

Разработка отечественного астропотометрического каталога звезд всего неба в интересах обеспечения оптико-электронных информационных систем

© М. И. Олейников¹, В. В. Ширококов¹, С. Н. Додонов², Н. В. Шуйгина²

¹Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

²ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

В статье рассмотрены вопросы, связанные с созданием отечественного астропотометрического каталога звезд всего неба, который необходим для решения задач астроориентации, астронавигации, а также определения блеска естественных и техногенных объектов, находящихся в околоземном космическом пространстве. Современные каталоги звезд должны содержать максимально полную и точную информацию о фотометрических характеристиках звезд, их координатах, а также об их собственных движениях.

Астрометрические каталоги периода до GAIA существенно зависели от точности определения ошибок собственных движений звезд, что приводило к «старению» каталогов и затрудняло их использование в системах астроориентации и астронавигации. В работе приведен краткий обзор современных каталогов с целью выявления проблем использования существующих астрометрических и фотометрических каталогов звезд. Анализ показал, что основные фотометрические каталоги звезд неоднородны (для разных зон использованы разные телескопы, детекторы и фильтры), страдают от неполноты, требуют сложных пересчетов звездных величин из одной фотометрической системы в другую.

В работе рассмотрены вопросы по созданию и поддержанию отечественного фотометрического и астрометрического каталога звезд всего неба в интересах обеспечения оптико-электронных информационных систем. Определены основные его потребители в части использования данных каталога информационными оптико-электронными системами различного назначения. Определены требования, предъявляемые к таким каталогам, как в части полноты фотометрических данных, так и в части астрометрических данных. Выявлена необходимость создания централизованной системы поддержания такого каталога и доведения до любых заинтересованных потребителей требуемой координатной и фотометрической информации в части фоновой звездной обстановки, в том числе в ближнем ИК-диапазоне. Сформулированы предложения в направлении работ по созданию сети широкоугольных телескопов, необходимых для поддержки отечественного фотометрического и астрометрического каталога звезд всего неба.

Ключевые слова: фотометрический и астрометрический каталог звезд всего неба, оптико-электронное информационное средство, фотометрическая система, астронавигация.

Контакты для связи: Ширококов Владислав Владимирович (17126vlad@gmail.com).

Для цитирования: Олейников М. И., Ширококов В. В., Додонов С. Н., Шуйгина Н. В. Разработка отечественного астропотометрического каталога звезд всего неба в интересах обеспечения оптико-электронных информационных систем // Труды ИПА РАН. 2024. Вып. 71. С. 40–45.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.71.40-45>

Development of Domestic Astrometric Catalog of Stars of the Entire Sky in the Development of Optical-Electronic Information Systems

M. I. Oleynikov¹, V. V. Shirobokov¹, S. N. Dodonov², N. V. Shulgina²

¹Mozhaisky Military Space Academy, St. Petersburg, Russia

²Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

Abstract

The present paper discusses the issues related to the problems of producing a domestic astrometric catalog of stars of the entire sky, necessary to solve the problems of astroorientation, astrogation, as well as the problem of determining the brightness of natural and man-made objects located in the near-Earth space. Modern catalogues of stars should contain the most complete and accurate information about the photometric characteristics of stars, their coordinates, as well as their own movements.

The paper provides a brief overview of modern catalogues of stars, in order to identify problems with the use of the existing catalogues. The analysis showed that the main photometric catalogues of stars are heterogeneous (different telescopes, detectors and filters are used for different zones), suffer from incompleteness, requiring complex calculations of stellar magnitudes from one photometric system to another. Astrometric catalogues of the period before GAIA significantly depended on the accuracy of determining errors in the proper motions of stars, which led to the “aging” of catalogues

and made it difficult to use them in astroorientation and astrogation systems. The problematic issues of using the existing astrometric and photometric catalogues of stars are considered.

