

УДК 520.82:520.624/520.6.07

Инструментальный фотометрический стандарт для бортовых оптико-электронных приборов космических систем мониторинга околоземного пространства

Еремин Е.О.*, Харламов Г.Ю.

*Особое Конструкторское бюро Московского энергетического института,
ОКБ МЭИ, ул. Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия*

**e-mail: e.o.eremin@gmail.com*

Аннотация

В статье вводится понятие инструментального фотометрического стандарта, применяемого при обработке информации с бортовых оптико-электронных приборов (ОЭП), рассматриваются особенности его формирования. Использование данного стандарта позволяет на основе методов системного анализа с заданной точностью оценивать энергетические характеристики конкретного ОЭП в различных фоно-сигнальных условиях и режимах работы.

Приведены выражения для преобразования между системными энергетическими единицами измерения и единицами, принятыми в астрономической фотометрии. Рассмотрены базовые фотометрические и спектрофотометрические каталоги, используемые при построении инструментального фотометрического стандарта бортовых ОЭП видимого и инфракрасного диапазонов оптического излучения. Графически приведены фотометрические полосы рассмотренных звёздных каталогов. Кратко рассмотрены способы проведения фотометрических измерений с цифровых кадров,

сформированных бортовыми ОЭП. Представлены методики формирования выборок звёздных стандартов для построения аппроксимирующих моделей инструментальных звёздных величин для различных фоно-сигнальных условий. Областью применения инструментального фотометрического стандарта бортовых ОЭП являются космические системы мониторинга околоземного пространства на этапах лётных испытаний и эксплуатации.

Ключевые слова: бортовой оптико-электронный прибор, инструментальная звёздная величина, стандартная звёздная величина, фоно-сигнальные условия.

Введение

В настоящее время оценивание энергетических параметров бортовых оптико-электронных систем реализуется на этапе автономных испытаний с использованием испытательных стендов, имитирующих условия космического пространства [1, 2] (температурные, радиационные, фоно-сигнальная обстановка и т.д.) На этапах наземных и лётных комплексных испытаний, в основном, проверяется работоспособность и реализуются методики подтверждения основных параметров бортовых оптико-электронных приборов. Однако для бортовых оптико-электронных приборов мониторинга околоземного пространства возникает необходимость в более детальном оценивании их текущих параметров, в частности энергетических, как на этапе лётных комплексных испытаний, так и в процессе эксплуатации.

Предлагается решать задачу оценки текущих энергетических параметров бортовых ОЭП на этапе эксплуатации с помощью наблюдений звёзд, для которых

доступны результаты фотометрических исследований с известной точностью. Данные измерения приведены в соответствующих фотометрических каталогах в различных стандартных фотометрических системах. Измерения же с помощью бортового ОЭП производятся в оригинальной инструментальной фотометрической системе, которая изучается, как правило, только на этапе наземных испытаний, но в процессе эксплуатации может меняться.

Предлагаемый подход схож с обработкой спутниковых фотометрических наблюдений, однако производится оценка прибора с помощью звёзд – фотометрический стандартов, а не наоборот. Сравнение различных измерений в одной и той же инструментальной фотометрической системе, но произведённых в разное время и в разных условиях, в общем случае сравнивать некорректно [3, 4-7]. В астрономии для решения этой проблемы все измерения переводят в стандартные фотометрические системы [3, 4]. Однако для оценки характеристик прибора это не применимо, т.к. в общем случае привести измерения из инструментальной полосы к стандартной невозможно, и работать нужно именно с инструментальными фотометрическими измерениями, учитывая влияния различных условий наблюдения и формирования кадров. Данный подход в настоящее время не стандартизован и систематически не описан, в работе обосновываются направления (возможные способы, методы) решения этой задачи.

Определение понятия инструментального фотометрического стандарта для бортовых ОЭП

Предлагаемый инструментальный фотометрический стандарт для бортовых ОЭП позволит:

- оценивать энергетические параметры прибора (чувствительность, динамический диапазон) в различных условиях эксплуатации;
- оценивать энергетические характеристики объектов, попадающих в поле зрения прибора, в различных условиях фоно-сигнальной обстановки.

