

УДК 629.78

О. В. Луць<sup>1</sup>, Г. А. Борщева<sup>1</sup>, Е. Д. Ярмольчук<sup>1</sup>, А. А. Манойленко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное»  
имени М. К. Янгеля»,*

<sup>2</sup>*Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **НАЗЕМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЛЕТНОЙ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Наведено опис пропонованого наземного забезпечення польотного та експлуатаційного радіометричного калібрування оптичного корисного навантаження. Сформульовано вихідні положення і припущення, які прийняті при розробці алгоритмів калібрування. Дано визначення основних величин і кількісні співвідношення, які використовуються. Запропоновано алгоритм розрахунку енергетичної яскравості випромінювання при зйомці тестових об'єктів. Наведено приклад розрахунку калібрувальних характеристик спектральних каналів корисного навантаження і проведена оцінка похибки розрахунку.

*Ключові слова:* космічний апарат, калібрування оптичного корисного навантаження.

Приведено описание предлагаемого наземного обеспечения полетной и эксплуатационной радиометрической калибровки оптической полезной нагрузки. Сформулированы исходные положения и допущения, принятые при разработке алгоритмов калибровки. Даны определения основных величин и используемые количественные соотношения. Предложен алгоритм расчета энергетической яркости излучения при съемке тестовых объектов. Приведен пример расчета калибровочных характеристик спектральных каналов полезной нагрузки и проведена оценка погрешности расчета.

*Ключевые слова:* космический аппарат, калибровка оптической полезной нагрузки.

A description of the proposed ground support for flight and operational radiometric calibration of the optical payload is given. Initial positions and assumptions adopted during

the development of calibration algorithms are formulated. The definitions of basic quantities and used quantitative ratios are given. An algorithm for calculating the energy brightness of the radiation when shooting test objects is proposed. An example of calculating the calibration characteristics of the spectral channels of the payload is given, and an estimate of the calculation error is made.

*Key words: spacecraft, optical payload calibration.*

**Постановка задачі.** Конечной целью космической многоспектральной съемки поверхности Земли является получение значений коэффициентов отражения (альbedo) наземных объектов (точек) земной поверхности в определенных спектральных диапазонах электромагнитного излучения. На основе полученных значений альbedo наземных объектов в различных спектральных полосах могут быть решены различные тематические задачи потребителей. Значения альbedo могут быть рассчитаны, исходя из знания следующих величин:

- кодов яркости элементов изображения;
- калибровочной характеристики оптической полезной нагрузки (ОПН) космического аппарата (КА);
- физических параметров условий проведения съемки (освещенности и параметров среды распространения излучения).

Для обеспечения конкурентоспособности создаваемых космических систем (КС) "Січ-2-1" и "Січ-2М", в технических заданиях на разработку задается требование, чтобы выходная продукция систем содержала информацию об энергетической яркости снимаемой поверхности, приходящей на входную апертуру сканера (мощности отраженного светового излучения, приходящего от единицы площади снимаемой поверхности в телесном угле, равному одному стерadianу).

Техническим заданием на создание КС "Січ-2М" также предъявляется требование к точности отображения энергетической яркости снимаемой поверхности в выходной продукции (допускается погрешность отображения не более 5 %).

Для выполнения этого требования при изготовлении ОПН космического аппарата проводится экспериментальное определение калибровочной характеристики - зависимости выходных кодов чувствительных элементов фотоприемной структуры ОПН от энергетической яркости, приходящей на входную апертуру ОПН.

При транспортировке, запуске и в течение срока эксплуатации КА эта зависимость может измениться. Поэтому необходимо проведение соответствующих измерений и расчетов калибровочной характеристики чувствительности спектральных каналов ОПН после запуска КА (первичная после-стартовая калибровка) и эксплуатационная (калибровка в течение всего срока эксплуатации).

Проведение таких работ возложено на наземные средства контроля характеристик космической системы (НСК ХКС). Они должны обеспечить уточнение калибровочной характеристики ОПН КА в полете.

