

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА**

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени П.К. ШТЕРНБЕРГА**

На правах рукописи
УДК 523.03, 523.08

Миронов Алексей Васильевич



**ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
WBVR И «ЛИРА-Б» ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОЙ ФОТОМЕТРИИ
ЗВЕЗД**

Специальность 01.03.02 астрофизика и звездная астрономия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2014

Работа выполнена в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова.

Официальные оппоненты:

Бикмаев Ильфан Фяритович
доктор физико-математических наук, доцент. Казанский (Приволжский) Федеральный университет, Институт Физики, Отделение астрофизики, профессор кафедры астрономии и космической геодезии.

Бобылев Вадим Вадимович
доктор физико-математических наук.
Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Заведующий лабораторией динамики Галактики.

Марсаков Владимир Андреевич
доктор физико-математических наук, профессор.
Южный Федеральный университет, Физический факультет, профессор кафедры физики космоса.

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук».

Защита состоится « 15 » мая 2014 года в 14 часов на заседании Совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д501.001.86 при МГУ имени М.В.Ломоносова
Адрес: Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга (ГАИШ МГУ) Университетский проспект, дом 13, 119991, Москва,

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: Москва, Ломоносовский проспект, 27, Фундаментальная библиотека

Автореферат разослан « 10 » февраля 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Алексеев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Фотометрические измерения, проведенные в ходе миссии Hipparcos (в главном канале), показали, что в космических экспериментах возможно достичь точности фотометрии на уровне $0^m,001-0^m,003$ не только при сравнении блеска близких источников на небе, но и при глобальных обзорах. [1]. Подобная же точность ожидается в осуществляемом проекте GAIA [2].

Многие текущие задачи требуют высокой точности фотометрических и спектрофотометрических измерений.

Во-первых, звездные величины совместно с координатами служат для целей ориентации и навигации космических аппаратов. Автомат в космосе должен уметь, направив свои датчики в произвольный участок неба, отождествить звезды, попавшие в поле зрения, определить координаты этого участка и вычислить собственную ориентацию. Сложность заключается в том, что спектральная чувствительность бортовых датчиков, как правило, сильно отличается от общепринятых в астрономии фотометрических полос в видимой области спектра. Чаще всего максимум чувствительности современных датчиков находится в красной или инфракрасной области. Современная астрофотометрия должна уметь по измерениям в одной части спектра предсказывать реакцию прибора на излучение звезд в любой другой полосе пропускания.

Во-вторых, чтобы решить эту проблему, нужно справиться с другой важнейшей задачей: на основе многоцветной фотометрии звезд восстановить распределение энергии в спектрах звезд. Непосредственное получение спектроэнергетических кривых является сложной и трудоемкой задачей. Невероятно, чтобы распределение энергии в спектре можно

было бы получить для миллионов слабых звезд от 15-й до 20-й звездной величины. Однако спектральное распределение энергии во многих случаях можно восстановить по результатам многоцветной фотометрии. Если эта задача будет решена успешно, то фундаментальная астрофизика получит данные о температуре, светимости и химическом составе атмосфер звезд, а прикладная астрономия — звездные величины в любой наперед заданной полосе реакции приемника. Для успешного решения этой задачи фотометрия должна быть высокоточной, то есть как случайные, так и систематические погрешности не должны превышать нескольких тысячных долей звездной величины. Задача восстановления распределения энергии в спектре по фотометрическим данным тесно связана с задачей спектральной классификации.

В-третьих, для понимания строения и эволюции звезд и звездных систем было и остается крайне необходимым изучение многочисленных и разнообразных эффектов переменности звезд. В последнее время возникает все больше задач, требующих предельно высокой фотометрической точности. Это изучение радиальных и нерадиальных пульсаций звезд, задачи астросейсмологии, кроме того, высокая точность требуется для поиска планет вне солнечной системы и для многого другого.

И, наконец, на совершенно новые рубежи вышла современная астрометрия. В последние десятилетия с Земли и из космоса было получено около миллиона измерений точных положений и собственных движений ярких звезд и измерены точные параллаксы практически всех звезд, удаленных на расстояние до 200 парсек от Солнца. Современная точность астрометрии — это примерно $0'',002$ угловой секунды. На повестку дня выходят задачи получения астрометрических данных с погрешностями, не превосходящими $0'',00001$ угловой секунды. Но поскольку распространение света в любой среде, кроме абсолютного вакуума, зависит от

длины волны, то эту задачу нельзя решить, если не располагать данными высокоточной многоцветной фотометрии.

Все перечисленные задачи требуют точности $0^m,001$ – $0^m,003$ величины и имеют важнейшее значение для современной фундаментальной и прикладной астрономии. Для их решения необходимо создать соответствующие фотометрические системы для наблюдений с поверхности Земли и из космоса. Следовательно, вопросы создания и методов применения многоцветных фотометрических систем, безусловно, являются актуальной темой современной астрономии. Ключевым вопросом здесь является повышение фотометрической точности, как в случайном, так и в систематическом отношении. Задача повышения точности напрямую связана с созданием систем фотометрических стандартов и калибровкой результатов измерений. Актуальность этих вопросов подтверждается тем, что в последнее десятилетие проведены и предполагаются к проведению ряд проектов астрометрических и фотометрических обзоров неба, преследующих различные цели. Лидирующее место в ряду этих проектов занимает космический эксперимент GAIA. Для всех этих проектов является актуальным решение задач уточнения фотометрических систем и создания сетей стандартов.