The paper considers issues related to the creation and maintenance of a domestic photometric and astrometric catalog of stars of the entire sky in the interests of providing optoelectronic information systems. Its main consumers are identified in terms of using the catalog data by information optoelectronic systems for various purposes. The requirements for such catalogues are defined, both in terms of completeness of photometric data and in terms of astrometric data. The necessity has been determined of creating a centralized system for maintaining such a catalog and bringing to any interested consumers the coordinate and photometric information regarding the background stellar environment required, including that in the near-infrared range. Proposals have been formulated for launching the work on the developing a network of wide-angle telescopes necessary to support the domestic photometric and astrometric catalog of stars of the entire sky.

Keywords: domestic astrophotometric catalog of all-sky stars, optical-electronic information tool, photometric system, celestial navigation.

Contacts: Vladislav V. Shirobokov (17126vlad@gmail.com).

For citation: Oleynikov M. I., Shirobokov V. V., Dodonov S. N., Shulgina N. V. Development of domestic astrophotometric catalog of stars of the entire sky in the development of optical-electronic information systems // Transactions of IAA RAS. 2024. Vol. 71. P. 40–45.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.71.40-45>

Введение

В настоящее время современные оптико-электронные информационные системы (ОЭИС) используются для решения широкого круга научно-практических задач. К таким задачам, в том числе, относятся задачи астроориентации, астронавигации, а также задачи определения блеска естественных и техногенных объектов, находящихся в околоземном космическом пространстве (ОКП). При разработке и использовании таких систем в качестве опорных данных по пространственному положению или для привязки наблюдений в выбранной фотометрической полосе используются астрометрические и фотометрические каталоги звезд. Отметим, что в настоящей статье мы рассматриваем оптико-электронные информационные системы, к задачам которых относятся следующие (задачи обеспечения): определение ориентации и местоположения естественных и техногенных объектов, находящихся в ОКП на орбите, определение ориентации и местоположения воздушных судов, кораблей и т. д.

К основным (целевым) задачам можно отнести следующие: координатная привязка и определение параметров орбитального движения естественных и техногенных объектов, находящихся в ОКП, — космического мусора ([Молотов и др., 2020](#)), а также привязки их блеска к эталонной фотометрической шкале.

Так, например, для работы современных БОКЗ (прибор звездной ориентации) необходимо выполнение следующих требований:

- точность ориентации до $0.1-1''$;
- время обновления информации о положении не хуже 10–100 мс;
- определение координат и угловых скоростей при скоростях вращения до $15-30^\circ/\text{с}$.

Для выполнения указанных требований при проектировании подобных приборов необходимо

учитывать наличие астрометрической и фотометрической информации с соответствующими погрешностями и в объеме, необходимом для достижения заданных точностей с учетом поля зрения прибора и предельной регистрируемой звездной величиной.

Исходя из средних параметров современных БОКЗ можно утверждать, что для реализации абсолютной ориентации с точностью $1''$ и лучше необходимы астрометрические каталоги звезд с погрешностями $0.1''$ и лучше, содержащие звезды до $12...15$ зв. величины, у которых кроме астрометрических присутствуют и фотометрические данные.

Анализ проблем использования существующих каталогов

До настоящего времени используется разделение астрономических каталогов на астрометрические и фотометрические ([Центр астрономических данных в Страсбурге, CDS](#)), в зависимости от того, чему уделяется большее внимание — высокой точности координат звезд или их физическим (спектральным) характеристикам. В то же время и те и другие содержат по необходимости и координатную, и фотометрическую информацию разного рода. Астрометрические каталоги сопровождались с самого начала оценками визуальной звездной величины, а фотометрические исследования безусловно вынуждены были перейти от карт неба для отождествления к полноценным координатным данным по мере перехода к более слабым звездам.

Астрометрические каталоги эволюционировали от списков координат звезд на определенную эпоху наблюдений к созданию фундаментальных каталогов в фиксированной системе координат и определению собственных движений звезд на небесной сфере. Современный уровень точности наблюдений требует полной информации о звезд

дах: положения звезд в пространстве определяется сферическими координатами на небесной сфере и расстоянием до звезд (параллаксом), а скорости звезд в пространстве определяются собственными движениями и лучевыми скоростями звезд. В настоящее время достигнута высокая точность координат звезд, определяемых методами космической астрометрии (GAIA) — лучше 0.05 мсд (миллисекунд дуги) для звезд до 15-й звездной величины, лучше 0.1 мсд для звезд до 17-й звездной величины ([Gaia Early Data Release, 2020](#); [ESA's website](#); [Brown, Vallenari, 2018](#)).

