

Моделирование работы алгоритмов оценки энергетических параметров бортовых оптико-электронных приборов космических аппаратов

Е.О. Еремин

Аннотация— Во время эксплуатации бортовых оптико-электронных приборов (ОЭП) и систем космических аппаратов возникает необходимость в оценке таких его энергетических параметров, как чувствительность (проницающая способность) и динамический диапазон. Данные параметры напрямую влияют на возможность обнаружения космических объектов, а также получения некоординатной информации по ним системами мониторинга околоземного космического пространства, в том числе космического мусора. Оценка чувствительности и динамического диапазона бортовых ОЭП производится с помощью наблюдений звёзд, для которых доступны результаты фотометрических исследований с известной точностью. В статье приведены описания алгоритмов оценки чувствительности и динамического диапазона бортовых ОЭП и систем. Данные алгоритмы используют инструментальный фотометрический стандарт, позволяющий на основе методов системного анализа с заданной точностью оценивать энергетические характеристики бортового ОЭП при различных режимах работы и фоно-сигнальных условиях проведения наблюдений. Для оценки качества разработанных алгоритмов разработана экспериментальная имитационная модель, основанная на ряде программ проекта Astromatic и реализации алгоритмов оценки энергетических параметров бортовых ОЭП на языке программирования Python. Приведены и интерпретированы результаты моделирования на основе разработанной имитационной модели. Материалы статьи могут быть использованы при планировании практической эксплуатации бортовых ОЭП космических систем и аппаратов.

Ключевые слова— бортовой оптико-электронный прибор, оценка энергетических параметров, чувствительность, динамический диапазон, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье под чувствительностью (проницающей способностью) бортового ОЭП понимается пороговое значение яркости излучения космического объекта, при котором возможна

регистрация этого объекта данным ОЭП и последующее автоматическое выделение на кадре. При оценке чувствительности используется инструментальный фотометрический стандарт, рассмотренный в работе [1]. Понятие динамического диапазона применительно к бортовым ОЭП, осуществляющим мониторинг объектов на фоне небесной сферы, обосновано в работе [2]. Моделирование производится с целью оценки качества разработанных алгоритмов оценки чувствительности и динамического диапазона бортового ОЭП. Под качеством алгоритмов оценивания энергетических параметров бортовых ОЭП понимается точность оценки при различных фоно-сигнальных обстановках и условиях получения кадров.

II. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Оценивание производится по следующему алгоритму:

1) Вычисление теоретической оценки проницающей способности оптико-электронного прибора с помощью следующего выражения [3]:

$$m_{пред} \leq 2.5 \log\left(\frac{D_{ex} f'}{\varepsilon \Psi} \sqrt{\frac{\tau_0 k q t_n}{h \nu}}\right) + 0.5 m_{\phi} - 20^m.38 \quad (1)$$

где D_{ex} – апертура, f' – фокусное расстояние, ε – угловое разрешение, Ψ – значение требуемого отношения сигнал-шум, τ_0 – интегральный коэффициент пропускания, k – коэффициент использования световой энергии фотоприёмником, q – квантовая эффективность фотоприёмника, t_n – время экспозиции, $h \nu$ – энергия светового кванта, m_{ϕ} – яркость фона.

2) Выбор звёзд с разных участков небесной сферы, блеск которых в ближайшей к полосе ОЭП стандартной фотометрической полосе находится в окрестности значения, вычисленного по формуле (1).

3) Расчёт эталонных инструментальных звёздных величин для звёзд, выбранных в п.2 настоящего алгоритма.

а) Расчёт по методу синтетической фотометрии [4]:

Статья получена 12 июня 2021.

Е. О. Еремин, ПАО МАК «Вымпел», Москва, Россия (e-mail: e.o.ereimin@gmail.com).

$$m_{инст_c} = -2.5 \log \frac{\int F(\lambda)R(\lambda)\lambda d\lambda}{\int F(\lambda)\lambda d\lambda} + const \quad (2)$$

где $m_{инст_c}$ – значение синтетической инструментальной звёздной величины, $F(\lambda)$ – относительный отклик прибора на длине волны λ , $R(\lambda)$ – значение энергетической светимости объекта на длине волны λ . В этом случае для звёзд необходимо знание распределения энергии в спектре, т.е. информация по ним должна присутствовать в каком-либо из спектрофотометрических каталогов, например, в каталоге Пиклза [5].