Внутренняя среднеквадратическая ошибка звездной величины для лучших фотометрических обзоров заявлена на уровне $0^m,003$ – $0^m,005$ величины. Однако сравнение разных фотометрических каталогов указывает на то, что наблюдения обычно имеют систематические ошибки, которые значительно выходят за пределы внутренней точности. Даже лучшие современные фотометрические обзоры, такие как 2MASS [3, 4] и SDSS [5], содержат систематические ошибки примерно в $0^m,01$ – $0^m,02$ величины [6].

Сегодня многие коллективы исследователей в разных странах планируют осуществить астрометрические и фотометрические обзоры неба

с различными целями как с поверхности Земли, так и из космоса [7, 8, 9, 10]. Требование повышения точности астрофотометрических измерений стимулирует преобразование астрофотометрии из раздела практической астрофизики в раздел астрономической метрологии, как это уже имеет место в астрометрии.

СТЕПЕНЬ РАЗРАБОТАННОСТИ ТЕМЫ

До начала настоящей работы, то есть в конце 70-х годов XX века, основной широкополосной фотометрической системой, в которой проводилось большинство астрономических наблюдений, была система *UBV*, созданная Джонсоном и Морганом [11, 12]. Однако различные исследователи (например [13, 14]) отмечали ряд существенных недостатков, допущенных при определении этой системы. Типичная случайная среднеквадратичная ошибка звездных величин, измеренных в системе *UBV*, составляла $\pm 0,02$. Систематические ошибки у разных авторов были существенно больше. Встающие астрономические задачи требовали существенного повышения точности фотометрии и проведения глобальных обзоров с целью создания высокоточных звездных каталогов. Поэтому во второй половине 80-х годов коллективом сотрудников ГАИШ МГУ с участием автора настоящей работы был создан «Каталог *WBVR*-величин ярких звезд северного неба» [15], выполненный в новой фотометрической системе *WBVR* [16]. Вскоре после этого на достижение сходных целей были направлены миссии *Hipparcos*, *SDSS*, *2MASS* и ряд других, однако в задачи этих миссий не входила высокоточная многоцветная фотометрия звезд в широком интервале звездных величин. Для решения этой задачи в настоящее время проводится миссия *GAIA* (Европейское космическое агентство) и готовится космический эксперимент «Лира-Б» (МГУ + Роскосмос).

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

Целями настоящей работы являются:

- анализ характеристик существующих и проектируемых широкополосных фотометрических систем, позволяющих получать высокоточные результаты;
- разработка методов высокоточных фотометрических измерений и методов создания однородных фотометрических каталогов;
- получение с помощью этих методов точных и надежных данных об основных фотометрических и спектрофотометрических стандартах и о звездах–аналогах Солнца;
- разработка методов создания систем высокоточных глобальных фотометрических стандартов;
- открытие малоамплитудных переменных звезд и получение новых данных о них;
- разработка фотометрической системы для космического многоцветного обзора всего неба;
- оценка ожидаемых результатов космического эксперимента «Лири-Б».

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Все результаты, выносимые на защиту, были получены методами, разработанными впервые, и являются новыми.

Впервые была разработана широкополосная фотометрическая система *WBVR*, основанная на новых принципах и позволяющая переводить полученные в ней звездные величины в другие системы с высокой точностью и контролировать систематические ошибки.

Впервые был разработан алгоритм вычисления модели спектральной экстинкции в атмосфере Земли; модель используется при редукциях

фотометрических измерений за атмосферу в качестве начального приближения.

Впервые было показано, что точность индивидуального измерения звездных величин в фотометрическом каталоге *WBVR*-величин звезд северного неба не уступает точности внеатмосферной спутниковой фотометрии.

Впервые были получены показатели цвета Солнца в системе *WBVR*.

Впервые был разработан метод сравнения данных фотометрических каталогов, полученных в различных фотометрических системах, на основе сравнения каталогов *WBVR*, *Hipparcos* и *Tycho* с целью выявления и исключения их взаимных систематических ошибок; в результате получен каталог 6484 фотометрических стандартов на северном небе [18].

Впервые был разработан метод пересчета звездных величин, содержащихся в традиционных звездных каталогах, на систему типичного (в общем случае – произвольного) фоточувствительного приемника.

Впервые разработаны принципы проведения космического многоцветного фотометрического обзора неба, направленные на достижение высокой точности измерений, для одновременных измерений в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Впервые создана новая 10-полосная фотометрическая система для широкополосных космических обзоров, позволяющая получать фотометрическую информацию с высокой точностью и определять такие физические параметры звезд, как эффективная температура, величина ускорения силы тяжести на поверхности звезды и металличность, а также определять значение межзвездного поглощения.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ РАБОТЫ

Разработаны теоретические основы создания фотометрических систем нового типа [16, 17], позволяющих контролировать и, при появлении новых данных, исправлять систематические ошибки измерений. Разработана теория создания системы фотометрических стандартов и методы пересчета данных этой системы на другие многоцветные системы.

На практике создана система из 6484 высокоточных стандартов на северном небе [18], определены показатели цвета Солнца в системе *WBVR* [19], составлен список аналогов Солнца [20] и звезд, пригодных для программы SETI [21], выведены уравнения перевода величин *WBVR* на систему типичного приемника на основе кремниевого ПЗС [22].

Разработаны принципы многоцветного фотометрического обзора неба с борта космического аппарата [23] и создана 10-цветная фотометрическая система для обзорных наблюдений из космоса [24].

Диссертация имеет большую научную значимость, так как на основе сделанных в ней выводов, созданных фотометрических каталогов, и, применяя описанные в ней методики фотометрических измерений, стало возможным достигать более высокой точности фотометрии и получать новые, недоступные ранее, данные об астрономических объектах.

