars used in the calibration are formed. A photometric model for shooting stars by a spacecraft is created. The expected error with this method of calibration will be near 5%.

**Keywords:** Earth remote sensing, multispectral equipment, radiometric calibration, effective sensitivity

## Введение

В настоящее время наблюдается рост области применения спутниковых данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). И если раньше задачи, решаемые с помощью систем ДЗЗ среднего (1–10 м) и высокого (0,5–1 м) пространственного разрешения, требовали только традиционного визуального анализа спутниковых снимков, то сегодня важное значение приобрело восстановление яркостных и отражательных характеристик подстилающей поверхности из ее изображений. Ранее такие требования ставились только для обзорной метеорологической аппаратуры низкого разрешения. Картирование яркости подстилающей поверхности требуется для многих прикладных областей: сельского и лесного хозяйства, исследований океана и задач метеорологии. Описанная проблема актуализирует задачу превращения бортовой оптико-электронной аппаратуры (ОЭА) из традиционного съемочного инструмента в прибор с измерительными свойствами.

Выходной сигнал аппаратуры можно связать с энергетическими свойствами подстилающей поверхности через интегральную, абсолютную и эффективную чувствительности, определяемые по формулам (1), (2), (3) соответственно. Для задач ДЗЗ наиболее важна *эффективная* чувствительность [1] с размерностью (уровни АЦП · м<sup>2</sup> · ср/Дж). Только с ее помощью можно найти величину спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) поверхности без учета поправочных коэффициентов, связывающих спектры калибровочного источника и снимаемой поверхности. Последний зависит от свойств снимаемой поверхности и далеко не всегда может быть известен.

$$S_{\text{инт}} = \frac{U_{\text{вых}}}{T_{\text{нак}} \cdot \int_0^{\infty} B(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

$$S_{\text{абс}} = \frac{U_{\text{вых}}}{T_{\text{нак}} \cdot \int_a^b B(\lambda) d\lambda}, \quad (2)$$

$$S_{\text{эфф}} = \frac{U_{\text{вых}}}{T_{\text{нак}} \cdot L_{\text{эфф}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{T_{\text{нак}} \cdot \int_0^{\infty} s_{\text{отн}}(\lambda) \cdot B(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

где  $U_{\text{вых}}$  — выходной сигнал изображения (уровни АЦП) после вычитания темновой составляющей,  $T_{\text{нак}}$  — время накопления сигнала (с),  $a$ ,  $b$  — граничные длины волн спектрального диапазона чувствительности ОЭА (мкм),  $L_{\text{эфф}}$  — эффективная энергетическая яркость (ЭЭЯ) подстилающей поверхности (Вт/(м<sup>2</sup> · ср)) согласно [2],  $s_{\text{отн}}(\lambda)$  — относительная спектральная чувствительность (ОСЧ) ОЭА,  $B(\lambda)$  — СПЭЯ подстилающей поверхности (Вт/(м<sup>2</sup> · мкм · ср)).

Во время летной эксплуатации ОЭА характеристики ее чувствительности могут изменяться вследствие старения элементов оптико-электронного тракта и температурных колебаний [3]. Возникает задача проведения перекалибровки в полете, решаемая путем съемки наземных полигонов или небесных тел с известными яркостными свойствами.

Одной из главных проблем полетной калибровки по наземным полигонам является неопределенность спектрального пропускания атмосферы, что порождает погрешность определяемых величин: яркости поверхности Земли и эффективной чувствительности ОЭА. Есть много моделей атмосферы, но они имеют статистический характер. Определить спектр пропускания воздуха именно в момент съемки калибровочного полигона можно только с помощью дополнительных устройств: наземных активных средств зондирования атмосферы (например, лидаров) или спутникового мультиспектрального зондировщика (дополнительная камера, снимающая в узких диапазонах полос поглощения атмосферы, например система CAVIS). Далее, метеосостояния не всегда позволяют провести съемку. Описанные проблемы усложняют полетную калибровку и ограничивают объем снимаемых полигонов [4].

Необходимо обеспечить точность калибровки не хуже 5%, что соответствует современным требованиям к радиометрической информации [5]. Возникает предложение провести калибровку по небесным телам. Это позволит избавиться от неопределенностей, связанных с земной атмосферой и влиянием погодных условий. Рассмотрим для калибровки Луну и звезды. Планеты Солнечной системы исключим из исследования, так как учет характеристик их атмосфер сложнее полетной калибровки по наземным полигонам.

## Калибровка по Луне

Луна является наиболее близким небесным телом для Земли. Использование Луны в качестве средства калибровки требует точного знания ее СПЭЯ для конкретных условий наблюдения. При этом существуют специфические условия отражения излучения от поверхности. При калибровке по Луне необходимо учитывать геометрию системы «Солнце–Луна–Наблюдатель»: угол фазы и расстояния между элементами системы [6].

### Опыт калибровки Landsat 8

В 2013 году был запущен космический аппарат (КА) Landsat 8. Это был первый аппарат из линейки КА Landsat, для которого создали методику калибровки ОЭА по лунной поверхности. До этого большинство спутников данной серии калибровались по псевдоинвариантным калибровочным участкам Земли. За весь период эксплуатации был накоплен огромный опыт в создании общедоступных каталогов подходящих участков.

Со временем разработчики поняли, что Луна является отличным небесным объектом для калибровки Landsat 8. Началась лунная калибровка с проекта ROLO, запущенного с помощью гранта NASA 1995 года. Основные зависимости, полученные в проекте ROLO, связаны с фазой Луны. Также имеет место необходимость учета либраций Луны [7].