б) Расчёт по алгоритму оценки инструментальных звёздных величин по стандартным каталожным значениям. В этом случае предварительно должен быть построен инструментальный фотометрический стандарт, рассмотренный в статье [1].

4) Проведение наблюдений звёзд, для которых получены эталонные значения инструментального блеска в п.3 настоящего алгоритма.

5) Обработка полученных наблюдений алгоритмом автоматического выделения звёзд и проведения фотометрии.

6) Проведение классификации звёзд из пунктов 4 и 5 по признаку осуществимости автоматического выделения. Классификация проводится на основе логистической регрессии, при этом входными параметрами являются значение инструментальной звёздной величины и значение фона в окрестности звезды, а выходным значением является бинарный признак выделения.

Уравнение классификатора, полученного при проведении логистической регрессии в п.6, является формулой граничного значения проникающей способности (пороговой чувствительности) в зависимости от значения локального фона.

При необходимости выполняется перевод в размерность $[Вт/м^2]$ на основе преобразования формулы Погсона соотношения звёздных величин, а также формулы вычисления интенсивности. В результате получается следующее выражение:

$$\frac{b_1}{b_2} = 10^{-0.4(m_1 - m_2)} \quad (3)$$

где b_1 , b_2 – энергетические освещённости, m_1 и m_2 – звёздные величины. Таким образом, зная энергетическую освещённость и соответствующую звёздную величину для одной звезды и звёздную величину для второй, мы можем вычислить соответствующую энергетическую освещённость второй звезды. Известно, что энергетическая освещённость от Солнца около $1,361 \text{ кВт/м}^2$, а видимая звёздная величина $-26,8^m$. Нулевой звёздной величине соответствует энергетическая освещённость $2,48 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2$. Т.е. для перевода из звёздной величины в энергетическую освещённость может использоваться следующая формула:

$$b = 2.48 \cdot 10^{-8 - 0.4 \cdot m} \quad (4)$$

III. АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Для определения значений m_{\max} и $m_{\text{пред}}$ необходимо проведение экспериментальных наблюдений при различных условиях фоно-сигнальной составляющей. Кроме того, должен быть сформирован инструментальный фотометрический стандарт в части моделей зависимости инструментальной звёздной величины от суммарной интенсивности и условий фона [1].

Рассмотрим шаги алгоритма подробно:

1) Вычисление $m_{\text{пред}}$ по алгоритму оценки чувствительности.

2) Оценка значения отсчетов АЦП (англ. ADU), при котором заканчивается линейная часть графика зависимости отсчетов АЦП от времени экспозиции. Данная оценка проводится способом, описанным в [6]. Для этого проводятся наблюдения одних и тех же звезд при различных (последовательно увеличиваемых) значениях времен экспозиции. Далее проводится выделение звезд и вычисление их суммарной интенсивности по предпочтительному методу проведения фотометрии (апертурная или PSF). Для каждой звезды строится зависимость суммарной интенсивности от времени экспозиции. Точка окончания линейного участка динамического диапазона в отсчетах АЦП находится в точке падения значения градиента зависимости интенсивности объекта от времени экспозиции.

3) Оценка функции рассеяния точки (ФРТ) бортового ОЭП [7, 8]. ФРТ определяется на основе PSF-фотометрии всех звезд (являющимися точечными источниками света, поскольку расстояние до звезд много больше и диаметра апертуры ОЭП, и фокусного расстояния).

4) Для полученной ФРТ вычисляется значение суммарной интенсивности при амплитуде (максимальном значении яркости в центре ФРТ), равной верхней границе линейного участка динамического диапазона в отсчетах АЦП.

5) По найденному значению суммарной интенсивности в п.4 настоящего алгоритма и задаваемому значению локального фона на основе инструментального фотометрического стандарта находится значение верхней границы динамического диапазона в звёздных величинах.

6) Подбор звёзд с разных участков небесной сферы, блеск которых в ближайшей к полосе ОЭП стандартной фотометрической полосе находится в окрестности значения, найденного в п.5 настоящего алгоритма.

7) Проведение наблюдений звёзд, подобранных в п.6 настоящего алгоритма.

8) Обработка полученных в п.7 наблюдений предпочитаемыми алгоритмами автоматического выделения и фотометрии.