Диссертация имеет большую практическую значимость, так как использование полученных в ней результатов позволяет рассчитывать звездные величины в любых наперед заданных фотометрических полосах. Это обеспечивает нужды многочисленных конструкторских организаций, проектирующих системы ориентации космических аппаратов.

МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методология настоящего исследования основана на том, чтобы на всех этапах получения наблюдательного материала и его обработки были тщательно описаны все действия и алгоритмы. В большинстве опубликованных работ нет подробных описаний последовательности действий при проведении и обработке астрофотометрических измерений. Поэтому исследователь не в состоянии проанализировать возможные причины возникновения систематических погрешностей.

Основой методологии настоящего исследования являются требования метрологии для обеспечения воспроизводимости результатов, а именно: наличие эталона, использование определенных средств измерений и определение методик измерений и их обработки.

Для проведения измерений и их обработки на каждом этапе нами были созданы новые или существенно уточнены использовавшиеся ранее методы.

ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

Разработана система принципов для создания широкополосных фотометрических систем для получения высокоточных астрофотометрических данных. В результате получены высокоточные измерения в фотометрической системе *WBVR*.

Разработан метод построения модели атмосферной экстинкции. В результате применения этого метода при обработке фотометрических наблюдений повышена точность учета ослабления света в атмосфере Земли.

Определены точные показатели цвета Солнца в фотометрической системе *WBVR*.

Разработан метод сравнения каталогов, выполненных в разных фотометрических системах; обнаружены систематические ошибки высокоточных фотометрических каталогов, зависящие от небесных координат.

Разработан корреляционный метод открытия фотометрической переменности звезд и создан каталог 6484 фотометрических стандартов северного неба.

Разработаны принципы многоцветного фотометрического обзора неба с борта пилотируемой космической станции.

Разработана новая широкополосная 10-цветная фотометрическая система «Лира-Б»; показаны возможности этой системы для определения межзвездной экстинкции и трехмерной спектральной классификации звезд.

Предложен метод пересчета звездных величин в системах WBVR и «Лира-Б» на систему произвольного фотоприемника.

СТЕПЕНЬ ДОСТОВЕРНОСТИ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты, представленные в различных разделах диссертации, неоднократно докладывались на многочисленных всероссийских и международных конференциях, в частности, на регулярных совещаниях рабочей группы Астросовета АН СССР «Фотометрические и спектрофотометрические стандарты», на JENAM-2000 и JENAM-2003, на конференциях исследователей переменных звезд, на конференциях «Census of the Galaxy» и «Stellar Photometry: Past, Present and Future» в Вильнюсе, на конференции «The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardisation» в Бельгии, на конференции «Variable Stars, the Galactic Halo and Galaxy Formation» в Звенигороде, на конференции «Calibration and Standardization of Large Surveys and Missions in Astronomy and Astrophysics» в ФермиЛаб (Батавия, штат Иллинойс, США), а

также на конференциях МГУ «Ломоносовские чтения», на семинарах научных отделов в ГАИШ, ГАО (Пулково), НИИ КраО (Украина) и др.

На опубликованные работы, в которых изложено основное содержание диссертации, существуют ссылки 78 авторов (по базе данных ADS citation list).

Полученные в диссертации результаты могут найти применение во всех астрономических учреждениях, где ведутся наблюдения и исследования астрономических объектов методами многоцветной фотометрии, в частности в ГАИШ МГУ, САО РАН, ИНАСАН, НИИ КраО, ГАО РАН и др. Также эти результаты могут применяться в организациях, занимающихся разработкой приборов для космических исследований и обработкой данных, поступающих с борта космических аппаратов, в частности в ИКИ РАН, НПО им. С.А.Лавочкина, РКК «Энергия» и др.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, семи приложений и списка литературы.

Во введении, в соответствии с ГОСТ 7.0.11-2011, дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность исследования, формулируются цели и задачи работы, кратко излагается содержание разделов основной части диссертации, обоснована теоретическая и практическая значимость работы, описана методология и методы исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, отмечается новизна полученных результатов, а также степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена новой фотометрической системе WBVR, созданной на основе опыта электрофотометрических наблюдений, проводившихся в Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции (обсерватории) ГАИШ МГУ с 1976 по 1985 год [16]. Новизна этой системы заключается не только и не столько в применении оптимального светофильтра для ультрафиолетовой полосы W, предложенной В.Страйжисом, но в установлении четких и однозначных определений кривых реакции и нуль-пунктов каждой фотометрической полосы и подробно описанных методик выноса измерений за атмосферу и приведения их на стандартную систему. Другими словами, система реализует требования, сформулированные в метрологии для обеспечения воспроизводимости измерений, а именно: наличие эталона, применение хорошо исследованных средств измерений и строго определенных методик.

Для работы в системе WBVR был создан первичный стандарт и сеть вторичных стандартов по всему небу. На первом этапе сеть стандартов состояла из 62 объектов. Постоянство первичного стандарта было тщательно исследовано, а величины вторичных стандартов были увязаны в единую систему методом наименьших квадратов. Учет ослабления света в земной атмосфере проводился методом Халиуллина-Мошкалева [25]. Для эффективного применения этого метода была создана программа расчета спектрального пропускания атмосферы, служащая начальным приближением.

В системе WBVR в 1985–1988 годах были проведены наблюдения всех звезд северного неба, имеющих $V < 7,2$ и $\delta > -15^\circ$. На основе этих наблюдений был создан каталог WBVR-величин ярких звезд (Тянь-Шаньский каталог) объемом 13600 объектов [15]. В ходе создания этого каталога сеть вторичных стандартов была расширена до 189 объектов.