Для выражения энергетических освещённостей в астрономической фотометрии принято использовать внесистемную единицу – звёздную величину, которая описывается законом Погсона [8, 9]:

$$m - m_0 = -2.5 \log \frac{E}{E_0} \quad (1)$$

Здесь m и m_0 – звёздные величины двух источников излучения, E и E_0 – получаемые от них освещённости. Освещённость E_0 за пределами земной атмосферы, равную 1 лк (что соответствует $3.1 \cdot 10^{-9}$ Вт·м⁻²), создаёт звезда величиной:

$$m = -14^{\text{m}}.01 \pm 0^{\text{m}}.04 \quad (2)$$

Тогда выражение для перевода энергетической освещённости, выраженной в звёздных величинах, в единицы измерения по системе СИ примет вид:

$$E = E_0 \cdot 10^{\frac{2.5}{m - m_0}} \quad (3)$$

Для удобства при работе с инструментальным фотометрическим стандартом используются звёздные величины, а перевод в системные единицы измерения производится лишь при необходимости.

Под инструментальным фотометрическим стандартом понимается совокупность:

- нуль-пунктов инструментальной фотометрической системы;
- зависимостей значений энергетических освещённостей на матрице бортового ОЭП от суммарных интенсивностей наблюдаемых объектов, выраженных в цифровых отсчётах яркостей пикселей, а также условий наблюдения и режима работы прибора;
- зависимостей значений инструментальных звёздных величин относительно их каталожных значений в стандартных фотометрических полосах.

В традиционном подходе к астрономической фотометрии энергетические освещённости выражаются через инструментальные звёздные величины и определяются следующим образом [7]:

$$m_{inst} = m_{0,inst} - 2.5 \log I_s \quad (4)$$

Здесь m_{inst} – инструментальная звёздная величина, I_s – интенсивность сигнала (signal) от регистрируемого объекта, $m_{0,inst}$ – константа, являющаяся нуль-пунктом данной фотометрической системы. Нуль-пункт выбирается таким образом, чтобы для первичной стандартной звёзды значение инструментальной звёздной величины было равно желаемому значению (например, чтобы Вега соответствовало

значение $0^m.03$). Выбранный нуль-пункт используется для построения вычисления значений блеска звёзд - вторичных стандартов [3].

При обработке измерений подразумевается, что интенсивность сигнала в формуле (4) уже отделена от фона и различных помех:

$$I_s = I_\Sigma - I_b - I_n \quad (5)$$

Здесь I_Σ – суммарная интенсивность объекта, I_b – интенсивность фона (background), I_n – интенсивность различных помех (noise).

Используемые на практике методы апертурной и PSF-фотометрии (рассмотрены далее) теоретически позволяют производить данное отделение сигнала от фона и помех, однако фотометрические измерения, произведённые в разное время и в разных условиях, по-прежнему сравнивать не рекомендуется. Следовательно, мы имеем дело не с I_s , а с суммарной интенсивностью I'_Σ , частично учитывающей условия наблюдения и режим работы прибора. Очевидно, что нуль-пункт также зависит от данных условий. Поэтому можно записать выражение для инструментальной звёздной величины в следующем виде:

$$m_{inst}(P,U) = m_{0,inst}(P,U) - 2.5 \log I'_\Sigma \quad (6)$$

Здесь P – вектор параметров, характеризующих условия наблюдения, U – вектор параметров, характеризующих режим работы прибора. Под условиями наблюдения понимаются особенности фоно-сигнальной составляющей кадра, искажения при движении, тени от пыли на матрице или оптике. Под режимом работы понимается совокупность настраиваемых параметров фотоприёмного

устройства, спектральная полоса прибора (при наличии нескольких фильтров), темновой ток и его рост по мере увеличения продолжительности проведения съёмки, а также деградация самой матрицы со временем. Учёт данных факторов приводит к построению каждой зависимости как многопараметрической.