9) Проведение классификации звёзд из пунктов 7 и 8 настоящего алгоритма по признаку отсутствия «срезанной» вершины изображения, рассмотренному в работе [2]. Классификация проводится на основе логистической регрессии, при этом входными параметрами являются значение инструментальной звёздной величины и значение фона в окрестности звезды, а выходным значением является бинарный

признак отсутствия «срезанной» вершины. Уравнение классификатора, полученного при проведении логистической регрессии, является формулой граничного значения верхней границы динамического диапазона бортового ОЭП в зависимости от значения локального фона.

10) Вычисление значения динамического диапазона в звёздных величинах по формуле:

$$D = m_{\text{макс}} / m_{\text{пред}} \quad (5)$$

При необходимости вычисления динамического диапазона в границах, выраженных в Вт/м², предварительно проводится перевод по формуле 4.

IV. ОПИСАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Для проведения имитационного моделирования разработана экспериментальная система, включающая в себя:

- моделирование цифровых кадров бортовых ОЭП с задаваемыми физическими характеристиками;
- реализацию алгоритмов оценки чувствительности и динамического диапазона бортовых ОЭП.

Схема формирования исходных данных для работы алгоритмов оценки энергетических параметров представлена на рисунке 1:

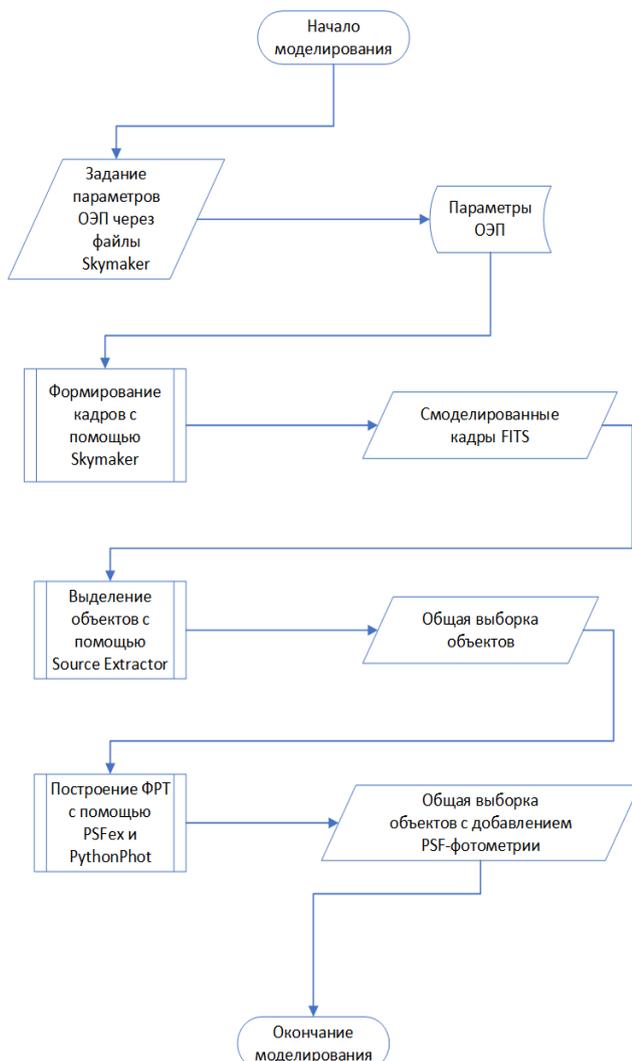


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма формирования исходных данных для оценки качества разработанных методов

Моделирование цифровых кадров и получение исходных данных по ним осуществлялось с использованием программ Skymaker [9], SExtractor [10], а также библиотеки PythonPhot [11], являющейся портированной версией известной астрофотометрической программы DAOPHOT [12].

Формирование кадров небесной сферы в формате FITS осуществляется с помощью программы Skymaker, после этого производится обработка кадров с помощью программы SExtractor. На основе полученных на выходе SExtractor данных с помощью программы PSFEx [13] производится построение ФРТ. Параллельно с этим проводится апертурная и PSF-фотометрия с помощью пакета PythonPhot. На основе полученной от PSFEx ФРТ происходит вторая итерация обработки кадров, и к выходным данным добавляются значения, полученные с помощью метода PSF-фотометрии от Source Extractor-a. Полученная выборка используется в качестве входных данных для работы алгоритмов оценки параметров ОЭП.

Интеграция работы названных программ и реализация алгоритмов оценки энергетических параметров осуществлена на языке программирования Python. Примеры смоделированных изображений для синтетических наборов звёзд, разных фоновых условий и времен экспозиции представлены на рисунке 2.