Фундаментальные астрометрические каталоги создаются на основе оригинальных наблюдений (не использующих данные предшествующих наблюдений) и привязываются к определенной системе отсчета (координат), фиксируемой решениями Международного Астрономического Союза (МАС / IAU). Такими каталогами являются Фундаментальные каталоги серии FK (FK, FK2...FK6), на смену которым пришли каталоги космических проектов Hipparcos и GAIA, привязанные к системе ICRS. Высокоточные измерения координат, выполняемые в течение достаточно длительного времени, позволяют определить собственные движения звезд на небесной сфере и параллаксы (расстояния до звезд), что обеспечивает возможность использования каталогов в будущем на какое-то продолжительное время.

Существует проблема «старения» каталогов, когда погрешности в определении собственных движений звезд приводят к значительным ошибкам координат на эпоху текущих наблюдений. Пример анализа такого рода приведен на рис. 1. Если на эпоху наблюдений точность каталога Hipparcos была на уровне 1 мсд, а вторичного каталога Tycho 2 — около 20 мсд, то к 2050 г. точность координат Hipparcos падает до 60 мсд, а Tycho 2 — до 150 мсд ([Hog et al., 2000](#)).

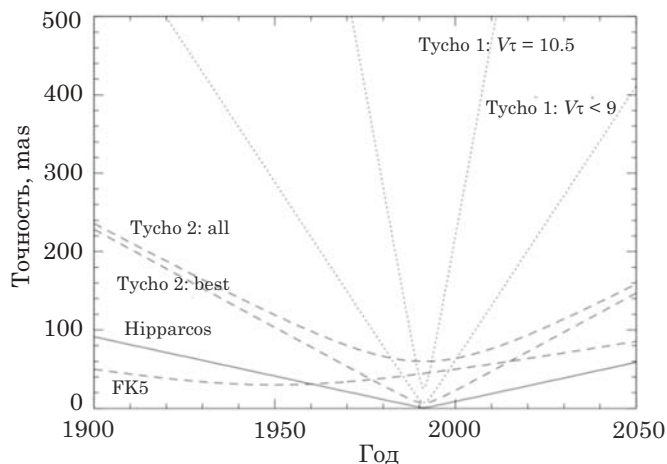


Рис. 1. Оценки деградации точности координат звезд в каталогах Hipparcos и Tycho

Если с астрометрическими каталогами все обстоит достаточно определенно, то для фотометрических исследований до настоящего времени нет единого общего стандарта. Сложность измерений потоков электромагнитного излучения звезд определяется тем, что помимо качества изготовления фотометрических фильтров на наблюдаемую величину оказывают влияние и спектральные характеристики инструмента (телескопа и фотоприемника), и наличие эталонов/стандартов для калибровки, и атмосфера. До недавнего времени даже не было общепризнанной и рекомендованной МАС системы фотометрических фильтров, которые позволяли бы сравнивать данные разных инструментов.

Первой значительной шестичерной фотометрической системой была UVBGRI, предложенная Стеббинсом (Stebbins) и Уитфордом (Whitford) в 1943 г. и реализованная в виде каталога около 1340 звезд по наблюдениям в обсерватории Маунт Вильсон. Долгие годы эта система была широко используемой и позволила исследовать законы межзвездного покраснения и многие физические параметры звезд.

Основным недостатком системы Стеббинса были неоднозначные результаты, получаемые при анализе наблюдений с фильтрами в области бальмеровского скачка. Это заметил Джонсон (G. Johnson) в 50-х годах и предложил свою фотометрическую систему UBВ, уменьшающую влияние бальмеровского скачка. Впоследствии эта система была дополнена множеством вариантов и получила широкое распространение, ([Bessel, 2005](#); [Bessel, Murphy, 2012](#)).