**Описание предлагаемого наземного обеспечения полетной и эксплуатационной радиометрической калибровки ОПН.** Уточнение калибровочной характеристики ОПН в полете предполагается проводить путем:

- съемки тестовых объектов;
- измерений физических параметров при съемке (плотности потока излучения Солнца, прошедшего атмосферу и падающего на тестовые объекты, а также плотности потока излучения, отраженного тестовыми объектами);
- расчетов действительных значений калибровочной характеристики ОПН с учетом значений плотности потока излучения Солнца на верхней границе атмосферы Земли для даты съемки, координат тестовых объектов и измеренных значений физических параметров при съемке.

Наземное обеспечение послестартовой и эксплуатационной радиометрической калибровки определенного спектрального канала ОПН при использовании приборов, измеряющих плотность потока энергии, обеспечивается средствами контрольно-калибровочных полигонов (ККП), имеющих в своем составе:

тестовые объекты (ТО), имеющие изотропную отражательную способность (обеспечивающую близкое к ламбертовому пространственное распространение отраженной от ТО энергетической яркости) в пределах верхней полусферы;

приборы, измеряющие плотность потока энергии (например, пиранометры).

Используемые при радиометрической калибровке приборы должны быть аттестованы в части измерительных характеристик, тестовые объекты – в части отражательных характеристик.

До проведения сеансов съемки тестовых объектов должны быть определены их географические координаты.

Чувствительным элементом пиранометра является датчик, накрытый прозрачной полусферой. Каждый пиранометр должен быть снабжен светофильтром с полосой пропускания, соответствующей диапазону длин волн соответствующего калибруемого канала полезной нагрузки КА. Вид пиранометра приведен на рис.1.

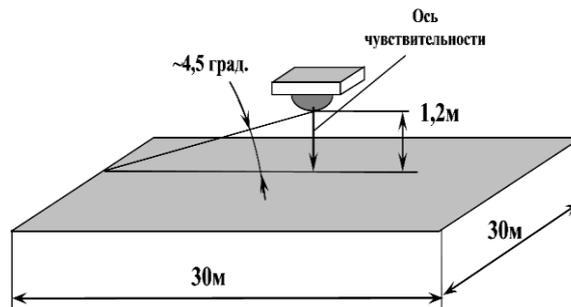


**Рис. 1. Пиранометр фирмы Keer & Zonen**

Для измерения плотности потока энергии, пришедшей от Солнца к тестовому объекту, прибор помещают осью чувствительности в направлении

Солнца. Для измерения плотности потока энергии, отраженной от тестового объекта, прибор помещают вблизи центра ТО на подвесе. Ось пиранометра располагается перпендикулярно к плоскости тестового объекта, то есть в направлении надира. Высота подвеса должна обеспечивать максимальную степень перекрытия тестовым объектом поля зрения пиранометра с целью максимального исключения бокового подсвета.

В частности, для проведения калибровки сканера МСУ, входящего в состав КА "Січ-2-1" (с проекцией шага чувствительного элемента на поверхность Земли  $\sim 7,8\text{м}$  при съемке в надир), предполагается обеспечить расположение прибора над тестовым объектом при измерении энергетической яркости, отраженной от тестового объекта (рис. 2).



**Рис.** Ошибка! Текст указанного стиля в документе отсутствует.. **Положение пиранометра над тестовым объектом**

**Исходные положения и допущения.** При разработке алгоритмов калибровки ОПН приняты следующие положения:

источником излучения является Солнце;

– для калибровки каждого спектрального канала ОПН используется тестовый объект (мира), обладающий изотропной отражательной способностью, подчиняющейся закону Ламберта, в диапазоне длин волн соответствующего калибруемого канала полезной нагрузки КА;

– размер тестового объекта определяется характеристиками ОПН и обеспечивает исключение бокового подсвета прибора, измеряющего плотность потока энергии [0].

При разработке алгоритмов приняты следующие допущения:

распространение энергии излучения в атмосфере подчиняется закону Бугера–Ламберта – Бера [0];

зависимости коэффициента пропускания (прозрачности) атмосферы от длины прохождения лучей от Солнца к тестовому объекту и от тестового объекта к космическому аппарату, одинаковы [0], [0], [0];

отношение выходного кода к энергетической яркости излучения на входной апертуре ОПН одинаково для всех фотопреобразователей определенного спектрального канала.