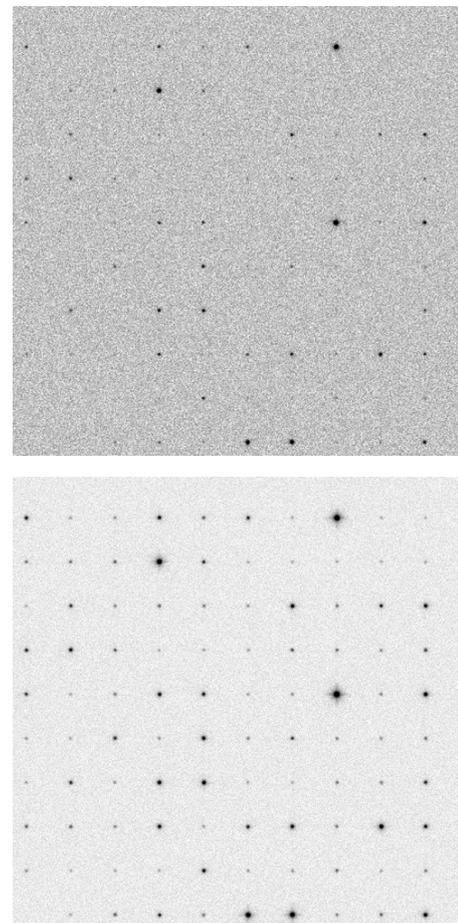


Рисунок 2 – Смоделированные кадры синтетического

набора звёзд для среднего уровня фона 9^m и времени экспозиции 0.1 с (сверху) и среднего уровня фона 13^m и времени экспозиции 1с (снизу), изображения инвертированы

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рисунке 3 представлен график с результатами моделирования оценки чувствительности на основе обнаружения звёзд. Линии регрессии отображены как для класса обнаруженных автоматическим алгоритмом звёзд, так и для класса не обнаруженных. Пунктиром показана линия однозначного разделения данных классов, уравнение которой может использоваться как модель гарантированного значения чувствительности (проницающей способности).

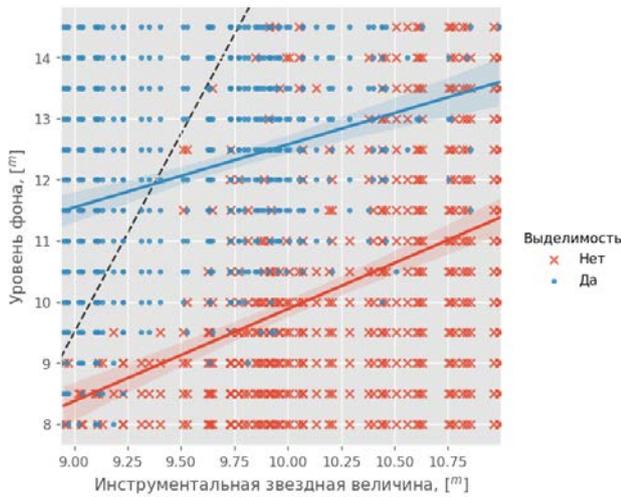


Рисунок 3 – Оценка чувствительности на основе обнаружения

Модель линейного классификатора, разделяющего обнаружимые и не обнаружимые звёзды, и полученного с помощью библиотеки sklearn, имеет характеристики, представленные в таблице 1:

Таблица 1 – Точность модели оценки чувствительности

	precision	recall	F1-score	support
False	0.92	0.84	0.88	88
True	0.76	0.88	0.82	51
Accuracy			0.86	139
Macro avg	0.84	0.86	0.85	139
Weighted avg	0.87	0.86	0.86	139

В таблице 1 precision – прецизионность (доля объектов, классифицированных как обнаружимые, действительно являющихся обнаружимыми), recall – полнота (доля обнаружимых объектов, классифицированных моделью), f1-score – F-мера (среднее гармоническое прецизионности и полноты), support – объем обучающей выборки, False – объекты выборки ниже пороговой чувствительности, True – объекты выборки выше пороговой чувствительности, Accuracy – точность модели (отношение правильно классифицированных объектов к общему числу), Macro

avg - средний метрический показатель для обоих классов объектов (выделенные и невыделенные), weighted avg – средний взвешенный метрический показатель для каждого класса.

Таким образом, использование предложенного метода оценки чувствительности совместно с использованием линейного классификатора по признаку обнаружимости объектов на фоне с заданной яркостью на модельных данных позволило спрогнозировать данную характеристику с точностью 86%.