Традиционная UBВ(RI) фотометрия Джонсона – Моргана с расширением в красную область (рис. 2) спектра получила широчайшее распространение и используется как инструмент для самых разнообразных астрофизических исследований. Однако широкие и пересекающиеся «крылья»

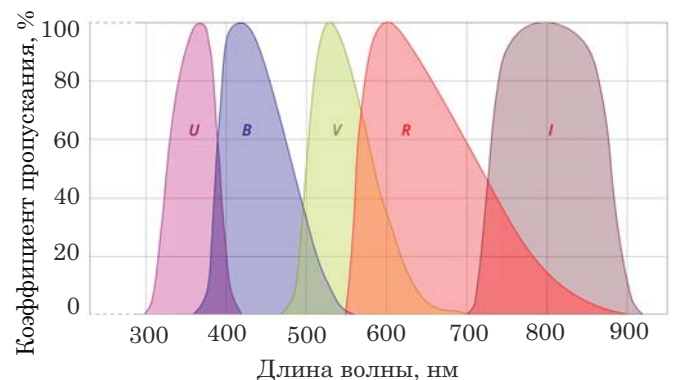


Рис. 2. Кривые пропускания фильтров стандартной системы UBВ Джонсона – Моргана – Казинса

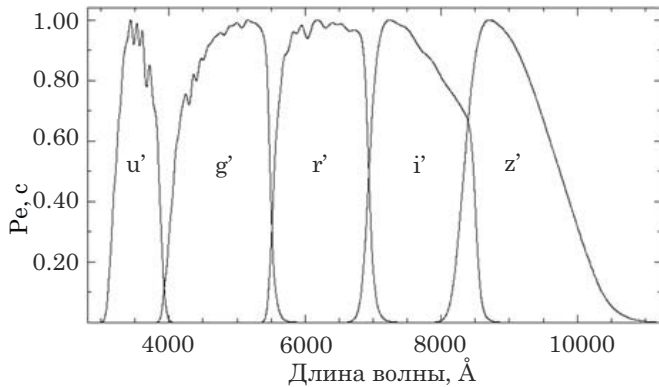


Рис. 3. Кривые пропускания фильтров u' , g' , r' , i' , z' обзора SDSS

функции пропускания фильтров дают смазанную картину распределения потоков в спектрах звезд. Это затрудняет оценки параметров объектов, таких как спектральный класс, температура и прочие.

Поэтому для получения более рафинированных результатов широкополосной фотометрии был предложен новый вариант фильтров – система u , g , r , i , z (рис. 3). Впервые эти фильтры были использованы в проекте SDSS ([Sloan Digital Sky Survey](#)), поэтому эту систему фильтров часто называют Слоуновской фотометрической системой. В настоящее время она получила очень широкое распространение на большинстве современных мощных инструментов, таких как Pan-STARRS, LSST и др. Функции пропускания этих фильтров пересекаются очень мало, то есть эти фильтры «вырезают» из спектрального распределения энергии звезды довольно четко разделенные фрагменты.

Несмотря на значительное улучшение качества фотометрии с новой системой фильтров, остается ряд проблем, которые существенно затрудняют сравнение данных, полученных на разных инструментах. Реальная полоса пропускания каждого инструмента определяется не только параметрами самого фильтра (которые могут меняться от партии к партии), но и оптической системой телескопа, спектральной чувствительностью фотоприемника, состоянием атмосферы и пр. Окончательный результат пропускания инструмента представляет собой свертку функций перечисленных факторов, при этом возможно смещение эффективной длины волны фильтра и изменение ширины полосы пропускания фильтра. Для достижения заданных значений фотометрической точности необходимо всегда иметь в изображении, получаемом на телескопе, несколько десятков (лучше сотен) объектов с хорошо измеренной фотометрией. Тогда, используя их как третичные фотометрические стандарты и применяя синтетическую фотометрию ([Pickles, Depagne, 2010](#)), можно получить данные, независимые от состояния атмосферы и с учётом реаль-

ных характеристик пропускания оптики телескопа и используемых фильтров, включая квантовую эффективность детектора.