Во второй главе описывается работа по определению показателей цвета Солнца, для чего было произведено усовершенствование аппаратуры и отладка методик контроля параметров фотоприемника. Излучение Солнца, отраженное от экрана из сернистого бария, сравнивалось непосредственно с потоками от ярких звезд. Кроме определения показателей цвета Солнца, была выполнена фотометрия звезд Гиад. В результате этих наблюдений был сделан вывод, что в окрестностях Солнца присутствуют несколько подсистем звезд спектрального класса G2 V, различающихся возрастом и металличностью [19].

На основе анализа данных в разных фотометрических каталогах и с использованием полученных показателей цвета Солнца был проведен поиск аналогов Солнца [20] и выбор оптимальных объектов для программы SETI [21].

В третьей главе проводится сравнение звездных величин в высокоточных фотометрических каталогах, а именно в каталоге Hipparcos и каталоге WBVR-величин [26]. Для этого был применен метод построения трансформационных полиномов третьего порядка с помощью алгоритма Маркгардта-Левенберга, который позволяет найти коэффициенты модели и определить их значимость. На первом цикле решения модель представляла собой полный кубический полином от показателей цвета ($W - B$), ($B - V$) и ($V - R$). После каждого очередного цикла решения член с коэффициентом, значимость которого была наименьшей, отбрасывался, и решение производилось снова. Этот процесс повторялся до тех пор, пока все оставшиеся коэффициенты не становились значимыми. С помощью найденного полинома перевода величин из каталога WBVR в величину H_p Hipparcos удалось добиться того, что среднеквадратическое отклонение наблюдаемой разности ($H_p - V$) от вычисленной составило $0^m,002$, т.е. ошибки перевода не превосходили оши-

бок измерений. Это позволило проанализировать поведение величины $(H_p - V)_{\text{obs}} - (H_p - V)_{\text{calc}}$ в разных направлениях на небесной сфере. В результате было выявлено наличие систематических ошибок, зависящих от небесных координат. Амплитуда этих ошибок достигает $0^{\text{m}},015$, что существенно больше случайных ошибок измерений. Часть этих ошибок связана с погрешностями наблюдений и обработки данных в системе WBVR, но, по крайней мере, одна зона больших величин разности $(H_p - V)_{\text{obs}} - (H_p - V)_{\text{calc}}$, находящаяся в районе полюса эклиптики, свидетельствует о систематических ошибках фотометрии Hipparcos. В итоге был составлен список из примерно 8000 звезд, показавших наилучшее согласие величин H_p Hipparcos и V системы WBVR. Этот список стал рассматриваться как обширный набор кандидатов в стандарты фотометрической системы WBVR.

В конце третьей главы приведен пример предвычисления звездных величин в фотометрической системе произвольного фотоприемника на основе данных из имеющихся точных фотометрических и спектрофотометрических каталогов [22]. В качестве такого примера составлена группа формул для вычисления звездных величин в системе типичного ПЗС. Исходными данными служили звездные величины из каталога WBVR-величин, из 13-цветной «Аризонской» системы Джонсона и Митчелла [27], из каталогов VRI-величин Кузинса [28], а также из каталогов Hipparcos, Tycho и 2MASS.

Четвертая глава посвящена разработке и верификации корреляционного метода обнаружения переменных звезд при помощи одновременных многоканальных наблюдений [18, 26]. Идея метода состоит в том, что при одновременных измерениях в нескольких каналах, что типично для многоцветной фотометрии, изменения блеска переменной звезды в разных каналах должны быть скоррелированы. Для каждой па-

ры каналов по формулам метода вычисляется параметр, обозначенный нами как MZ , представляющий собой отношение парного коэффициента линейной корреляции к ошибке этого коэффициента. Статистика параметра MZ близка к нормальному распределению, потому что если $MZ > 3$, то звезда с большой степенью вероятности является переменной. Метод позволяет обнаруживать переменность, даже если амплитуда изменений блеска звезды не превышает 1σ . С помощью этого метода на основе данных одновременных измерений в каталогах Hipparcos и Tycho были проверены на переменность звезды списка кандидатов в стандарты, о котором говорилось в предыдущей главе. После этого анализа из списка кандидатов были удалены все звезды, входящие в Общий каталог переменных звезд, в каталог звезд, заподозренных в переменности (NSV), и в списки Американской ассоциации наблюдателей переменных звезд (AAVSO), а также имеющие соответствующий флаг в поле переменности в каталоге Hipparcos. Затем из списка были удалены звезды, для которых $MZ > 2$. Оставшиеся 6484 звезды могут считаться надежными стандартами системы WBVR.

В пятой главе излагаются цели и принципы реализации космического астрофотометрического проекта «Лири-Б» с целью проведения многоцветного фотометрического обзора неба с борта Международной космической станции [23].

Современный обзорный фотометрический каталог должен содержать большое число фотометрических полос: 4–5 в видимом диапазоне с охватом ИК- и УФ-диапазонов; каталог должен охватывать весь диапазон звездных величин от ярчайших звезд до умеренной (16^m – 17^m) или большой ($>20^m$) предельной звездной величины; измерения должны иметь малые погрешности, как случайные, так и систематические (порядка $0^m,01$ для предельной звездной величины и не хуже $0^m,001$ для

объектов на 4^m-5^m ярче предела); наконец, обзор должен охватывать всю небесную сферу. В настоящее время такого каталога не существует.