**Определения основных величин и используемые количественные соотношения.** Поток излучения (лучистый поток, интенсивность потока

излучения) – это величина энергии, переносимой полем в единицу времен через данную площадку. Поток излучения имеет размерность  $Вт = Дж/с$ .

Поверхностная плотность потока энергии (освещенность, светимость) – это величина потока, приходящегося на единицу площади. Поверхностная плотность потока энергии имеет размерность  $Вт \cdot м^{-2}$ . Если площадка освещается потоком, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической освещенности или облученности. Если поток излучается площадкой, то поверхностная плотность потока энергии будет иметь смысл энергетической светимости.

Коэффициент отражения (альbedo) поверхности – это отношение энергетической светимости к энергетической освещенности в определенном спектральном диапазоне.

Телесный угол заданного конуса – это величина, равная отношению площади поверхности, вырезанной на сфере конусом, к квадрату радиуса сферы. Телесный угол измеряется в стерадианах (ср). Телесный угол полусферы равен  $2\pi$  ср.

Сила излучения (энергетическая сила света) – это поток излучения, приходящийся на единицу телесного угла, в пределах которого он распространяется. Сила излучения измеряется в  $Вт \cdot ср^{-1}$ .

Энергетическая яркость – это величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла. Энергетическая яркость имеет размерность  $Вт \cdot ср^{-1} м^{-2}$ .

Аналогично определяются единицы измерения, отнесенные к спектральному диапазону излучения, носящие названия спектральных плотностей соответствующих энергетических единиц.

Например, спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) – это величина потока, излучаемого единицей площади в единицу телесного угла, приходящая на единицу длины волн излучения в заданном диапазоне. Единица измерения СПЭЯ -  $Вт \cdot ср^{-1} м^{-3}$  или  $Вт \cdot ср^{-1} м^{-2} нм^{-1}$ .

Закон Бугера–Ламберта–Бера определяет интенсивность потока излучения после прохождения его через поглощающую среду:

$$I(m) = I_0 \cdot \exp(-k_\lambda \cdot m),$$

где  $I$  – интенсивность входящего потока излучения;  $I_0$  - интенсивность исходящего потока излучения;  $k_\lambda$  – показатель поглощения среды;  $m$  - толщина слоя поглощения.

Для случая прохождения света в атмосфере в качестве толщины слоя поглощения принимают безразмерную единицу, называемую "относительная масса атмосферы", которая определяется отношением длины пути прохождения света в атмосфере к условному значению высоты атмосферы, измеряемому по нормали к поверхности Земли.

При прохождении излучения под углом места к горизонту, равным  $\varphi$ , относительная масса атмосферы определяется по формуле:  $m = \frac{1}{\sin(\varphi)}$ .

Если показатель поглощения атмосферы равен  $\tau$ , то поверхностная плотность потока энергии излучения Солнца, приходящая на поверхность тестового объекта, расположенного на Земле, будет равна:

$$A(m) = W_{sc} \cdot \exp[-\tau \cdot m(\alpha)].$$

Плотность потока энергии, отраженной тестовым объектом:

$$E = C \cdot \exp[-\tau \cdot m(\beta)],$$

где  $C$  – плотность потока энергии излучения,  $C = A(m) \cdot \rho$ ;  $\rho$  – альbedo тестового объекта.

Поток энергии, отраженный ламбертовским тестовым объектом, распространяется равномерно в верхней полуплоскости (в телесном угле, равном  $2 \cdot \pi$  стерadians). В этом случае энергетическая яркость, приходящая к входной апертуре ОПН, равна [0]:

$$E_l = \frac{C \cdot \exp[-\tau \cdot m(\beta)]}{\pi}.$$

**Методика расчета энергетической яркости излучения тестового объекта при съемке. Используемые схемы.** На рис. 3 приведена схема съемки тестового объекта. Схематично показаны положения Солнца, космического аппарата, участка съемки и тестового объекта, след трассы на поверхности Земли, угол  $\alpha$  места Солнца и угол  $\beta$  места КА при съемке тестового объекта, расстояние  $L$  по ортодромии между тестовым объектом и подспутниковой точкой КА.