Таким образом, создание каталога звезд предполагает наличие опорного каталога, сформированного на основе объединения первичных астрометрического и фотометрического каталогов, а также их переработки и селекции. Оценка скорости деградации точностных характеристик координатной и некоординатной информации звездобразных объектов, используемых для включения в каталог звезд, необходима, в частности, для обоснования времени начала работ над созданием каталога звезд и интервала его обновления на основе точностных характеристик опорного каталога.

Для формирования астрометрической части опорного каталога следует использовать наилучший на текущий момент астрометрический каталог звезд всего неба GAIA-DR3, а формирование фотометрической части опорного каталога в качестве базовой можно использовать данные обзоров SDSS и Pan-STARRS ([Magnier et al., 2016](#)). Обзор SDSS, покрывающий 14555 кв. град. северного неба, выполнен с хорошей фотометрической точностью: $\Delta u = 0.013^m$, $\Delta g = 0.008^m$, $\Delta r = 0.008^m$, $\Delta i = 0.007^m$, $\Delta z = 0.008^m$. Обзор Pan-STARRS покрывает все северное небо до $\delta < -30^\circ$ в фильтрах g , r , i , z , у с 5 σ -пределами детектирования для звездобразных объектов 23.3 m , 23.2 m , 23.1 m , 22.3 m , 21.4 m соответственно, выполнен с фотометрическими точностями от 0.007 m до 0.012 m в зависимости от фильтра. Учитывая отсутствие в SDSS и Pan-STARRS фотометрии для звезд ярче 14 m можно использовать результаты обзора ATLAS ([Tonry et al., 2018](#)), в котором фотометрия ярких звезд присутствует, а также для расширения обзора ниже $\delta = -30^\circ$.

Таким образом, при сочетании данных астрометрии (GAIA DR3) и фотометрии (SDSS, Pan-STARRS и ATLAS) может быть получен опорный каталог астрометрических и фотометрических данных.

Предложения по созданию и поддержанию отечественного фотометрического каталога

Современные каталоги звезд должны содержать максимально полную и точную информацию о кинематических и физических характеристиках объектов. Это является базой для фундаментальных научных исследований о строении и эволюции Вселенной. Помимо проблем фундаментальной науки такие каталоги нужны и для решения более практических задач исследования космического пространства.

Создание и поддержание каталога звезд предполагает проведение наблюдений звездного неба. Результаты наблюдений в виде цифровых изображений содержат в себе информацию о де-

сятках тысяч объектов: звездах и галактиках. Используя всю доступную информацию опорного каталога для создания каталога звезд необходимо использовать только звездобразные объекты с исключением переменных и тесных двойных систем.

Задача одновременной фотометрии и высокоточной астрометрии всего неба накладывает серьезные ограничения на выбор оптико-электронной системы для её решения:

- необходимо выбрать оптимальный масштаб изображения (результатирующую светосилу телескопа), который позволил бы измерять центр тяжести изображения звезды с заданной точностью (лучше 10 mas);

- выбранный масштаб и поле зрения телескопа должны позволять получать значимые по площади области неба в течение одной наблюдательной ночи;

- квантовая эффективность всей оптической системы (телескоп + фильтры + детектор) должна быть достаточно высокой для получения заданной фотометрической точности в 0.02^m в каждом фильтре за время минимальной экспозиции;

- детектор изображений должен иметь минимальные собственные шумы и обладать высокой стабильностью во времени для сохранения фотометрической точности наблюдений.