В ГАИШ МГУ было принято решение о необходимости проведения космического эксперимента по наблюдениям звезд до 16-й звездной величины в десяти спектральных полосах и было подготовлено Техническое задание на космический эксперимент «Многоцветный фотометрический обзор неба» (шифр «Лира-Б»). Проект включен в долговременную программу прикладных научных исследований и экспериментов, планируемых для проведения на Российском Сегменте Международной Космической Станции (МКС). Техническое задание утверждено в 1999 году. Активная работа по разработке эксперимента ведется с 2007 года. В настоящее время завершен эскизный проект.

Обзор должен быть проведен с высокой фотометрической точностью. В тех полосах, в которых сигнал от звезды максимален, все переменные звезды ярче 12^m , включая самые яркие, будут измерены с результирующей погрешностью не превышающей $0^m,001$, а более слабые объекты — с погрешностью не более $0^m,01-0^m,02^m$. Будут приняты специальные меры, чтобы с высокой точностью измерить блеск ярких звезд от 3^m включительно.

Для достижения этих целей были разработаны принципы фотометрического обзора неба с борта Международной космической станции. Проведенные расчеты и моделирование привели к выводу о том, что в число этих принципов должны входить следующие технические решения.

Оптимальный космический телескоп на МКС должен быть построен по системе Ричи-Кретьена с афокальным линзовым корректором, иметь фокусное расстояние около 3 м, диаметр главного зеркала должен составлять 500 мм.

Обзор должен проводиться в сканирующем режиме. Сканирование будет осуществляться орбитальным и прецессионным движениями МКС. В базовой ориентации оптическая ось телескопа лежит в плоскости орбиты станции, которая наклонена к экватору Земли на $51,6^\circ$. При этом центр поля зрения описывает на небесной сфере большой круг, плоскость которого совпадает с плоскостью орбиты. Орбита МКС прецессирует с периодом около 70 суток, в результате чего за период прецессии поле зрения телескопа дважды заметает на небе сферический пояс, ширина которого равна удвоенному наклонению орбиты ($2 \times 51,6^\circ$) плюс ширина полосы сканирования (1°). При этом области вблизи полюсов мира не наблюдаются. Для наблюдения северного и южного полюсов мира необходимо отклонить ось телескопа на $38,4^\circ$ от плоскости орбиты к северу или к югу соответственно.

В качестве приемника излучения для фотометрии предполагается использовать сборку 11 матричных ПЗС обратной засветки. Каждая матрица состоит из двух независимо управляемых частей размером 2250×300 пикселей. О возможности создания таких матричных ПЗС специально для космического эксперимента «Ли́ра-Б» заявила фирма «e2v technologies Ltd» (Великобритания). На первую ПЗС наносится широкополосное просветляющее (панхроматическое) покрытие, на остальные — интерференционные светофильтры, реализующие фотометрическую систему «Ли́ра-Б». Регистрация получаемой информации будет осуществляться в дрейфовом режиме (режим с временной задержкой и накоплением, сокращенно: ВЗН или TDI).

В эксперименте «Ли́ра-Б» не используется входной каталог для фотометрии точечных объектов. Существует только входной каталог протяженных объектов, для которых выполняется поверхностная фотометрия, и каталог ярчайших звезд, вызывающих переполнение пикселей ПЗС.

Изображение, которое строит первая матрица с панхроматическим покрытием, обладающая наибольшей чувствительностью, считывается полностью. В получаемом изображении производится поиск объектов, которые значимо (отношение сигнала к шуму >10) превышают уровень шумов. Для найденных объектов приближенно определяются координаты, блеск и другие параметры. На их основе предвычисляются места и моменты появления каждого найденного объекта на остальных фотометрических матрицах фокальной плоскости, с которых производится полное считывание только предвычисленных фрагментов размером 5×5 или 7×7 пикселей.

Со временем чувствительность ПЗС, а также кривые пропускания нанесенных на них фильтров будут изменяться. Основными причинами таких изменений будет воздействие микроатмосферы МКС и энергичных частиц. При наземной подготовке спектральная квантовая эффективность всех ПЗС с надлежащими светофильтрами будет тщательно измерена, а абсолютная спектральная чувствительность ПЗС будет определена сравнением с излучением модели абсолютно черного тела. Для определения характеристик фотометрических приборов в полете предполагается регулярное проведение калибровок:

- калибровка по излучению Солнца, при проведении которой фотоприемное устройство освещается рассеянным солнечным светом;
- калибровка по внутренним источникам излучения; внутри телескопа предполагается установить несколько источников излучения: ультрафиолетовые и широкополосные («белые») светодиоды;
- калибровка путем сравнения с наземными наблюдениями звезд с использованием приемников излучения, аналогичных установленным на борту МКС и предварительно прокалиброванных в лабораторных условиях.

Выбор МКС в качестве места проведения эксперимента «Ли́ра-Б» имеет свои достоинства и недостатки. К достоинствам проведения эксперимента на МКС относятся наличие источников энергии, информационных каналов, возможности получения информации об ориентации станции и пр., отработанная технология доставки на борт приборов малого и среднего веса, возможность возвращения на Землю небольших грузов, монтаж аппаратуры силами экипажа станции и возможность проведения ремонта аппаратуры силами экипажа. Однако основной причиной выбора МКС в качестве места проведения эксперимента «Ли́ра-Б» является большой объем научных данных, который требуется передать на Землю. В ходе сеансов наблюдений поток данных составляет около 300 Мбит/с. Полный объем данных, который будет получен за время проведения эксперимента и который должен быть передан на Землю, составляет около 200 Тбайт. МКС не обладает каналом связи, позволяющим передать получаемый поток информации, поэтому данные с телескопа будут записываться на сменные внешние носители, которые затем будут доставляться на Землю в составе спускаемого груза (2–3 раза в год). Указанный способ позволяет передать весь объем научной информации, получаемой в эксперименте.