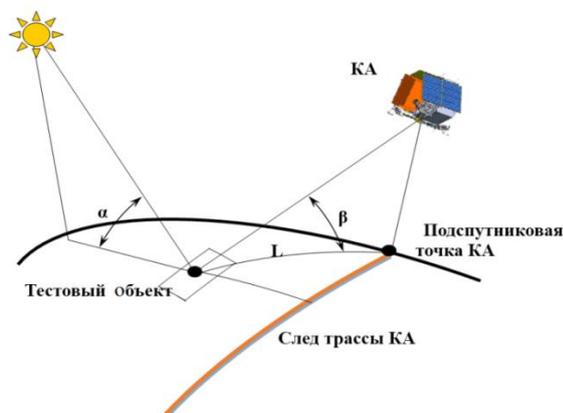


Рис. 3. Схема съемки тестового объекта

На рис. 4 приведена схема распространения солнечного излучения во время съемки тестового объекта. На рис. 4 стрелками обозначено:  $h$  – высота

орбиты;  $W_{sc}$  – плотность потока энергии в калибруемом диапазоне длин волн, приходящая от Солнца к верхней границе атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>;  $A$  – плотность потока энергии в калибруемом диапазоне длин волн, приходящая от Солнца к тестовому объекту, Вт/м<sup>2</sup>;  $C$  – плотность потока энергии в калибруемом диапазоне длин волн, отраженная тестовым объектом, Вт/м<sup>2</sup>;  $E$  – плотность потока энергии в калибруемом диапазоне длин волн, отраженная единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере, Вт/м<sup>2</sup>.

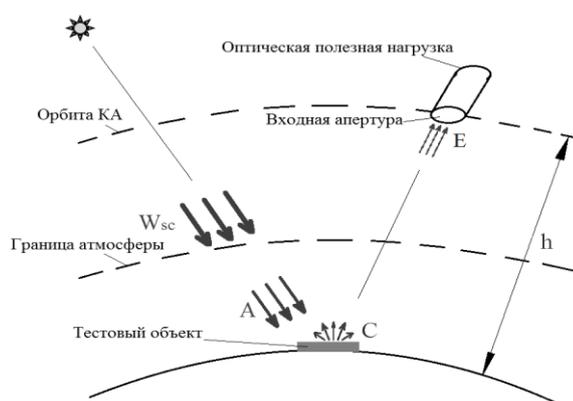


Рис. 4. Схема распространения солнечного излучения

**Используемые константы.** При разработке методики используются следующие константы:

$E_{const}$  – солнечная постоянная (плотность потока энергии Солнца на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца), принимается равной 1367,6 Вт/м<sup>2</sup> [0], [0], [0], [0];

$a$  – длина большой полуоси Земли, принимается равной 6378137 м [0];

$f$  – коэффициент, учитывающий полярное сжатие Земли, принимается равным 1/298,257223563 [0].

**Исходные данные.** По заявке НСК ХКС для проведения полетной и эксплуатационной радиометрической калибровки определенного спектрального канала ОПН должна быть проведена съемка тестового объекта. От наземного информационного комплекса (НИК) должны быть получены файлы космического снимка и аннотационной информации к снимку.

Из файла аннотационной информации к космическому снимку должны быть получены следующие исходные данные:

- дата съемки;
- $\varphi_{12}, \lambda_{12}$  – координаты (широта и долгота) КА при съемке начальной строки кадра (участка с ТО), градусы;
- $\varphi_{22}, \lambda_{22}$  – координаты (широта и долгота) КА при съемке конечной строки кадра, градусы;
- $h_1$  – высота орбиты КА при съемке начальной строки кадра, м;
- $h_2$  – высота орбиты КА при съемке конечной строки кадра, м;
- $\alpha$  – угол места Солнца, градусы.

Из файла космического снимка должен быть получен код пикселя, максимально близкого к центру тестового объекта (КОД). В результате проведения полевых работ во время съемки тестового объекта от ККП должны быть получены следующие исходные данные:

$A$  – плотность потока энергии излучения Солнца, пришедшей от Солнца к тестовому объекту, Вт/м<sup>2</sup>;

$C$  – плотность потока энергии излучения, отраженной тестовым объектом, Вт/м<sup>2</sup>.