При построении моделей данных зависимостей может использоваться аппроксимация по интервалам:

$$m_{\text{inst}}(P,U) = \begin{cases} f_1(I'_{\Sigma}, P, U) : I'_{\Sigma} \in [I_1, I_2] \\ f_2(I'_{\Sigma}, P, U) : I'_{\Sigma} \in [I_2, I_3] \\ \dots \\ f_n(I'_{\Sigma}, P, U) : I'_{\Sigma} \in [I_n, I_{n+1}] \end{cases} \quad (7)$$

На практике число интервалов аппроксимации n определяется экспериментально, таким образом, чтобы минимизировать среднюю ошибку. На основе получаемых моделей появляется возможность прогнозировать значение инструментальной звёздной величины для тех суммарных интенсивностей и фоновых сигнальных условий, по которым отсутствуют наблюдения. Полученные результаты могут использоваться при оценивании чувствительности бортового ОЭП при заданных условиях наблюдения и режиме работы прибора.

В рамках построения инструментального фотометрического стандарта также производится аппроксимация значения инструментальных звёздных величин от значений в стандартных фотометрических системах из фотометрических каталогов. Это необходимо ввиду различия между спектральными диапазонами фотометрических полос данных каталогов и оцениваемых бортовых оптико-электронных приборов. Эти модели, связывающие между собой значения

инструментальных и стандартных звёздных величин для звёзд, используемых при оценке энергетических характеристик прибора, позволяют прогнозировать фотометрические характеристики для звёзд на этапе планирования наблюдений. Данная методика описывается в работах [10, 11].

Таким образом, инструментальный фотометрический стандарт является уникальным для каждого бортового оптико-электронного прибора и представляет собой набор математических моделей и констант, который далее будем называть реализацией стандарта.

Базовые фотометрические каталоги

Для оценки энергетических параметров ОЭП (проницающая способность (чувствительность), динамический диапазон) необходимо использовать звёзды, имеющие данные по фотометрии с высокой точностью, а желательно – с известным распределением энергии в спектре.

Очевидно, что в задаче оценки энергетических параметров оптико-электронных приборов должны использоваться существующие стандартные фотометрические каталоги и их современные компиляции. В качестве высокоточных фотометрических каталогов в видимом диапазоне оптического излучения используется каталог Hipparcos [12]. В ближнем инфракрасном диапазоне - PRMXL [13], являющийся компиляцией 2MASS (Two Micron All-Sky Survey) и USNO-B 1.0 и содержащий фотометрию в следующих диапазонах: J, H, K, B, R, I. Для оценки параметров в среднем и дальнем ИК-диапазонах используются данные

каталога WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer), содержащего фотометрию в диапазонах W1, W2, W3, W4 [14]. Визуализация данных диапазонов представлена на рис. 1.