Для создания и поддержания каталога звезд необходимы однородные круглогодичные наблюдения на широкоугольных телескопах двухметрового класса оснащенных большеформатными приемниками и фильтрами фотометрической системы Слоуновского обзора. Телескопы должны быть распределены по территории РФ и полностью автоматизированы. Анализ данных астроклимата РФ показывает, что среднее качество изображений составляет от 1.5" до 2", а среднее число ночных часов, пригодных для наблюдений, находится в диапазоне (1300 ± 200) часов в год ([Панчук, 2020](#)). Для покрытия северного неба, это около 20000 кв. градусов, понадобится система из нескольких широкоугольных телескопов.

Для обеспечения удаленного оперативного управления и контроля наблюдений, а также для обработки полученных данных необходимо создать Центр управления и обработки наблюдений.

В Российской Федерации в рассматриваемой предметной области исследования практически не ведутся. В ГАИШ МГУ в течение многих лет разрабатывается космический проект «Лира-Б». Он предполагает создание с борта МКС многоцветного высокоточного фотометрического каталога звезд всего неба до 17-й звездной величины. Число звезд в каталоге 300–400 млн, число фотометрических полос – 10, погрешность фотометрических измерений 0.0001^m (для звезд 12^m), 0.01^m (для остальных звезд). Каталог мог бы служить основой для

создания бортовых каталогов систем звездной ориентации следующего поколения, однако из-за отсутствия финансирования проект находится в начальной стадии и перспективы его развития в настоящее время не ясны.

Заключение

Несмотря на большое количество и разнообразие каталогов звезд, имеются следующие проблемные вопросы по их использованию:

1. В действующей нормативно-технической документации по контролю околоземного пространства не определены:

- каталоги звезд, которые должны быть использованы на этапах создания и применения различных систем;

- унифицированный научно-методический аппарат, определяющий порядок расчета координатной информации;

- унифицированный научно-методический аппарат пересчета навигационных данных в различные системы координат.

2. В нашей стране не существует отечественного опорного астрометрического и фотометрического каталога звезд, который бы содержал астрометрические данные о звездах по всей небесной сфере и фотометрические данные, приведенные в единую фотометрическую систему.

3. Систематическая ошибка определения пронающей способности различных наземных оптико-электронных системах может достигать 3 звездных величин из-за отличия блеска одних и тех же звезд в различных каталогах.

Также существенным недостатком является отсутствие единого методического подхода по использованию разнородных фотометрических систем звездных каталогов в части их применения для решения задач привязки наблюдаемых оптических сигналов к опорным звездам ([Поляков и др., 2022](#); [Shirobokov, Sytko, 2023](#); [Makhov et al., 2023](#)).

Для решения задач обеспечения ОЭИС достоверной информацией астротометрические каталоги должны обладать следующими характеристиками:

- СКО определения положения звезд: не хуже 10 мсд (миллисекунд дуги);

- СКО фотометрических данных для стабильных звезд: не хуже 0.02^m ;

- фотометрические данные звезд, приведенные в единую фотометрическую систему;

- диапазон блеска звезд: до 15-й звездной величины (до 20 в случае наблюдений за малыми фрагментами космического мусора);

- число звезд в поле зрения 10×10 угл. мин: не менее 4;

- общее число звезд в каталоге: не менее 10^7 .

В связи с этим возникает необходимость создания и поддержания отечественного однородно-

го астрометрического и фотометрического многоцветного каталога звезд всего неба для обеспечения потребностей систем контроля ОКП.

Необходимо рассмотреть возможность открытия не только опытно-конструкторской работы по созданию отечественного астрометрического и фотометрического каталога звезд всего неба, но и проработать вопросы создания централизованной системы поддержания такого каталога и доведения до любых заинтересованных потребителей требуемой координатной и некоординатной информации в части фоновой звездной обстановки.

Указанная система должна содержать в себе как непосредственно наблюдательные средства, так и центр обработки данных наблюдения, формирования и поддержания отечественного астрометрического и фотометрического каталога звезд всего неба.