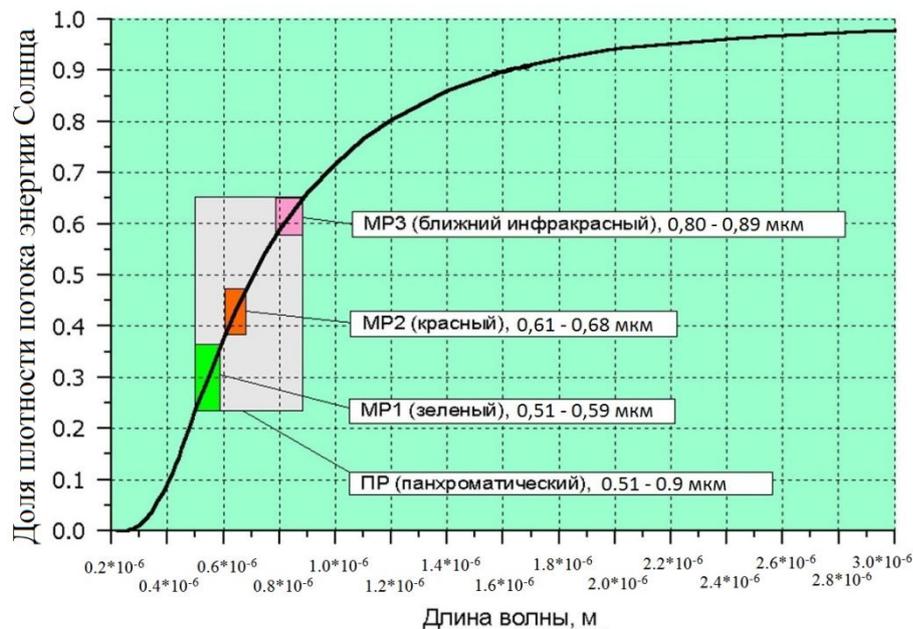
Для варианта цветной миры могут быть использованы приборы без светофильтров, для варианта миры белого цвета следует использовать приборы со светофильтрами.

Из формуляра ОПН должны быть получены значения границ длин волн калибруемого спектрального диапазона  $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ .

На официальном сайте NASA ([ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi](http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi)) должно быть найдено значение множителя delta для расстояния от Солнца до ТО, исходя из знания географических координат тестового объекта ( $\varphi_{11}$ ,  $\lambda_{11}$ ) и даты его съемки.

При проведении расчетов следует использовать функцию  $W(\lambda)$  распределения плотности потока энергии Солнца, приходящейся на диапазон длин волн от 0 до  $\lambda$  в оптическом диапазоне [0], [0].

График функции  $W(\lambda)$  изображен на рис. 5. Здесь также указаны диапазоны длин волн и соответствующие доли относительных частей плотности потока энергии Солнца для спектральных каналов ОПН космического аппарата "Січ-2-1".



**Рис. 5.** Зависимость доли плотности потока энергии Солнца, приходящейся на диапазон длин волн от 0 до текущего значения

**Последовательность расчетов.** Расчет энергетической яркости излучения в калибруемом диапазоне длин волн, приходящей от тестового объекта к входной апертуре оптической полезной нагрузки, проводится в такой последовательности:

1. Расчет плотности потока энергии Солнца на верхней границе атмосферы в день съемки тестового объекта с заданными координатами и с учетом расстояния до Солнца, Вт/м<sup>2</sup>:

$$E_d = E_{\text{const}} \cdot \frac{1}{\text{delta}^2}. \quad (1)$$

2. Расчет долей  $W(\lambda_{\text{min}})$  и  $W(\lambda_{\text{max}})$  плотности потока энергии Солнца, приходящихся на длины волн левой и правой границ калибруемого диапазона соответственно, путем интерполяции значений функции  $W(\lambda)$ , график которой приведен на рис.5.