### Альbedo и фазовые изменения яркости отдельных участков поверхности

В случае дискретной фотометрии, когда изучается определенный участок лунной поверхности, отражательная способность зависит от нормального альbedo  $A_0$ . Интенсивность отраженного излучения (яркость площадки) будет иметь вид (4) [8]:

$$B(i, \varepsilon, \psi) = \frac{E_0}{\pi \cdot \cos(\varepsilon)} \cdot A_0 \cdot f(i, \varepsilon, \psi), \quad (4)$$

где  $i$  — угол падения света;  $\varepsilon$  — угол отражения (наблюдения);  $\psi$  — разность азимутов падающего и отраженного лучей;  $E_0$  — нормальная освещенность поверхности Солнцем; СПЭЯ изменяется

по закону, определяемому фотометрической функцией  $f(i, \varepsilon, \psi)$ . При этом  $f(0, 0, 0) = 1$ . В задачах лунной фотометрии используют фотометрические координаты: фазовый угол, фотометрические долготу и широту  $(\alpha, \beta, \gamma)$ .

Для данного набора параметров фотометрическая функция представляется как (5)

$$f(\alpha, \beta, \gamma) = \varphi(\alpha) \cdot D(\alpha, \beta, \gamma), \quad (5)$$

где  $\varphi(\alpha)$  — фазовая функция, описывающая составляющие фотометрической функции, не зависящие от фотометрических координат;  $D(\alpha, \beta, \gamma)$  задает глобальное распределение яркости по диску Луны, если исключить из рассмотрения вариации альbedo.

В практической фотометрии принято описывать глобальное распределение яркости с помощью эмпирической формулы Акимова (6) [8], графически представленной на рис. 1:

$$D(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cos^q(\beta) \left(\cos^{q+1}\left(\gamma - \frac{\alpha}{2}\right) - \sin^{q+1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}{\cos(\gamma) \left(1 - \sin^{q+1}\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)}, \quad (6)$$

где  $q$  — эмпирический параметр, соответствующий типу поверхности. Для ламбертовской поверхности  $q = 1$ . Для лунной поверхности  $q = 0,31\alpha$  на материках и  $q = 0,16\alpha$  на морях [9].

При разных фазовых углах  $\alpha$  различие между материковыми и морскими участками соответственно 1% при  $\alpha = 5^\circ$  и 6% при  $\alpha = 45^\circ$ .

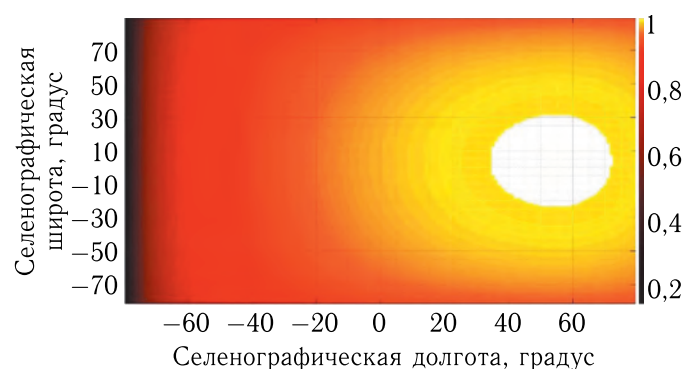


Рис. 1. Глобальное распределение яркости по диску Луны при фазовом угле  $5^\circ$  для поверхности Луны материкового типа

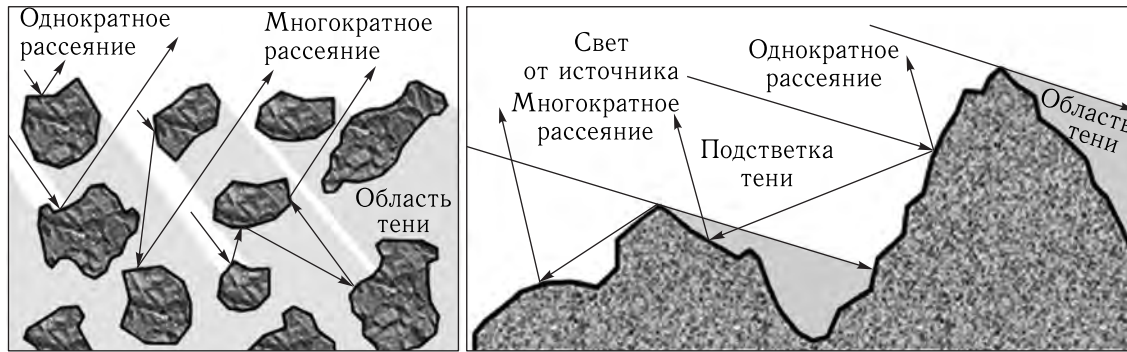


Рис. 2. Затенение и вторичная подсветка на частицах реголитоподобной среды (слева); затенение и вторичная подсветка на статистически шероховатой поверхности (справа)

Поэтому классификация участков лунной поверхности значима в понимании глобального распределения яркости по диску Луны. Фазовая функция формируется несколькими механизмами: теневым эффектом, многократным рассеянием между частицами реголита и элементами рельефа, ослабляющими теневой эффект, когерентным усилением обратного рассеяния.