Разработка и эксплуатация современных ОЭИС, решающих задачи в составе систем и подсистем астроориентации и астронавигации не представляется возможным без использования данных из современных астрометрических и фотометрических каталогов, которые востребованы при решении задач наблюдения за техногенными объектами в ОКП, в частности за фрагментами космического мусора. Вместе с тем имеется ряд технических сложностей, не позволяющих наиболее эффективно использовать данные современных астрометрических и фотометрических каталогов при разработке и эксплуатации указанных ОЭИС, как в части астрометрических данных, так и в части фотометрических. Приведенные факторы подчеркивают возрастающую актуальность для постановки работ по созданию отечественного астрометрического и фотометрического каталога звезд всего неба, данные которого будут использоваться для создания и эксплуатации отечественных ОЭИС.

Благодарность

Исследования выполнены в рамках гранта Президента Российской Федерации МК-2140.2022.4.

Литература

Махов В. Е., Ширококов В. В., Емельянов А. В. и др. Оптико-электронная система высокого пространственного разрешения при наблюдении за удаленными объектами // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 1 (295). С. 4–13.

Молотов И. Е., Агапов В. М., Стрельцов А. И. и др. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2020. № 7. 17 с.

Панчук А. В. Научные труды ИНАСАН. 2020. Т. 5, Вып. 6. С. 344–350.

Поляков В. Е., Емельянов А. В., Ширококов В. В., Закутаев А. А. Твердотельный волоконный лазер желтого спектрального диапазона на красителе родамине 6Ж с волоконным оптическим усилителем для формирования натриевых лазерных опорных звезд // Астрономический журнал. 2022. Т. 99, № 12. С. 1245–1253.

Центр астрономических данных в Страсбурге. Strasbourg astronomical Data Center [Электронный ресурс] URL: <http://cdsarc.u-strasbg.fr/cats/II.htm> (дата обращения: 29.05.24).

ASA Astrosysteme GmbH [Электронный ресурс]. URL: <https://www.astrosysteme.com/products/> (дата обращения 07.08.2024).

Bessell M. Standard photometric systems // Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2005. Vol. 43. P. 293–336.

Bessell M., Murphy S. Spectrophotometric libraries, revised photonic passbands and zero-points for UBVRI, hipparcos and tycho photometry // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2012. Vol. 124, Is. 912. P. 140. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2012PASP..124..140B/abstract> (дата обращения 04.10.2024).

Brown A. G. A., Vallenari A. Gaia Collaboration et al. Gaia Data Release 2. The astrometric solution // Astronomy and Astrophysics. 2018. Vol. 616, A2. 25 p.

ESA's website for the Gaia Scientific Community [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia> (дата обращения 05.10.2024).

Gaia Data Release 3 (GAIA DR3) Documentation release 1.0 European Space Agency (ESA) and Gaia Data Processing and Analysis Consortium [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr3> (дата обращения 05.10.2024).

Hog E., Fabricius C., Makarov V. et al. The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 million brightest stars // Astronomy and Astrophysics. 2000. Vol. 355. 27 p.

Magnier E. A., Chambers K. C., Flewelling H. A., et al. The Pan-STARRS1 database and data products. arXiv: 1612.05240. 2016a. 63 p.

Makhov V. E., Shirokov V. V., Sytko I. I. Methods of increasing the resolution of signals in optical systems // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 402. 03015. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340203015>.

Pickles A., Depagne É. All-sky spectrally matched UBVRI - ZY and u · g · r · i · z · magnitudes for stars in the Tycho2 Catalog // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 2010. Vol. 122, Is. 898. P. 1437.

Shirokov V. V., Sytko I. I. Improving the resolution of optical signals in transport systems // International Scientific Conference. Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East (AFE-2022) Agricultural Cyber. 2023 – Physical Systems. 2023. Vol. 2, no. 706. P. 400–408.

The thirteenth data release of the Sloan Digital Sky Survey: First spectroscopic data from the SDSS-IV survey mapping nearby galaxies at Apache Point Observatory [Электронный ресурс] URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017ApJS..233...25A/abstract> (дата обращения: 28.06.24).

Tonry J., Denneau L., Flewelling H., et al. The ATLAS All-sky stellar reference catalog // The Astrophysical Journal. 2018. Vol. 867, Issue 2. PP. 105–131.