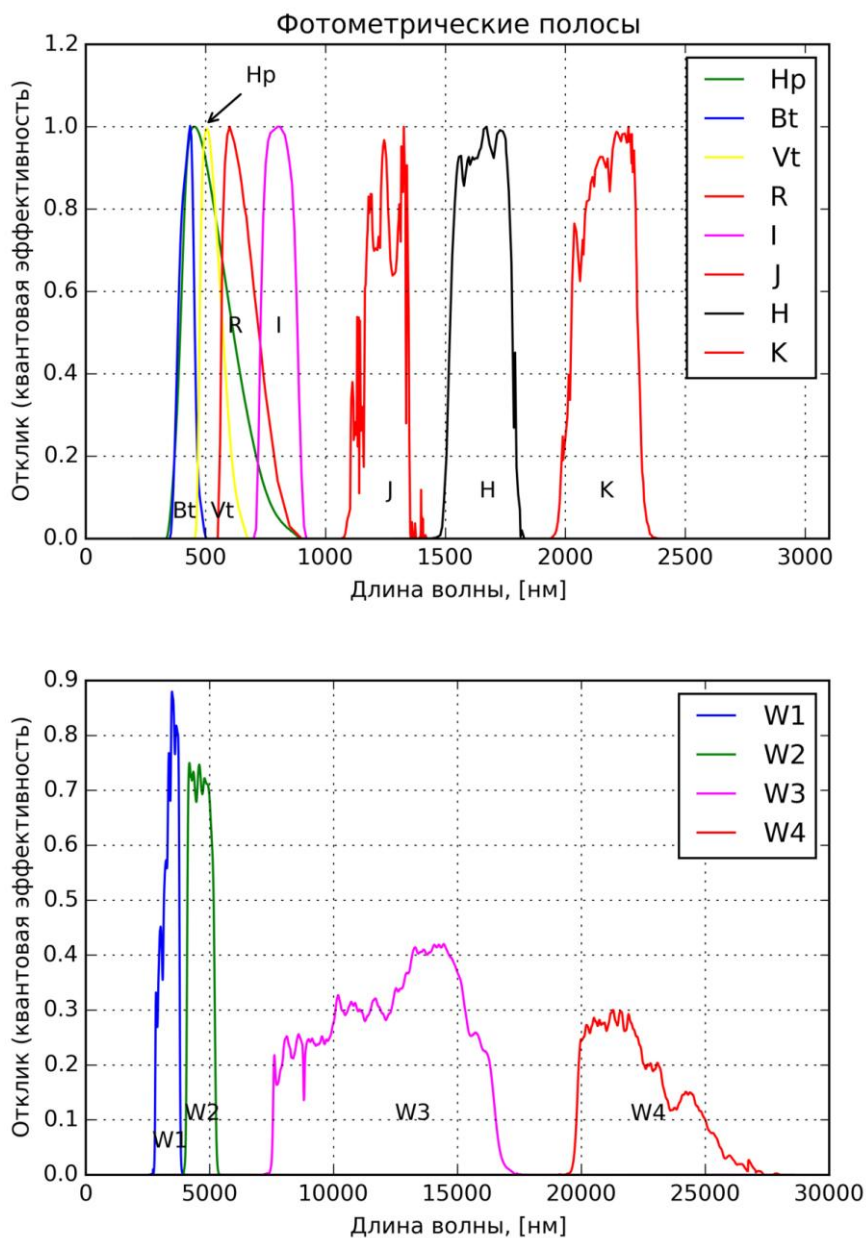


Рис. 1 – Фотометрические полосы Hp, Bt, Vt, R, I, J, H, K, W1, W2, W3, W4

Среди спектрофотометрических каталогов стоит выделить NGSL (the Next Generation Spectral Library) [15], MILES (the Medium Resolution INT Library of

Empirical Spectra) [16]. Звёзды с известными распределениями энергии в спектре могут использоваться в качестве стандартов при наблюдениях. Кроме того, для звёзд, не имеющих точной спектрофотометрии в данных каталогах, могут быть использованы усредненные распределения энергии в спектре по спектральным классам звёзд из библиотеки теоретических распределений энергии звёзд Пиклза, содержащей спектрофотометрию для основных классов звёзд в диапазоне 115-2500 нм с шагом 50\AA [17]. При известной полосе спектральной пропускания для прибора могут быть рассчитаны теоретические значения инструментальных звёздных величин по методу синтетической фотометрии [11]. Пример получения отклика в полосе H α для звезды HIP39191 показан на рис 2.