В зависимости от масштаба рассмотрения лунной поверхности теневой эффект проявляется по-разному. В случае размеров микрон–миллиметр она является порошкообразной средой (реголит), (рис. 2 слева). Для масштабов декаметров (мезорельеф) лунная поверхность описывается случайными функциями (рис. 2 справа). В данной работе многократным рассеянием мезорельефа пренебрегают, но для частиц масштаба реголита это явление вносит заметный вклад. Для расчета фазовой функции применены формулы (7) для фазовых углов  $10^\circ$ – $50^\circ$  и (8) для фазовых углов  $1^\circ$ – $10^\circ$ :

$$\varphi(\alpha) = \exp(-\tau\alpha), \quad (7)$$

$$\varphi(\alpha) = \frac{\exp(-\tau\alpha)}{2 + \exp\left(-\frac{r}{l}\right)} \cdot \left( 2 + \frac{\exp\left(-\frac{r}{l}\right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{4\pi l}{\lambda} \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right)^2}} \right), \quad (8)$$

где  $\tau$  — эффективный коэффициент шероховатости (для материка  $\tau = 0,7$ ),  $r$  — эффективный размер частиц,  $\lambda$  — длина волн,  $l$  — характерный масштаб рассеяния света в среде.

Изучение фотометрической функции позволяет исследовать физические свойства участков лунной поверхности. Для сравнения фотометрических

характеристик различных районов Луны в идеальном случае нужно наблюдать их в одинаковых условиях [8].

### Применение методов радиометрической калибровки по лунным полигонам

С 2021 года проводится подготовка методов калибровки КА по данным дискретной фотометрии лунных участков. Выполняется оценка эффективной чувствительности ОЭА на примере околоземного малого КА «АИСТ-2Д». В работе используются сделанные КА «АИСТ-2Д» снимки Луны и экспериментальные данные по фотометрии Луны, полученные со спектрографов ГАИШ МГУ. ОЭА КА «АИСТ-2Д» работает в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) в спектральных каналах ПХ (0,58–0,8 мкм), МС1 (0,45–0,52 мкм), МС2 (0,53–0,60 мкм), МС3 (0,63–0,69 мкм). Следует отметить, что при съемке наземными спектрографами лунных полигонов используются лидары и им подобные системы, позволяющие учесть спектральное пропускание атмосферы. Сами атмосферные искажения незначительны, так как Луна наблюдается горными обсерваториями. Также при съемке лунных полигонов наземными спектрографами применяются эталонные звезды: спектрограф наводится на звезду с известным эталонным спектром свечения, нормированным на верхнюю границу атмосферы. Сравнение эталонного и фактического спектров звезды позволяет учесть искаженные атмосферой данные о лунных полигонах.

Для примера расчета используются данные спектрографов, полученные 20 октября 2021 года.

Таблица 1. Селенографические координаты лунных полигонов

Номер полигона	1	2	3	4	5	6
Широта, градус	14,8	24,23	-27,75	39,55	-9	-9,5
Долгота, градус	30,1	23,33	28,48	-18,09	7,89	18

Координаты полигонов показаны в табл. 1, полученные СПЭЯ — на рис. 3.

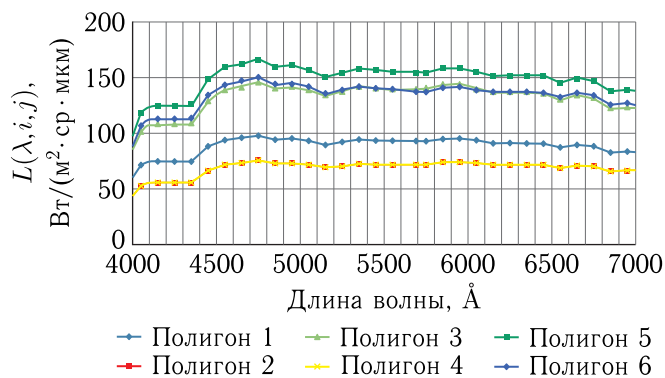


Рис. 3. Спектральная плотность энергетической яркости лунных полигонов

Полигоны на поверхности Луны отобраны таким образом, чтобы их однородные изображения, получаемые калибруемой аппаратурой ДЗЗ, занимали не менее 50 пикселей. В настоящей работе пространственное разрешение на поверхности Луны снимков КА «АИСТ-2Д» соответствует 3,5 км/пиксель в каналах МС1–МС3. Поэтому для калибровки данной аппаратуры были отобраны полигоны размером 20 × 20 км. Также на полученных снимках был определен темновой сигнал, использованный в дальнейших расчетах. Он соответствует 32 уровням АЦП или 3% от максимального сигнала (1023 уровня АЦП).

Определить ЭЭЯ (Вт/(м<sup>2</sup>·ср)) для участка лунной поверхности, соответствующего пикселю изображения с координатами  $(i, j)$  в  $k$ -м спектральном канале ОЭА, можно по (9):

$$L_{\text{эфф}}(k, i, j) = \int_0^{\infty} L(\lambda, i, j) \cdot s_{\text{отн}}(\lambda, k) \cdot d\lambda, \quad (9)$$

где  $L(\lambda, i, j)$  — СПЭЯ (Вт/(м<sup>2</sup>·ср·мкм)) участка лунной поверхности, соответствующего пикселю изображения с координатами  $(i, j)$  (рис. 3);  $s_{\text{отн}}(\lambda, k)$  — относительная спектральная чувствительность (ОСЧ) ОЭА для спектрального канала  $k$  (рис. 4).