Помимо перечисленных выше достоинств, размещение научной аппаратуры на МКС имеет и ряд недостатков. Наиболее серьезным недостатком для наблюдений в видимом диапазоне с использованием телескопов с разрешением лучше угловой секунды являются вибрации пилотируемой станции, которые вызываются деятельностью экипажа и работой систем поддержания жизнедеятельности. Для преодоления этой проблемы разработана специальная система стабилизации изображения, встроенная в телескоп. Компенсация сдвигов и вращений будет проводиться путем перемещения приборов фокальной плоскости с помощью

высокоточного пьезомеханического гексапода — платформы Гью—Стюарта.

Для разработки плана покрытия небесной сферы было проведено моделирование. Считалось, что наблюдения возможны, когда МКС находится в тени Земли, а вне тени — если угол между осью визирования и краем диска Солнца превышает 90° . В типичном плане наблюдения велись 193,4 суток (53% полного времени), среднее число наблюдений отдельного объекта за год равно 22, а объектов вблизи полюсов мира — до 1000. Исходя из этого, среднее число наблюдений отдельного объекта при пятилетней длительности эксперимента составит примерно 100.

В результате анализа выработанных принципов был сделан вывод о реализуемости проекта.

Результаты измерений, которые предполагается получить в ходе проведения фотометрического обзора, должны будут послужить основой для получения разнообразных научных данных, таких как создание высокоточного фотометрического каталога звезд, фотометрическое исследование поверхностей малых тел Солнечной системы, изучение статистических закономерностей строения Галактики и распределения межзвездной материи, определение для миллионов звезд их физических характеристик, проведение многоцветной поверхностной фотометрии протяженных объектов, открытие и изучение переменных звезд и многое другое. [29]

Объединение астрометрической части каталога GAIA с фотометрическим каталогом «Ли́ра-Б» позволит получить суперкаталог с принципиально новыми характеристиками.

Шестая глава посвящена описанию многоцветной фотометрической системы «Ли́ра-Б» [30, 31]. Было принято, что система должна быть широкополосной, чтобы обеспечить высокую проникающую способ-

ность, что должна сохраниться преемственность с системой *WBVR*, в которой был выполнен Тянь-Шаньский каталог, и что в числе полос обязательно должны быть полосы, расположенные в ультрафиолетовой части спектра. Поэтому четыре полосы в видимой и самой ближней ультрафиолетовой областях с центральными длинами волн 350, 440, 550 и 700 нм аналогичны полосам в системе *WBVR*. Три ультрафиолетовых фильтра с центральными длинами волн 195, 218 и 270 нм позволяют изучать горячие звезды и эффективно определять межзвездное поглощение, так как фильтр 218 нм лежит в центре мощной ультрафиолетовой полосы межзвездного поглощения, а два других фильтра — по обе стороны от нее. Три фильтра с центральными длинами волн 825, 930 и 1000 нм лежат в ближней инфракрасной области. Одиннадцатая полоса является панхроматической. Центр фильтра 825 нм (так же, как и фильтра 700 нм) находится на локальном максимуме в спектрах звезд спектрального класса *M*. Фильтр 930 нм соответствует атмосферной полосе воды и, в частности, служит для определения параметров атмосферы при последующих наземных наблюдениях звезд каталога. Фильтр 1000 нм охватывает наиболее длинноволновую область чувствительности кремниевых ПЗС. Кроме космического экземпляра фокальной плоскости в ходе наземной отработки изделия будет создано фотоприемное устройство для наземных наблюдений. В этом устройстве бессмысленно иметь ультрафиолетовые полосы с длинами волн короче 320 нм. Поэтому соответствующие ПЗС-матрицы будут созданы со светофильтрами, центрированными на 374 нм (область бальмеровского скачка), на 785 нм (локальный минимум между двумя полосами TiO в спектрах звезд класса *M*), и, возможно, на 656 нм (линия водорода $H\alpha$). Возможно, что в ходе изготовления фильтров и проверки их характеристик в положения полос будут внесены небольшие изменения.

Интерференционные фильтры предполагается наносить непосредственно на поверхность матричных ПЗС. Такая технология была разработана в ФИАН им. П.Н. Лебедева и успешно опробована в экспериментах серии спутников “Коронас”. Отметим, что применение такой технологии возможно лишь для матриц с обратной засветкой, обладающих гладкой и однородной передней поверхностью. Обычно интерференционный светофильтр представляет собой стеклянную или кварцевую пластину с нанесенным на нее интерференционным покрытием, установленную перед фотоприемником. Отражение света от обеих поверхностей стеклянной пластины и от передней поверхности матричного ПЗС порождает многочисленные блики, особенно от ярких звезд. Вышеописанная технология нанесения фильтров позволяет этого избежать. С помощью специалистов ФИАН проведен предварительный расчет этих покрытий, который показал возможность создания светофильтров с высоким пропусканием в рабочих областях и очень малым пропусканием вне этих областей. Характеристики светофильтров и фотометрических полос приведены в таблице 1.

По кривым реакции фотометрических полос были вычислены показатели цвета для нескольких двухцветных диаграмм, используя атласы распределений энергии в спектрах звезд и метод синтетической фотометрии. В качестве исходных данных использовался атлас эмпирических средних распределений энергии, составленный А. Пиклсом [32], и нормальный закон межзвездного поглощения [33].