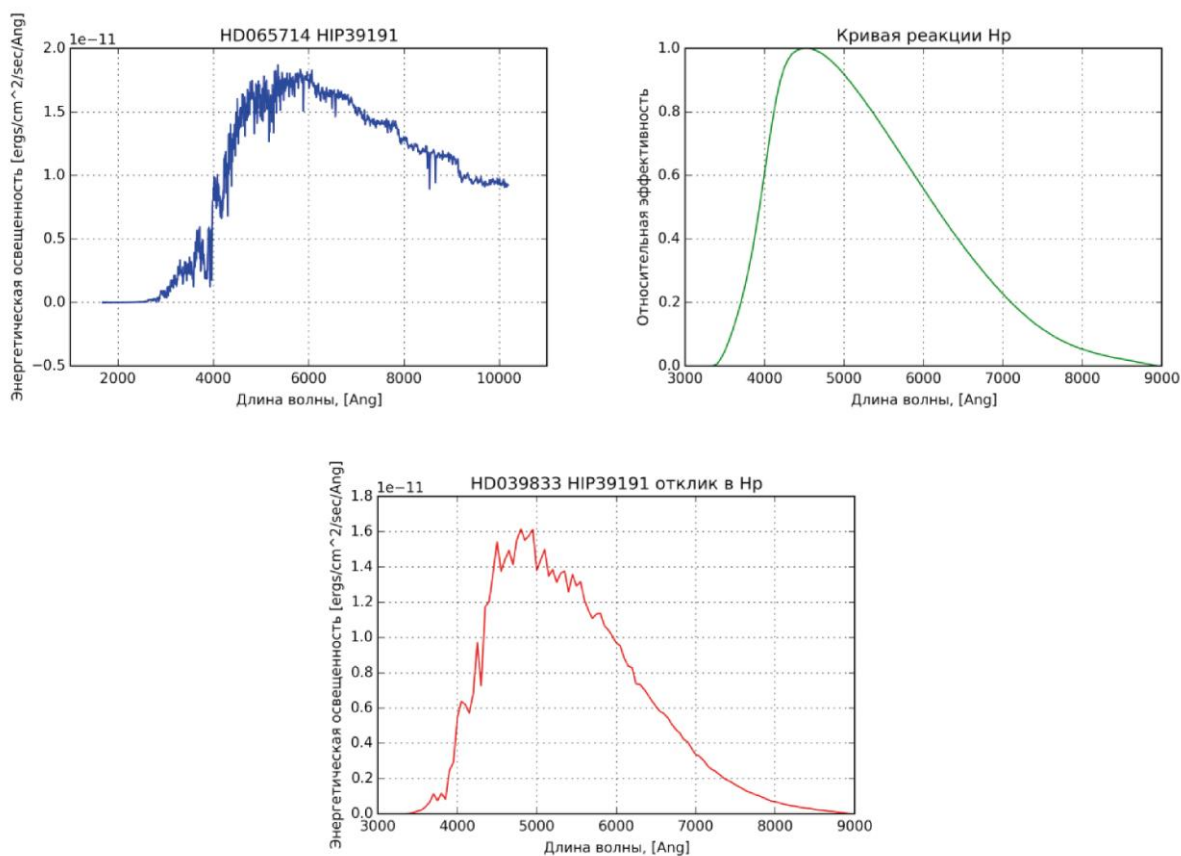


Рис. 2 – Получение отклика от HIP39191 в фотометрической полосе H α

Спектрофотометрические данные также могут использоваться и для обратной задачи - восстановления спектральной полосы пропускания прибора. Данная задача может возникнуть спустя продолжительное время эксплуатации прибора.

Проведение фотометрических измерений по кадрам с бортовых ОЭП

Для измерения сигнала от звезды в кадре существуют два общепринятых способа: апертурная фотометрия и PSF-фотометрия (Point Spread Function) [18].

Апертурная фотометрия основана на подсчёте суммарной интенсивности от объекта в его определённой окрестности – апертуре. В апертуре, кроме сигнала от объекта, присутствует фоновая составляющая, её необходимо учитывать. Для этого определяется значение фона (среднее, либо медиана, мода) вокруг апертуры (англ. annulus) и, умноженное на площадь апертуры, вычитается из суммарной интенсивности изображения в апертуре. Между апертурой и кольцом оставляют промежуток (англ. gap), чтобы значение фона было свободно от влияния возможных «крыльев» объекта. Основная сложность в данном методе заключается в оптимальном выборе радиусов апертуры, кольца и промежутка. Наиболее распространённым значением является значение FWHM (ширина профиля объекта на половине амплитудного значения).

PSF-фотометрия заключается в аппроксимации профиля изображения модельной функцией (Point Spread Function, она же ФРТ, Функция Рассеяния Точки). Данный подход основан на допущении, что для точечных объектов

различной яркости будет меняться только амплитуда, но не сама форма профиля.