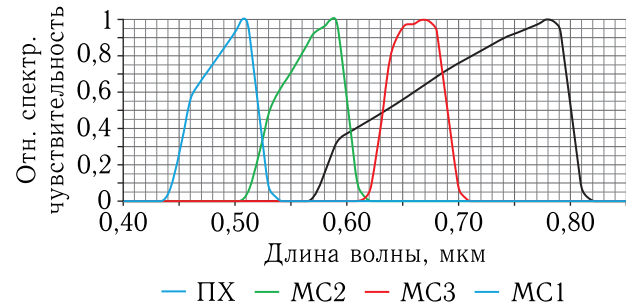


Рис. 4. Относительная спектральная чувствительность, используемая для расчета ЭЭЯ

Эффективное время экспозиции  $T_{\text{эфф}}(k)$  определяется по формуле (10):

$$T_{\text{эфф}}(k) = N_{\text{кшн}}(k) \cdot \frac{\delta(k)}{V}, \quad (10)$$

где  $N_{\text{кшн}}(k)$  — количество шагов накопления (КШН) в режиме временной задержки и накопления (ВЗН) в  $k$ -м спектральном канале (для съемки использовалось КШН 32, 16, 16 в каналах МС1, МС2, МС3 соответственно);  $\delta(k)$  — размер фоточувствительного элемента, 18 мкм в каналах МС1–МС3;  $V$  — скорость движения изображения (СДИ), 22 мм/с.

Эффективное время экспозиции: 26,18 мс для МС1 и 13,09 мс для МС2 и МС3. Для фоточувствительных элементов  $k$ -го спектрального канала выполняется усреднение сигнала по полигону или диску Луны, формула (11) (результаты показаны в табл. 2):

$$U_{\text{ср}}(k) = \frac{1}{N_{\text{полигон}}} \sum U(k, i, j), \quad (11)$$

где  $N_{\text{полигон}}$  — количество пикселей в усредняемом фрагменте изображения.

Осуществить переход от мощностных к интегральным по энергии яркостным величинам можно путем определения интегральной эффективной

Таблица 2. Данные для расчета эффективной чувствительности: сигнал на снимках от 29 мая 2021 года и ЭЭЯ полигонов с погрешностью расчета 3,5%

	Номер полигона	1	2	3	4	5	6
<b>МС1</b>	$L_{эфф}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	6,05	4,61	8,8	4,68	9,98	8,99
	$U_{ср}$ , уровни АЦП	73,83	72,47	127,88	70,64	122,74	128,35
<b>МС2</b>	$L_{эфф}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	6,87	5,05	10	5,01	11,02	9,4
	$U_{ср}$ , уровни АЦП	107,63	108,91	194,45	101,76	183,31	195,06
<b>МС3</b>	$L_{эфф}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	6,11	4,35	8,91	4,19	9,15	7,78
	$U_{ср}$ , уровни АЦП	90,83	93,62	166,11	89,84	161,17	165,56
$N_{полигон}$		50	44	46	44	50	40

энергетической яркости ИЭЭЯ (Дж/(м<sup>2</sup>·ср)) для  $k$ -го спектрального канала по формуле (12):

$$\Lambda_{ср}(k) = L_{эфф}(k) \cdot T_{эфф}(k). \quad (12)$$

Расчет эффективной чувствительности  $S_{лун}$  (ур. АЦП·ср·м<sup>2</sup>/Дж) соответствует методу наименьших квадратов вида  $y = ax$  (13). Полученные с погрешностью не более 7% для 10 серий съемок значения  $S_{лун}$  для каждого спектрального канала представлены на рис. 5.

$$S_{лун}(МС) = \frac{\sum_{x=1}^6 (U(МС) \cdot \Lambda_{эфф}(МС))}{\sum_{x=1}^6 (\Lambda_{эфф}(МС))^2} = \frac{\sum_{x=1}^6 (U(МС) \cdot L_{эфф}(МС))}{T_{эфф}(МС) \cdot \sum_{x=1}^6 (L_{эфф}(МС))^2}. \quad (13)$$

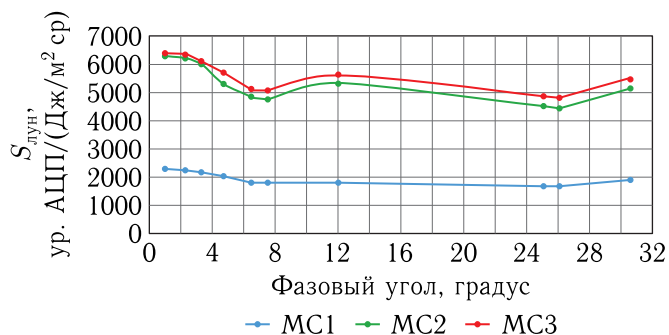


Рис. 5. Значения эффективной чувствительности для всех спектральных каналов

Для абсолютной радиометрической калибровки по Луне необходимо:

- Провести наблюдения при значениях фазового угла в диапазоне от 0,5 до 30 градусов и оценить значения яркости по всему видимому диску Луны. Найти участки, однородные согласно разрешению калибруемой аппаратуры для фиксированного фазового угла. По полученным данным выявить участки с одинаковым нормальным альбедо;
- при изменении фазового угла в районе полнолуния получить зависимости яркости полигонов Луны от фазового угла. Результатом наблюдения ожидаемо будет обратное рассеяние, то есть нелинейный рост яркости вблизи полнолуния.

Ожидаемая погрешность калибровки составит 7% (с учетом точности данных по СПЭЯ Луны 5%, погрешности измерения ОСЧ 2%, соотношения сигнал/шум не менее 100).