3. Расчет плотности потока энергии Солнца в калибруемом диапазоне длин волн, приходящего от Солнца к верхней границе атмосферы, Вт/м<sup>2</sup>:

$$W_{\text{sc}} = E_d \cdot [W(\lambda_{\text{max}}) - W(\lambda_{\text{min}})] = E_d \cdot [W_2 - W_1]. \quad (2)$$

4. Расчет эксцентриситета эллипсоида Земли:

$$e = \sqrt{f - (2 - f)}. \quad (3)$$

5. Расчет широты положения КА при съемке центральной строки кадра, градусы:

$$\phi_k = \frac{\phi_{12} + \phi_{22}}{2}. \quad (4)$$

6. Расчет долготы положения КА при съемке центральной строки кадра, градусы:

$$\lambda_k = \frac{\lambda_{12} + \lambda_{22}}{2}. \quad (5)$$

7. Расчет высоты полета КА при съемке центральной строки кадра, градусы:

$$h_k = \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (6)$$

8. Расчет радиуса эллипсоида Земли на средней широте между координатами тестового объекта и КА, м:

$$R_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot (\sin(\frac{\phi_{11} + \phi_k}{2}))^2}}. \quad (7)$$

9. Расчет расстояния по ортодромии между тестовым объектом и подспутниковой точкой, м:

$$L = R_1 \cdot \arctg\left(\frac{\sqrt{(\cos(\phi_k) \cdot \sin(\lambda_k - \lambda_{11}))^2 + (\cos(\phi_{11}) \cdot \sin(\phi_k) + \cos(\phi_{11}) \cdot \cos(\phi_k) \cdot \cos(\lambda_k - \lambda_{11}))^2}}{\sin(\phi_{11}) \cdot \sin(\phi_k) + \cos(\phi_{11}) \cdot \cos(\phi_k) \cdot \cos(\lambda_k - \lambda_{11})}\right). \quad (8)$$

10. Расчет угла места КА во время съемки тестового объекта, радианы:

$$\beta = \arctg\left(\frac{(hk + R_1) \cdot \cos\left(\frac{L}{R_1}\right) - R_1}{(hk + R_1) \cdot \sin\left(\frac{L}{R_1}\right)}\right). \quad (9)$$

На основании измеренной плотности потока энергии Солнца  $A$ , облучающей тестовый объект (энергетической освещенности тестового объекта), и плотности потока энергии Солнца, приходящей от Солнца к верхней границе атмосферы, выполняется расчет относительной оптической толщины атмосферы, выраженной из закона Бугера–Ламберта–Бера:

$$\tau = -\ln\left(\frac{A}{W_{sc}}\right) \cdot \sin(\alpha). \quad (10)$$

11. Расчет относительной массы атмосферы в направлении от тестового объекта к КА [5]:

$$m = \frac{1}{\sin(\beta)}. \quad (11)$$

12. Расчет плотности потока энергии, отраженной единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере, Вт/м<sup>2</sup>:

$$E = C \cdot \exp(-\tau \cdot m). \quad (12)$$

13. Расчет энергетической яркости, приходящей к входной апертуре ОПН [0], Вт/(м<sup>2</sup>·ср):

$$E_l = \frac{C \cdot \exp(-\tau \cdot m)}{\pi}. \quad (13)$$

Этому значению энергетической яркости будет соответствовать значение кода в выходной продукции системы (КОД).

Если используемые фотопреобразователи обладают линейной характеристикой преобразования потока излучения, накопленного за время интегрирования энергетической освещенности в выходное напряжение, и

используемый аналого-цифровой преобразователь имеет линейную характеристику, то из полученного соотношения энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН и кода выходного сигнала можно рассчитать значение младшего разряда выходного кода:

$$E_2 = E_1 / \text{КОД}.$$

С использованием этой характеристики величина энергетической яркости излучения на входной апертуре ОПН может быть рассчитана для каждой точки полученного снимка путем умножения этого значения на соответствующее значение кода.

Проверка линейности преобразования при полете КА может быть осуществлена в результате проведения многократной калибровки при различных значениях углов места КА и Солнца. При этом может быть получена фактическая зависимость кода чувствительного элемента фотоприемной структуры ОПН от энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН.

На основании изложенного предлагается в качестве калибровочной характеристики спектральных каналов ОПН использовать значения энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН, соответствующие единицам младших разрядов выходных кодов яркости каждого канала выходной продукции космической системы.