Наиболее распространенными являются следующие модельные функции:

- функция Гаусса

$$G(r) = G_0 e^{-\frac{r^2}{2a^2}} \quad (8)$$

- профиль Лоренца

$$L(r) = \frac{L_0}{1 + (r^2/a^2)^b} \quad (9)$$

- профиль Моффата

$$M(r) = \frac{M_0}{(1 + r^2/a^2)^2} \quad (10)$$

где r – расстояние от центра изображения; a и b – коэффициенты аппроксимации; G_0 , L_0 , M_0 – амплитудные значения. В работе [19] показано, что для обработки кадров, полученных на ПЗС-матрицах, наиболее целесообразным является использование профиля Моффата.

При оценке сигнала от звёзд может использоваться как тот, так и другой методы, однако PSF-фотометрия позволяет получать более адекватные результаты в условиях тесных полей. Апертурная фотометрия является менее сложным способом с вычислительной точки зрения, поскольку не подразумевает оценку вида распределения интенсивности изображения и последующую аппроксимацию, однако подходит только для объектов, в окрестность которых не попадает излучение от соседних.

Как уже отмечено выше, при построении инструментального фотометрического стандарта влияние фона и сигнала от соседних звёзд учитывается с помощью дополнительных параметров, поэтому принципиального значения выбор метода фотометрического измерения не имеет и выбирается исходя из вида конкретных кадров.

Параметры для описания фоно-сигнальной обстановки в кадре

Внешние условия наблюдений являются случайными нестационарными процессами, распределёнными во времени и пространстве, что усложняет их учёт [20]. При этом использование характеристик фоно-сигнальной составляющей в кадре фактически невозможно без наличия сведений о законе распределения интенсивности и его параметрах. Практический анализ показал, что типичную гистограмму интенсивности кадра наблюдения звезд с ОЭП нельзя описать нормальным законом распределения. Поэтому предлагается описание плотности вероятности интенсивности в кадре определить как смесь следующих распределений:

- сигнала;
- фона;
- «горячих» пикселей;
- «битых» пикселей.

Формальный вид описания фоно-сигнальной обстановки в кадре:

$$I(x,y) = w_s I_s(x,y) + w_b I_b(x,y) + w_h I_h(x,y) + w_c I_c(x,y),$$

$$w_s + w_b + w_h + w_c = 1,$$
$$w_s \geq 0, w_b \geq 0, w_h \geq 0, w_c \geq 0 \quad (11)$$

Здесь $I(x, y)$ – плотность распределения значений интенсивности в кадре; w_s , w_b , w_h , w_c – априорные вероятности наличия соответственно сигнала (signal), фона (background), «горячего» пикселя (hot), «битого» пикселя (corrupt) в пикселе (x, y) ; $I_s(x, y)$, $I_b(x, y)$, $I_h(x, y)$, $I_c(x, y)$ – плотности распределения соответственно сигнала, фона, «горячих» и «битых» пикселей.

Анализ различных узкополосных и широкополосных кадров показал, что типичная гистограмма, как правило, содержит три локальных максимума: максимум на нулевом значении интенсивности («битые» пиксели), максимум со значением интенсивности фона в кадре и максимум, отображающий значение сигнала от звезд и «горячие» пиксели. На практике по гистограмме отделить «горячие» пиксели от пикселей с накопленным сигналом не всегда представляется возможным, а значение максимума, отвечающего за «битые» пиксели, заранее известно, поэтому описание гистограммы экспериментально реализуется с помощью следующих характеристик:

- количество «битых пикселей»;
- параметры распределения интенсивности фона на соответствующем участке гистограммы (математическое ожидание, медиана, дисперсия и момент третьего порядка, описывающий асимметрию);
- параметры смеси распределения сигнала и «горячих» пикселей на соответствующем участке гистограммы;

- общие статистические параметры кадра по всей гистограмме.

Параметры получения кадра

Под режимом работы прибора, как упоминалось ранее, понимается совокупность варьируемых от кадра к кадру параметров, влияющих на радиометрию полученного результата. Данные параметры подразделяются в общем случае на управляемые и неуправляемые. К управляемым относятся время экспонирования, режим бинирования и др. Неуправляемые параметры (например, температура) могут как измеряться с помощью соответствующих датчиков, так и не измеряться (соответственно их учёт может быть нереализуем в рамках конкретного прибора).