## Калибровка по звездам

Огромное количество звезд позволяет отобрать среди них опорные, по которым и проводится калибровка. Основные требования к опорным звездам:

- стабильность звездной величины во времени — световой поток должен сохранять свое значение с точностью лучшей, чем ожидаемая погрешность калибровки;

- измеренные с высокой точностью спектральная облученность от звезды ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ ) на верхней границе атмосферы (ВГА) или же по крайней мере ее радиационная температура и звездная величина;
- самая яркая и самая тусклая опорные звезды должны отличаться по облученности не менее чем в 5 раз. Это позволит выполнить измерения по широкому диапазону экспозиций и построить качественную светосигнальную характеристику;
- соотношение сигнал/шум на изображениях каждой звезды должно быть не менее 30.

Основными проблемами при калибровке ОЭА ДЗЗ по звездам является необходимость переориентации КА и малая яркость большинства звезд [10]. Известна калибровка по звездам ОЭА КА Pleiades [11]. Для данной группировки КА получен не только опыт радиометрической калибровки, но и уточнения функции передачи модуляции, так как она взаимосвязана с получаемой при съемке функцией рассеяния точки [12].

Проведем оценки соотношения сигнал/шум для звезд различной величины и определим необходимые условия съемки. Расчеты выполним для аппаратуры ДЗЗ среднего и высокого разрешения на примере систем ШОК-ПМ и «Элегия», создаваемых для КА «Ресурс-ПМ». Съемка должна проводиться в традиционном режиме сканирования.

Для расчетов нужно получить спектральную плотность потока ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм})$ ), создаваемого звездой на ВГА. Выполним пересчет из известных значений звездной величины. Звезда Вега, взятая за точку отсчета яркостей звезд, имеет величину  $M_0 = 0$  и создает освещенность на ВГА  $\Phi_0 = 2,54 \cdot 10^{-6}$  люкс. Пренебрежем узкими полосами поглощения, порождаемыми плазмой во внешней части звезды. Примем Вегу абсолютно черным телом (АЧТ), ее температуру оценим по формуле (14), описанной в [13]. Вега является белой звездой, ее показатель цвета  $B - V = 0$ .

$$T_0 = 4600 \cdot \left( \frac{1}{1,7 + 0,92 \cdot (B - V)} + \frac{1}{0,62 + 0,92 \cdot (B - V)} \right) = 10\,125 \text{ К.} \quad (14)$$

Тогда искомая спектральная плотность потока  $E(M_0, T_0, \lambda)$  определяется по (15):

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= 683 \cdot \int_0^\infty E(M_0, T_0, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda = \\ &= 683 \cdot A(M_0, T_0) \cdot \int_0^\infty \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \times \\ &\times \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T_0}} - 1} \cdot V(\lambda) d\lambda, \end{aligned} \quad (15)$$

где  $V(\lambda)$  — кривая видности глаза; 683 — коэффициент пересчета, ( $\text{Лм}/\text{Вт}$ );  $E(M_0, T_0, \lambda)$  — спектральная облученность, создаваемая Вегой на ВГА;  $A(M_0, T_0)$  — безразмерный нормировочный коэффициент, подбираемый численно для выполнения равенства (15).

Именно такой световой поток и попадет на входной зрачок калибруемой ОЭА. Для звезды величины  $m$  и температурой  $T$  получим уравнение перехода (16). Его физический смысл: звезда величины  $m = 5$  создает освещенность в 100 раз меньше, чем Вега:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty E(m, T, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda = \\ = 10^{-0,4 \cdot m} \int_0^\infty E(M_0, T_0, \lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (16)$$

Рассчитанная спектральная облученность от Веги показана на рис. 6. Результаты расчетов хорошо сходятся с найденными в литературе

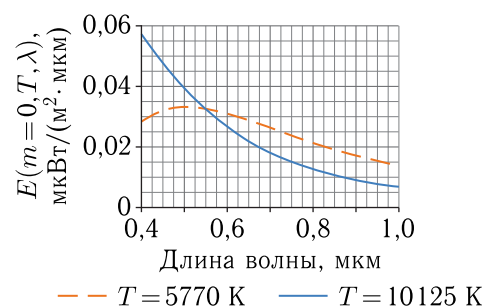


Рис. 6. Спектральная облученность, создаваемая на входном зрачке съемочной аппаратуры звездами величины  $m = 0$  с температурами 10 125 К (Вега) и 5770 К (температура Солнца). Спектр АЧТ с  $T = 5770$  К подобен солнечному



данными: свет от Веги имеет спектральную плотность  $3,44 \cdot 10^{-2}$  мкВт/(м<sup>2</sup>·мкм) на длине волны 0,556 мкм [14].

Чтобы избежать проблем, связанных с «растеканием» изображения звезды на несколько пикселей, будем производить расчет не для одиночного пикселя, а для окна размером  $a \cdot a$  пикселей. При этом кружок рассеяния ОЭА должен гарантированно помещаться в окне суммирования. Необходимо выполнение условия (17):

$$(a(k) - 1) \cdot \delta(k) \geq 1,22 \geq \lambda_{\text{ср}}(k) \cdot \frac{f}{D}, \quad (17)$$

где  $\lambda_{\text{ср}}(k)$  — центр спектрального диапазона с номером  $k$  калибруемой аппаратуры;

$\delta(k)$  — размер пикселя для фотоприемника;

$D/f$  — относительное отверстие объектива.

Определим размеры окна суммирования для спектральных диапазонов систем ДЗЗ среднего (ШОК-ПМ) и высокого («Элегия») разрешения. Результаты показаны в табл. 3.