**Расчет калибровочных характеристик спектральных каналов полезной нагрузки.** В качестве примера проведены расчеты энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН, соответствующие единицам младших разрядов выходных кодов яркости (цены младшего разряда) для каждого спектрального канала сканера МСУ. Исходные данные и результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные данные и результаты расчета**

Спектральный диапазон канала, мкм	0,51-0,59	0,61-0,68	0,8-0,89	0,51- 0,9
Альbedo снятой поверхности	0,8			
Коэффициент пропускания атмосферы	0,8			
Угол места Солнца, градусы	70			
Угол места КА, градусы	90			
Плотность потока энергии излучения Солнца, пришедшей от Солнца к тестовому объекту, Вт/м <sup>2</sup>	140,0	140,5	84,0	458,2
Энергетическая яркость излучения на входной апертуре ОПН, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср)	28,52	28,62	17,12	93,34
Цена младшего разряда выходного кода, Вт/(м <sup>2</sup> ·ср·КОД)	0,1150	0,1154	0,0690	0,3764

**Оценка погрешности расчета энергетической яркости излучения ГО при съемке.** Методическая погрешность определения плотности потока

энергии излучения в калибруемом диапазоне длин волн, отраженной единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере (12), определяется по формуле [0]:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\partial E}{\partial E_{\text{const}}} \cdot \delta E_{\text{const}}\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial A} \cdot \delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial E}{\partial C} \cdot \delta C\right)^2}, \quad (14)$$

где  $\frac{\partial E}{\partial E_{\text{const}}}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial A}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial C}$  – частные производные функции нескольких переменных по каждой из переменных соответственно ( $E_{\text{const}}$  – солнечной постоянной,  $A$  – плотности потока энергии, пришедшей от Солнца к тестовому объекту,  $C$  – плотности потока энергии, отраженной тестовым объектом);  $\delta E_{\text{const}}$ ,  $\delta A$ ,  $\delta C$  – погрешности знания переменных, приняты равными 0,01.

Расчет методической погрешности проводится в такой последовательности:

1) Получение функции для расчета плотности потока энергии излучения в калибруемом диапазоне длин волн, отраженной единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере, зависящей от переменных  $E_{\text{const}}$ ,  $A$ ,  $C$ .

Для этого подставим последовательно в формулу (12) выражения (1), (2), (10), (11). После подстановки функция  $E$  принимает вид:

$$E = C \cdot \exp\left(\ln\left[\frac{A \cdot \text{delta}^2}{E_{\text{const}} \cdot (W_2 - W_1)}\right] \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)}\right). \quad (15)$$

2) Расчет частных производных  $\frac{\partial E}{\partial E_{\text{const}}}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial A}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial C}$  функции  $E$ :

$$Q1 = \frac{\partial E}{\partial E_{\text{const}}} = \frac{C \cdot \exp\left(\frac{\ln\left[\frac{A \cdot \text{delta}^2}{E_{\text{const}} \cdot (W_1 - W_2)}\right] \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\beta)}\right) \cdot \sin(\alpha)}{E_{\text{const}} \cdot \sin(\beta)}, \quad (16)$$

$$Q2 = \frac{\partial E}{\partial A} = \frac{C \cdot \exp\left(\frac{\ln\left[\frac{A \cdot \text{delta}^2}{E_{\text{const}} \cdot (W_1 - W_2)}\right] \cdot \sin(\alpha)}{\sin \beta}\right) \cdot \sin(\alpha)}{A \cdot \sin(\beta)}, \quad (17)$$

$$Q3 = \frac{\partial E}{\partial C} = \exp\left(\frac{\ln\left[\frac{A \cdot \text{delta}^2}{E_{\text{const}} \cdot (W_1 - W_2)}\right] \cdot \sin(\alpha)}{\sin(\beta)}\right). \quad (18)$$

3) Расчет методической погрешности определения плотности потока энергии излучения в калибруемом диапазоне длин волн, отраженной единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере, Вт/м<sup>2</sup>:

$$\Delta E = \sqrt{[Q1 \cdot \delta E_0]^2 + [Q2 \cdot \delta A]^2 + [Q3 \cdot \delta C]^2}. \quad (19)$$