На традиционных диаграммах ($U - B$, $B - V$) или ($W - B$, $B - V$) покраснение может быть определено только для спектральных подклассов от O до $V3$, где линия нарастающего покраснения не имеет множественных пересечений с последовательностями для разных классов светимости. Если же построить двухцветную диаграмму из ультрафиолетовых величин фотометрической системы «Лира-Б» m_{195} , m_{218} и m_{270} , которым

соответствуют показатели цвета ($m_{195} - m_{218}$) и ($m_{218} - m_{270}$), то, используя эти показатели цвета, можно получить надежные значения поглощения для звезд спектральных классов O – F. На этой диаграмме вообще не может быть пересечения между последовательностями звезд и линиями нарастающего поглощения. Замечательно то, что при возрастании поглощения один из показателей цвета ($m_{218} - m_{270}$) увеличивается («краснеет»), а другой ($m_{195} - m_{218}$) — уменьшается («голубеет»). Возможно также определять межзвездное поглощение по звездам O–A7 на двухцветной диаграмме ($m_{218} - m_{270}$, $m_{270} - m_{350}$), по гигантам и карликам G – K на диаграмме ($m_{350} - m_{700}$, $m_{700} - m_{930}$) и по поздним гигантам на диаграмме ($m_{440} - m_{700}$, $m_{700} - m_{930}$).

Таблица 1. Характеристики полос пропускания фотометрической системы эксперимента “Ли́ра-Б” (в первой колонке — центральные длины волн, во второй — ширины фотометрических полос на уровне половинного пропускания, в третьей — пропускание светофильтра в максимуме, в последней — суммарная чувствительность фотоприемника в максимуме)

№ полосы	λ_0 , нм	$\Delta\lambda$, нм	фильтр, %	фильтр + QE, %
1	195	20	73	32
2	218	20	84	49
3	270	25	82	52
4	350	50	59	38
4а	374	50	59	38
5	440	100	73	50
6	550	80	55	37
7	700	80	53	35
7а	785	80	74	41
8	825	80	74	41
9	930	80	72	25
10	1000	100	76	16
-	Панхром	~600	92	66

Максимум пропускания панхроматического фильтра расположен на $\lambda=495$ нм, а максимум чувствительности панхроматического фотоприемника – на $\lambda=415$ нм.

Фотометрическая система «Ли́ра-Б» позволяет для звезд многих спектральных типов проводить классификацию по классам светимости. Например, голубые сверхгиганты уверенно отделяются от звезд главной последовательности на диаграмме ($m_{440} - m_{700}$, $m_{350} - m_{550}$), а сверхгиганты спектральных классов G, K и M — на диаграмме ($m_{440} - m_{700}$, $m_{700} - m_{930}$).

На двухцветной диаграмме ($m_{270} - m_{350}$, $m_{700} - m_{930}$) звезды спектральных классов F-G-K-M разделяются по металличности. (Здесь исходными данными послужили теоретические распределения энергии в спектрах атласа BaSEL [34].

Исследования классификационных возможностей фотометрической системы «Ли́ра-Б» продолжаются.

Исходя из времени накопления сигнала при прохождении через одну матрицу (1,04 с) и параметров телескопа и фильтров и из оценок шумов матричных ПЗС, были выведены ожидаемые предельные величины для всех полос фотометрической системы для случая измерений с отношениями «сигнал/шум» 10 и 100. Результаты показаны в таблицах 2, 3 и 4.

Таблица 2. Предельные звездные величины V в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б» для звезд спектральных классов OB, A, F, G, K и M. Одно наблюдение с отношением сигнала к шуму $S/N=100$; $\sigma = 0^m,01$.

Sp	λ_0 , нм												
	195	218	270	350	374	440	550	700	785	825	930	1000	панхром
OB	10,6	10,9	11,4	11,7	11,5	12,8	11,5	10,9	10,7	10,5	9,8	9,2	14,3
A	8,5	9,0	9,4	10,6	10,7	12,6	11,6	11,1	11,0	10,8	10,3	9,7	14,0
F	6,1	7,3	8,4	10,3	10,4	12,5	11,8	11,5	11,5	11,3	10,8	10,2	14,1
G	1,6	4,3	7,2	9,8	9,8	12,3	11,9	11,9	12,0	11,8	11,3	10,8	14,2
K	-0,6	-0,0	5,0	8,9	9,0	12,1	12,1	12,4	12,6	12,5	12,0	11,5	14,5
M	1,6	1,8	3,5	9,2	9,5	12,5	12,7	13,7	14,6	14,7	14,7	14,3	16,2

Таблица 3. Предельные звездные величины V в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б» для звезд спектральных классов OB, A, F, G, K и M. Одно наблюдение с отношением сигнала к шуму $S/N=10$; $\sigma = 0^m,1$.

Sp	λ_0 , нм												
	195	218	270	350	374	440	550	700	785	825	930	1000	панхром
OB	15,3	15,6	16,0	16,4	16,2	17,4	16,2	15,5	15,3	15,1	14,4	13,8	18,8
A	13,2	13,6	14,1	15,3	15,4	17,3	16,3	15,8	15,7	15,5	14,9	14,3	18,5
F	10,8	12,0	13,1	15,0	15,1	17,1	16,4	16,2	16,1	16,0	15,4	14,9	18,6
G	6,3	9,0	11,8	14,5	14,5	16,9	16,6	16,6	16,6	16,5	16,0	15,4	18,7
K	4,1	4,6	9,7	13,6	13,7	16,8	16,8	17,1	17,2	17,1	16,7	16,2	19,1
M	6,3	6,5	8,2	13,9	14,2	17,2	17,4	18,4	19,3	19,4	19,4	19,0	20,7

Таблица 4. Предельные звездные величины V в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б» для звезд спектральных классов OB, A, F, G, K и M. 100 наблюдений с отношением сигнала к шуму $S/N=10$; $\sigma = 0^m,1$.