Рассчитаем суммарный сигнал, накопленный в пикселях. Скорость движения изображения примем минимально возможной, КШН в режиме ВЗН — максимально возможным для фотоприемника. Спектральная плотность энергии  $w(m, k, \lambda)$  (Дж/мкм), облучившей окно из  $a \cdot a$  пикселей,

задается для эффективного времени экспозиции  $T_{\text{эфф}}(k)$  формулой (18):

$$w(m, k, \lambda) = T_{\text{эфф}}(k) \cdot 0,25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot E(m, T, \lambda) \cdot \tau_{\text{сист}}(k, \lambda), \quad (18)$$

где  $\tau_{\text{сист}}(k, \lambda)$  — спектральный коэффициент пропускания системы «объектив + светофильтр».

Сигнал (электроны), накопленный в сумме по всем пикселям, попадающим на изображение звезды, определяется (19) для спектрального диапазона  $k$ :

$$U(m, k) = \int_0^{\infty} \eta(k, \lambda) \cdot w(m, k, \lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} d\lambda, \quad (19)$$

где  $\eta(k, \lambda)$  — спектральная квантовая эффективность фотоприемника,  $h$  и  $c$  — постоянная Планка и скорость света соответственно.

Значения в электронах переводятся по (20) в суммированный по окну  $a \cdot a$  пикселей цифровой сигнал (уровни АЦП) с учетом коэффициента  $\alpha_{\text{ацп}}(k) = (2R - 1)/C_{\text{зар}}(k)$ :

$$U_{\text{цифр}}(m, k) = \alpha_{\text{ацп}}(k) \cdot U(m, k), \quad (20)$$

где  $C_{\text{зар}}(k)$  — зарядовая вместимость одиночного пикселя фотоприемника, электроны,  $R$  — радиометрическое разрешение ОЭА, бит/пиксель.

Таблица 3. Спектральные диапазоны, кружок рассеяния и необходимый размер окна суммирования для систем ДЗЗ среднего (СР) и высокого (ВР) разрешения

Спектральный диапазон и его границы, мкм	Размер пикселя, мкм		Диаметр кружка рассеяния, мкм		Размер окна $a$ , пиксели			
	СР	ВР	СР	ВР	СР	ВР		
<b>ПХ</b>	0,5–0,8	0,5–0,8	9	9	17,1	16,9	3	3
<b>ПХ6</b>	–	0,5–0,8	–	6	–	16,9	–	4
<b>МС1</b>	0,45–0,51	0,4–0,45	18	36	12,6	11,1	2	2
<b>МС2</b>	0,51–0,58	0,45–0,51	18	36	14,3	12,5	2	2
<b>МС3</b>	0,63–0,69	0,51–0,58	18	36	17,3	14,2	2	2
<b>МС4</b>	0,77–0,89	0,58–0,62	18	36	21,8	15,6	3	2
<b>МС5</b>	0,71–0,75	0,63–0,69	18	36	19,2	17,2	3	2
<b>МС6</b>	0,76–0,8	0,7–0,74	18	36	20,5	18,7	3	2
<b>МС7</b>	0,85–0,89	0,77–0,89	18	36	22,9	21,6	3	2
<b>МС8</b>	0,89–0,96	0,86–1,05	18	36	24,3	24,2	3	2