Расчет относительной погрешности определения плотности потока энергии излучения в калибруемом диапазоне длин волн, отраженной единицей площади тестового объекта, с учетом потерь в атмосфере, % :

$$Z = \frac{\Delta E}{E} \cdot 100\% . \quad (20)$$

4) Расчет энергетической яркости излучения в калибруемом диапазоне длин волн, пришедшую от ТО к входной апертуре ОПН, с учетом рассчитанной погрешности [0], Вт/(м<sup>2</sup>·ср):

$$E_{ист} = \frac{(E \pm \Delta E)}{\pi} . \quad (21)$$

Если погрешности задания солнечной постоянной, плотности потока энергии, приходящейся от Солнца к тестовому объекту и отраженной тестовым объектом, равны 1%, то рассчитанное значение относительной погрешности расчета энергетической яркости излучения в калибруемом диапазоне длин волн, пришедшей от ТО к входной апертуре ОПН КА, с учетом потерь в атмосфере, составит 1,7 %.

**Выводы.** Разработана информационная технология (математическая модель и методика расчета), позволяющая рассчитать энергетическую яркость излучения, пришедшую от тестового объекта к входной апертуре ОПН в калибруемом спектральном диапазоне, и соответствующую погрешность.

Предлагается в качестве калибровочной характеристики спектральных каналов полезной нагрузки использовать значения энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН, соответствующие единицам младших разрядов выходных кодов яркости каждого канала выходной продукции космической системы.

После проведения многократных синхронных со съемкой измерений при различных значениях углов места КА и Солнца с помощью разработанного алгоритма может быть получена фактическая зависимость кода на выходе ОПН от энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН.

Использование калибровочных характеристик даст возможность потребителям выходной продукции системы рассчитывать альбеда снятых объектов и решать тематические задачи.

Методика будет использована при разработке специального программного обеспечения расчета калибровочных характеристик чувствительности спектральных каналов ОПН КА "Січ-2-1".

## Библиографические ссылки

1. Бибчук Л.Г., Богачев Ю.В., Заказнов Н.П. Прикладная оптика: Учеб. пос. для приборостроительных вузов. – М., 1988. – 312 с.
2. Всемирная система геодезических параметров Земли WGS 84. Система геоцентрических координат. Основные положения.
3. В.К. Жуков. Теория погрешностей технических измерений. – Томск: Изд-во Томского политехн. Ун-та, 2009. – 180 с.
4. ГОСТ 7601-78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.
5. Джакония В. Е., Гоголь А. А., Друзин Я.В. Телевидение: Учебник для вузов. – М., 2002. – 640 с.
6. Л.М. Атрошенко, Г.А. Борщева, Н.Н. Горобец, О.В. Луць, Е.Д. Ярмольчук. Послестартовая и эксплуатационная энергетическая калибровка орбитальных сенсоров оптического диапазона высокого разрешения // Украинский метрологический журнал. – 2017, № 3. – С. 21 – 31.
7. М.В. Шатунова, А.Н. Рублев, Л.Р. Дмитриева - Араго. Метод расчета потоков солнечного излучения в системе Земля – атмосфера // Труды гидрометеорологического научно – исследовательского центра Российской Федерации. Вып. Физика атмосферы и прогноз погоды. Под. ред. д-ра физ.-мат. наук Л. Р. Дмитриевой - Араго. № 344, 010. – С. 21 – 36.
8. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат. – 1984. – 751 с.
9. Скляр Ю.А. Солнечная постоянная (состояние исследований) // Исследование Земли из космоса. – 1994. № 4. – С. 96–110.
10. Способ определения калибровочного коэффициента для калибровки оптического спутникового сенсора высокого пространственного разрешения в абсолютных энергетических единицах. Патент ВУ 15950 С1 от 2012.06.30. МПК G 01J 1/10, G 01D 18/00. Авторы: [Кацев И.Л.](#), [Прихач А. С.](#), [Зеге Э. П.](#)
11. Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. – С. Пб. – 2007. – 152 с.
12. Frohlich C., Lean J. The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976 // Geophys. Res. Lett. 1998. Vol. 25. № 23. P. 4377 – 4380.
13. Solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. STD.ASTM E490 REV A - ENGL 2000.

*Надійшла до редколегії 15.09.2019*