На рисунке 4 представлен график с результатами моделирования оценки верхней границы динамического диапазона на основе критерия наличия «срезанной» вершины у изображений звёзд. Линии регрессии отображены как для класса звёзд, вышедших за динамический диапазон, так и для класса не вышедших за динамический диапазон. Пунктиром показана линия однозначного разделения классов, уравнение которой может использоваться как модель гарантированного значения верхней границы динамического диапазона.

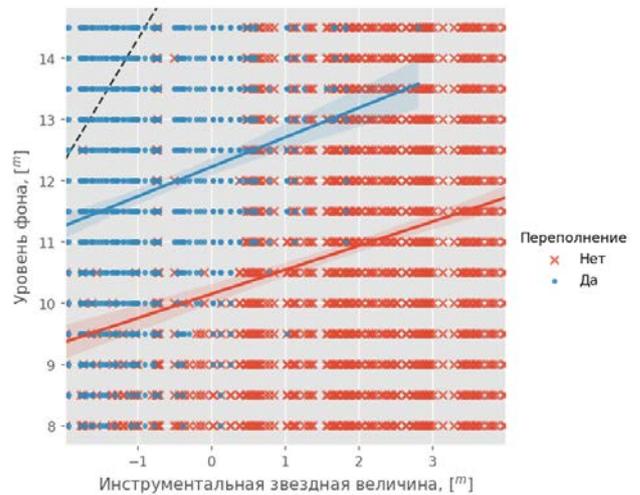


Рисунок 4 – Оценка верхней границы динамического диапазона на основе наличия «срезанной» вершины

Модель линейного классификатора, разделяющего данные классы изображений звёзд, имеет характеристики, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Точность модели оценки верхней границы динамического диапазона ОЭП

	precision	recall	F1-score	support
False	0.94	0.94	0.94	108
True	0.85	0.82	0.84	40
Accuracy			0.91	148
Macro avg	0.89	0.88	0.89	148
Weighted avg	0.91	0.91	0.91	148

Таким образом, использование предложенного метода оценки верхней границы динамического диапазона совместно с использованием линейного классификатора на модельных данных позволило спрогнозировать данную характеристику с точностью 91%.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты имитационного моделирования для оценки качества разработанных ранее методов оценки чувствительности и динамического диапазона бортовых ОЭП космических систем мониторинга космического пространства. Приведено описание названных алгоритмов. Полученные по итогам имитационного моделирования результаты показали точность, позволяющую судить о работоспособности и адекватности разработанных методов. Приведенные материалы могут быть использованы при планировании практической эксплуатации различных ОЭП в целях контроля обеспечения выполнения ими целевых задач.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Еремин Е.О., Харламов Г.Ю. Инструментальный фотометрический стандарт для бортовых оптико-электронных приборов космических систем мониторинга околоземного пространства // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102231>
- [2] Еремин Е.О. Оценка динамического диапазона оптико-электронных приборов при наблюдении космических объектов на фоне небесной сферы // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2015. – Т. 15. – №. 5. – с. 86-89.
- [3] Заварзин, В.И. Оценка проникающей способности приёмных каналов оптико-электронных средств спутниковой астрономии / В.И. Заварзин, В.А. Сауткин // Научно-технический журнал «Контенант». - 2014, Т.13, №1. – с.50-56.
- [4] V. Straižys. The method of synthetic photometry. *Baltic Astronomy*, 1996, vol. 5, p.459-476.
- [5] A. J. Pickles. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 110, Issue 749, pp. 863-878, 2006.
- [6] Benko T, Felix B. How to Scientifically Determine CCD Gain and Offset Settings, 2011
- [7] McGillem, C. D.; Anuta, P. E.; Malaret, E.; and Yu, K. B., "Estimation of a Remote Sensing System Point-Spread Function from Measured Imagery" (1983). LARS Technical Reports. Paper 81. <http://docs.lib.purdue.edu/larstech/81>
- [8] Кружилов И.С. О влиянии относительного размера изображения на погрешность определения координат // Компьютерная оптика. - 2009, т. 33, №2, - с.210-215.
- [9] Bertin 2009: SkyMaker: astronomical image simulations made easy, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement* 80, 422
- [10] Bertin, E. & Arnouts, S. 1996: SExtractor: Software for source extraction, *Astronomy & Astrophysics Supplement* 317, 393
- [11] Jones, D. O., Scolnic, D. M., & Rodney, S. A. 2015, PythonPhot: Simple DAOPHOT-type photometry in Python, *Astrophysics Source Code Library*, ascl:1501.01
- [12] P. Stetson, DAOPHOT- A computer program for crowded-field stellar photometry, 1987, *PASP*, v. 99, p.191-222.
- [13] Bertin 2011: Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx, *ASP Conference Series*, Vol. 442, 2011, Ian N. Evans, Alberto Accomazzi, Douglas J. Mink, and Arnold H. Rots, eds., p. 435.