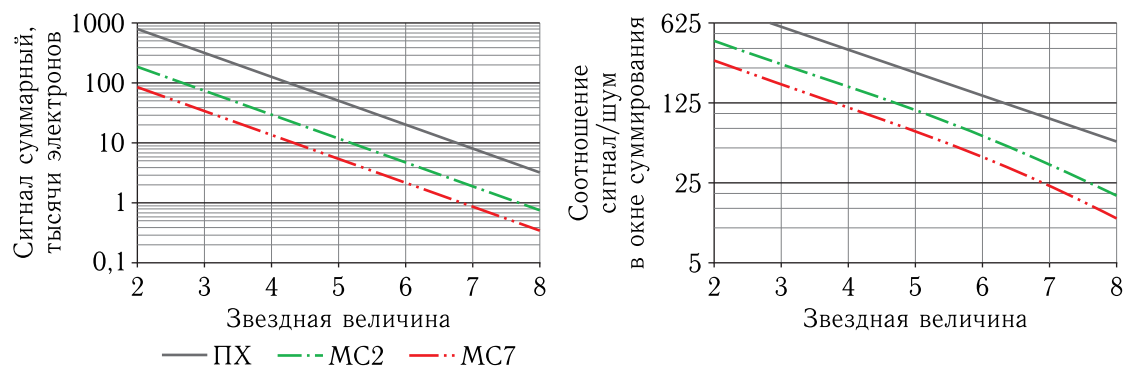


Рис. 7. Зависимость накопленного сигнала и ОСШ от звездной величины для СР

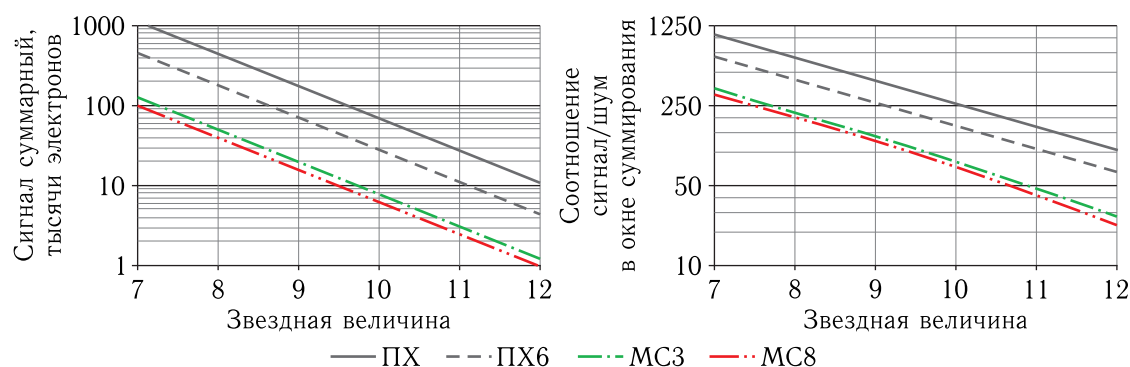


Рис. 8. Зависимость накопленного сигнала и ОСШ от звездной величины для ВР

Найдем соотношение сигнал/шум (ОСШ) по (21). При суммировании сигнала шум считывания  $N(k)$  уменьшится в  $\sqrt{a^2} = a$  раз по сравнению с шумом для одиночного пикселя:

$$SNR(m, k) = \frac{U(m, k)}{\sqrt{U(m, k) + \left(\frac{N(k)}{a(k)}\right)^2}}. \quad (21)$$

На рис. 7–8 показаны зависимости сигнала и ОСШ от звездной величины в разных спектральных диапазонах для систем ДЗЗ среднего (СР) и высокого (ВР) разрешений. Спектральный состав излучения соответствует наиболее распространенным звездам (спектр подобен солнечному: АЧТ с температурой 5770 К).

Из проведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. При калибровке на больших КШН (32–64 в СР и ВР) предпочтительно выполнять съемку звезд с величинами +6...+10 для исключения переэкспозиции снимков. При калибровке на малых КШН (4–16 в СР и ВР) необходимо использовать СДИ, близкую к макси-

мальной (15–20 мм/с в СР и 130–150 мм/с в ВР); в этом случае рекомендуется съемка звезд с величинами 0...+3.

2. Съемка звезд должна выполняться в режиме «без сжатия» со включенной функцией выравнивания чувствительности по полю зрения и вычитанием темновой составляющей. Перед абсолютной калибровкой необходимо произвести полетную относительную калибровку по наземным местностям (обычное сканирование однородных участков, например пустынь, или же относительная калибровка методом скольжения).

### Сравнение чувствительностей, полученных при калибровках по Луне и по звездам

Вычислим связь энергетических свойств объекта и выходного сигнала при съемке звезд. Говорить об энергетической яркости ( $Вт/(м^2 \cdot ср)$ ) для точечного источника бессмысленно. Опишем (22)

излучение от звезды интегральной по времени эффективной облученностью (ИЭО) ОЭА (Дж/м<sup>2</sup>):

$$W_{\text{эфф}}(m, k) = T_{\text{эфф}}(k) \cdot \int_0^{\infty} s_{\text{отн}}(k, \lambda) \cdot E(m, T, \lambda) d\lambda. \quad (22)$$

Определим «чувствительность к точечному источнику»  $S_{\text{точ}}(k)$  (ур. АЦП · м<sup>2</sup>/Дж) как отношение выходного сигнала к ИЭО (23). С учетом (18)–(20) формула (22) примет вид (24):

$$S_{\text{точ}}(k) = \frac{U_{\text{цифр}}(m, k)}{W_{\text{эфф}}(m, k)}, \quad (23)$$

$$S_{\text{точ}}(k) = \frac{\alpha_{\text{ацп}}(k) \cdot \int_0^{\infty} \eta(k, \lambda) \cdot w(m, k, \lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} d\lambda}{\frac{4}{\pi \cdot D^2} \cdot \int_0^{\infty} s_{\text{отн}}(k, \lambda) \cdot \frac{w(m, k, \lambda)}{\tau_{\text{сист}}(k, \lambda)} d\lambda}. \quad (24)$$

Задачи ДЗЗ связаны со съемкой протяженных, а не точечных объектов. Нужно связать  $S_{\text{точ}}(k)$  с искомой эффективной чувствительностью ОЭА  $S_{\text{эфф}}(k)$  (ур. АЦП · ср · м<sup>2</sup>/Дж), описывающей отклик камеры на свет от протяженного объекта. Тогда  $S_{\text{эфф}}(k)$  определяется для поверхности по (25). В знаменателе формулы (25) ЭЭЯ (Вт/(м<sup>2</sup>·ср)) выражена через спектральную плотность энергии на пикселе  $w(k, \lambda)$  (Дж/мкм), где  $\Pi = \pi$  стерадиан:

$$S_{\text{эфф}}(k) = \frac{\alpha_{\text{ацп}}(k) \cdot \int_0^{\infty} \eta(k, \lambda) \cdot w(k, \lambda) \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} d\lambda}{4 \cdot \left(\frac{F}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{\Pi} \cdot \left(\frac{1}{\delta(k)}\right)^2 \cdot \int_0^{\infty} s_{\text{отн}}(k, \lambda) \cdot \frac{w(k, \lambda)}{\tau_{\text{сист}}(k, \lambda)} d\lambda}. \quad (25)$$

Учтем соотношение (26) для относительной спектральной чувствительности:

$$s_{\text{отн}}(k, \lambda) = \frac{\lambda \cdot \tau_{\text{сист}}(k, \lambda) \cdot \eta(k, \lambda)}{\max(\lambda \cdot \tau_{\text{сист}}(k, \lambda) \cdot \eta(k, \lambda))|_{\lambda=0}}. \quad (26)$$