При увеличении числа параметров, используемых в построении реализации инструментального фотометрического стандарта для конкретного прибора, возникает необходимость в увеличении количества калибровочных наблюдений, на основе которых производится построение моделей. Использование большого количества параметров на начальном этапе не позволит достичь адекватных результатов, поэтому при малой наблюдательной выборке в построении моделей участвует их ограниченное число.

Выводы

В статье предложено понятие инструментального фотометрического стандарта для бортовых ОЭП. Его использование позволяет оценивать энергетические характеристики прибора по звёздам, выбранным в качестве фотометрических

стандартов. Построение реализаций стандарта основано на использовании классических методов астрономической фотометрии и статистической обработки результатов измерений. Оценка эффективности алгоритмов формирования и использования реализаций инструментального фотометрического стандарта для конкретных бортовых ОЭП на основе моделирования и экспериментально полученных данных будет рассмотрена в следующих статьях.

Библиографический список

1. Богданов И.В., Величко А.Н. Формирование фоно-целевой обстановки для оптико-электронных систем ракетно-космического назначения // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80349>
2. Лазарев И.В. Моделирование телевизионного звездного координатора // Труды МАИ. 2013. № 63. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=36116>
3. Миронов А.В. Основы астрофотометрии. – М.: Физматлит, 2008. – 258 с.
4. Warner B.D. A Practical Guide to Lightcurve Photometry and Analysis, Springer, 2016, 418 p.
5. Страйжис В.Л. Многоцветная фотометрия звёзд. Фотометрические системы и методы. – Вильнюс: Мокслас, 1977. - 312 с.
6. Günter D. Roth. Hadbook of Practical Astronomy, Springer, 2009, 712 p.
7. Romanishin W. An Introduction to astronomical Photometry Using CCDs, University of Oklahoma, 2006, 175 p.

8. Заварзин, В.И., Сауткин В.А. Оценка проникающей способности приёмных каналов оптико-электронных средств спутниковой астрономии // Контенант. 2014. Т. 13. № 1. С. 50 - 56.
9. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 1999. – 480 с.
10. Kruzhilov I. et al. Calculating stellar magnitude to enhance guide star catalogs, SPIE Newsroom, 2012, available at: <http://spie.org/newsroom/4510-calculating-stellar-magnitude-to-enhance-guide-star-catalogs?pf=true&SSO=1>
11. Мошкалёв В.Г., Бирюков А.В., Захаров А.И. и др. Расчёт блеска звёзд в спектральной полосе кремниевого фотоприёмника звёздного датчика по данным каталогов tycho-2 и 2mass // Механика, управление и информатика. 2013. № 13. С. 243 – 248.
12. F. van Leeuwen. Hipparcos, the New Reduction of the Raw Data. Astrophysics & Space Science Library, 2007, 471 p.
13. Roeser S. et al. PPML: Positions and Proper Motions "Extra Large" Catalog // The Astronomical Journal, 2010, vol. 139, issue 6, pp. 2440 - 2447.
14. Wright E. et al. The wide-field infrared survey explorer (WISE): mission description and initial on-orbit performance // The Astronomical Journal, 2010, vol. 140, issue 6, pp. 1868 - 1881.
15. Gregg M.D. et al. The HST/STIS Next Generation Spectral Library. The 2005 HST Calibration Workshop, 2005, pp. 209 - 217.

16. P. Sanchez-Blazquez et al. MILES: A Medium resolution INT Library of Empirical Spectra // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2006, vol. 371, issue 2, pp. 703 - 718.
17. Pickles A.J. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å // The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2006, vol. 110, issue 749, pp. 863 - 878.
18. Howell S.B. Handbook of CCD Astronomy, Cambridge, Cambridge University Press, 2006, 223 p.
19. Bendinelli O., Parmeggiani G., Zavatti F. CCD Star Images: On Determination of Moffat's PSF Shape Parameters // Journal of Astrophysics Astronomy, 1988, vol. 9, pp. 17 - 24.
20. Никитин В.М. Адаптивная помехозащита оптико-электронных информационных систем: монография – Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. – 196 с.

Статья поступила в редакцию 03.12.2018