Simulation of algorithms for estimation energetic parameters of spacecraft onboard optoelectronic devices

Evgeny Eremin

Abstract. During the operation of on-board optoelectronic devices and spacecraft systems, there is a need to evaluate such energy parameters as sensitivity and dynamic range. These parameters directly affect the possibility of detecting space objects, as well as obtaining non-coordinate information on them by monitoring systems of near-Earth space, including space debris. The sensitivity and dynamic range of on-board optoelectronic devices are estimated using observations of stars for which the results of photometric studies with known accuracy are available. This article describes algorithms for assessing the sensitivity and dynamic range of on-board optoelectronic devices. These algorithms use an instrumental photometric standard, which based on the methods of system analysis, to evaluate the energy characteristics of the on-board optoelectronic devices with a given accuracy under various operating modes and background-signal conditions of observation. Experimental simulation model developed for the quality estimation of described algorithms. This model based on some programs of the Astromatic project and the implementation of described algorithms. The simulation results presented. The materials of the article can be useful in planning the practical operation of on-board optoelectronic devices of space systems and spacecraft.

Keywords: on-board optoelectronic device, estimation of energy parameters, sensitivity, dynamic range, simulation.

REFERENCES

- [1] Eremin E.O., Kharlamov G.U. Instrumental'nyj fotometricheskij standart dlya bortovyh optiko-elektronnyh priborov kosmicheskikh sistem monitoringa okolozemnogo prostranstva // Trudy MAI. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102231>
- [2] Eremin E.O. Ocenka dinamicheskogo diapazona optiko-elektronnyh priborov pri nablyudenii kosmicheskikh ob"ektov na fone nebesnoj sfery // Fundamental'nye problemy radioelektronnoho priborostroeniya. – 2015. – T. 15. – №. 5. – s. 86-89.
- [3] Zavarzin, V.I. Ocenka pronicayushchej sposobnosti priyomnyh kanalov optiko-elektronnyh sredstv sputnikovoj astronomii / V.I. Zavarzin, V.A. Sautkin // Nauchno-tekhnicheskij zhurnal «Kontenant». - 2014, T.13, №1. – s.50-56.
- [4] V. Straižys. The method of synthetic photometry. Baltic Astronomy, 1996, vol. 5, p.459-476.
- [5] A. J. Pickles. A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å. The Publications of the Astronomical Society of the Pacific, Volume 110, Issue 749, pp. 863-878, 2006.
- [6] Benko T, Felix B. How to Scientifically Determine CCD Gain and Offset Settings, 2011
- [7] McGillem, C. D.; Anuta, P. E.; Malaret, E.; and Yu, K. B., "Estimation of a Remote Sensing System Point-Spread Function from Measured Imagery" (1983). LARS Technical Reports. Paper 81. <http://docs.lib.purdue.edu/larstech/81>
- [8] Kruzhilov I.S. O vliyanii otноситel'nogo razmera izobrazheniya na pogreshnost' opredeleniya koordinat // Komp'yuternaya optika. - 2009, t. 33, №2, - s.210-215.
- [9] Bertin 2009: SkyMaker: astronomical image simulations made easy, Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplement 80, 422
- [10] Bertin, E. & Arnouts, S. 1996: SExtractor: Software for source extraction, Astronomy & Astrophysics Supplement 317, 393
- [11] Jones, D. O., Scolnic, D. M., & Rodney, S. A. 2015, PythonPhot: Simple DAOPHOT-type photometry in Python, Astrophysics Source Code Library, ascl:1501.01
- [12] P. Stetson, DAOPHOT- A computer program for crowded-field stellar photometry, 1987, PASP, v. 99, p.191-222.
- [13] Bertin 2011: Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx, ASP Conference Series, Vol. 442, 2011, Ian N. Evans, Alberto Accomazzi, Douglas J. Mink, and Arnold H. Rots, eds., p. 435.