Преобразуем (25) в (27) и подтвердим важный факт: эффективная чувствительность  $S_{\text{эфф}}(k)$  не зависит от спектра источника света, по которому проводится калибровка.  $S_{\text{эфф}}(k)$  можно определять

как по формуле для измерения (3), так и по формуле для расчета (27):

$$S_{\text{эфф}}(k) = \frac{\alpha_{\text{ацп}}(k) \cdot \Pi}{4 \cdot h \cdot c} \cdot \left(\frac{D}{F}\right)^2 \cdot (\delta(k))^2 \times \max(\lambda \cdot \tau_{\text{сист}}(k, \lambda) \cdot \eta(k, \lambda))|_{\lambda=0}. \quad (27)$$

Аналогичный результат получается для «чувствительности к точечному источнику»  $S_{\text{точ}}(k)$ . Формула (28) позволяет из результата съемки звезд  $S_{\text{точ}}(k)$  найти  $S_{\text{эфф}}(k)$ . Множитель  $\Pi/\pi = 1$  (ср) описывает переход от безразмерного  $\pi$  (геометрического) к  $\Pi$  стерадиан:

$$S_{\text{эфф}}(k) = \frac{\Pi}{\pi} \cdot \left(\frac{\delta(k)}{F}\right)^2 \cdot S_{\text{точ}}(k). \quad (28)$$

*Погрешность калибровки по звездам.*

Основными источниками погрешности калибровки по звездам являются:

- неопределенность данных по спектральному составу света, излучаемого звездами;
- погрешность наземных измерений ОСЧ спектральных каналов;
- зашумленность изображения звезд, снятого при калибровке;
- изменение ОСЧ в процессе летной эксплуатации КА.

Первую погрешность можно минимизировать тщательным выбором звезд для калибровки. Точность спектрофотометрии Веги и некоторых других звезд составляет 1% [14]. Наземные измерения ОСЧ имеют точность ~2%. Подбор звезд для калибровки обеспечивает погрешность от зашумленности ~1%. Четвертая погрешность является неустранимой, так как изменения ОСЧ аппаратуры можно только обнаружить в процессе летной эксплуатации, но не измерить с высокой точностью. Суммарная ожидаемая погрешность калибровки по звездам составит около 5%.

## Заключение

Проведенные работы показали, что:

- возможно проведение полетной калибровки путем съемки Луны и звезд. Предлагаемый метод лишен недостатков полетной калибровки по наземным полигонам;

- калибровка по лунным полигонам требует точного определения углов в системе «Солнце–Луна–КА»: яркость площадок зависит от взаимного расположения тел;
- калибровка по звездам менее требовательна к угловым параметрам, но подразумевает знание функции рассеяния точки для калибруемой системы;
- более высокая точность реализуется при звездной калибровке, так как имеют место погрешности лунной фотометрии, связанные с опозиционным эффектом;
- проведенная обработка снимков Луны, сделанных МКА «Аист-2Д», подтвердила возможность калибровки съемочной аппаратуры по лунным полигонам;
- предлагаемые способы калибровки могут быть применены в мультиспектральных съемочных системах ДЗЗ как среднего, так и высокого разрешений;
- ожидаются погрешности порядка 5 % для калибровки по звездам и порядка 7 % для калибровки по Луне, что подтверждает целесообразность предлагаемых решений.

## Список литературы

1. Алтынов А.Е., Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А.Ф. Спектрометрирование ландшафта. Учеб. пособ. для студентов М.: Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010. 120 с.
2. Трофимов Д.О., Гектин Ю.М., Зорин С.М., Зайцев А.А. Метрологические и методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2018, т. 5, вып. 2. С. 26–33.
3. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, №2. С. 123–137.
4. Терехов С.И., Никонов О.А., Ермаков В.А., Кобельков Н.О., Некрасов В.В. О совершенствовании системы радиометрической калибровки орбитальной группировки космической системы «Канопус-В» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2020, т. 178, №5. С. 16–25.
5. Панфилов А.С., Гаврилов В.Р., Саприцкий В.И. Условия подготовки и проведения абсолютных радиометрических измерений с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли // Исследование Земли из космоса, 2014, №1. С. 85–91.
6. Шевченко В.В. Луна и ее наблюдения. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 192 с.
7. Stone T. C., Kieffer H. H., and Becker K. J. Modeling the Radiance of the Moon for On-orbit Calibration // Proc. SPIE 5151, 2003. P. 463–470.
8. Шкуратов Ю.Г. Луна далекая и близкая. Харьков: ХНУ, 2006. 182 с.
9. Великодский Ю.И. Влияние альбедо и рельефа на закон распределения яркости по диску Луны. Харьков. Дисс... канд. физ.-мат. наук, 2002.
10. Chun X. A flux calibration method for remote sensing satellites using stars // Journal of Infrared and Millimeter Waves. 36. 10.11972/j.issn.1001-9014.2017.05.012.
11. Meygret A., Latry C., Kelbert A, Blanchet G. On-orbit star-based radiometric and spatial calibration of PLEIADES HR optical sensors // Доклад на конференции H-RODA, 18–22, November 2019, ESRIN, Frascati.
12. Boreman G.D. Modulation transfer function in optical and electro-optical systems. Bellingham, Washington: SPIE press, 2001.
13. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Фотометрическая модель звездного датчика ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2019, т. 16, №5. С. 75–84.
14. Бурнашев В.И., Бурнашева Б.А. Фотометрия и спектрофотометрия звезд и галактик. Симферополь: ООО «Антиква», 2016. 384 с.