Sp	λ_0 , нм												
	195	218	270	350	374	440	550	700	785	825	930	1000	панхром
OB	18,5	18,8	19,2	19,5	19,3	20,6	19,3	18,6	18,3	18,2	17,4	16,9	21,6
A	16,3	16,8	17,3	18,4	18,6	20,4	19,5	18,9	18,7	18,5	18,0	17,4	21,4
F	13,9	15,1	16,2	18,2	18,3	20,3	19,6	19,2	19,2	19,1	18,4	17,9	21,5
G	9,4	12,2	15,0	17,6	17,6	20,1	19,7	19,6	19,6	19,5	19,0	18,4	21,5
K	7,3	7,8	12,9	16,7	16,8	19,9	20,0	20,1	20,3	20,2	19,8	19,2	22,0
M	9,4	9,7	11,4	17,1	17,3	20,3	20,5	21,5	22,4	22,5	22,5	22,1	23,7

В таблице 5 показаны звездные величины, вызывающие переполнение пикселей.

Таблица 5. Наиболее слабые звездные величины V в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б», вызывающие переполнение пикселей для звезд спектральных классов OB, A, F, G, K и M.

Sp	λ_0 , нм												
	195	218	270	350	374	440	550	700	785	825	930	1000	панхром
OB	5,7	6,2	7,3	7,5	7,8	8,6	7,3	5,7	7,0	6,8	6,3	5,8	10,6
A	3,6	4,2	5,4	6,4	7,1	8,5	7,4	6,0	7,4	7,2	6,8	6,3	10,4
F	1,1	2,5	4,3	6,2	6,8	8,3	7,5	6,3	7,8	7,7	7,3	6,8	10,5
G	-3,4	-0,4	3,1	5,6	6,2	8,1	7,7	6,8	8,3	8,2	7,8	7,4	10,7
K	-5,5	-4,8	1,0	4,7	5,3	8,0	7,9	7,2	8,9	8,8	8,6	8,2	11,1
M	-3,4	-2,9	-0,5	5,0	5,8	8,4	8,5	8,6	11,0	11,1	11,2	10,9	12,9

Найденные предельные величины позволили оценить количество звезд, для которых будет проведена фотометрия в разных полосах. Показано, что измерения в полосах “440” и “700” позволят детектировать тысячи звезд на каждом квадратном градусе [31].

В последнем разделе шестой главы обсуждается вопрос о создании высокоточной опорной системы звезд-стандартов на всем небе [6]. Измерения объектов относительно звезд-стандартов позволяют не слишком бдительно следить за стабильностью характеристик измерительной аппаратуры, Стабильность аппаратуры — единственное условие для хороших измерений вне земной атмосферы. При наблюдениях с поверхности Земли возникает дополнительный источник нестабильности. Атмосферная экстинкция изменяет абсолютную чувствительность и спектральные характеристики фотометрических полос. Задача состоит в том, чтобы в итоге наблюдения были приведены к единым характеристикам для данной фотометрической системы.

Система опорных фотометрических стандартов должна обеспечивать:

- вычисление параметров атмосферы Земли для точного учета атмосферной экстинкции;
- вывод уравнений трансформации между различными фотометрическими системами;
- перевод результатов измерений, сделанных в текущей инструментальной фотометрической системе, спектральные параметры которой медленно дрейфуют, в общую (стандартную!) фотометрическую систему.

Звезды, входящие в состав каталога опорных фотометрических стандартов, должны обладать следующими свойствами:

- звезды должны быть представлены в широком диапазоне звездных величин;
- звезды должны быть отобраны из представительной выборки спектральных классов и классов светимости;
- звезды не должны показывать переменность в пределах погрешности аппаратуры;
- звезды не должны иметь в ближайшей окрестности звезд-помех, мешающих измерениям; для слабых звезд-стандартов дополнительно требуется отсутствие мешающего измерениям неоднородного фона (туманностей и пр.);
- звезды должны быть измерены с малой погрешностью (конечно, зависящей от звездной величины, спектрального типа и фотометрической полосы);
- звезды должны обладать такими распределениями энергии в спектре, которые позволяют осуществлять редукцию в фотометрические полосы, отличающиеся от полос, заданных в каталоге.

Наконец, каталог опорных фотометрических стандартов должен быть дополнен:

- таблицами, описывающими набор кривых реакции его собственных фотометрических полос;
- таблицами типичных распределений энергии в спектрах для звезд различных спектральных классов и классов светимости в спектральном диапазоне, соответствующем кривым реакции фотометрических полос каталога; этот набор должен включать звезды различных температур, давлений в фотосфере, обилия химических элементов, межзвездных покраснений и др.;
- описанием процедур и данными для вычисления средних кривых пропускания земной атмосферы при различных условиях; опи-

санием процедур выведения поправок к среднему атмосферному пропусканию, получаемых из наблюдений;

- описанием процедур измерений звезд-стандартов во всех спектральных полосах каталога, видимых с Земли;
- описанием процедур измерений звезд, не входящих в каталог стандартов во всех видимых с Земли фотометрических полосах;
- описанием процедур измерений звезд-стандартов в фотометрических полосах, отличающихся от полос каталога;
- описанием процедур измерений звезд, не входящих в каталог стандартов, в фотометрических полосах, отличающихся от полос каталога.

Одной из важнейших задач космического эксперимента «Ли́ра-Б», подготавливаемого в МГУ совместно с Роскосмосом, является создание системы высокоточных фотометрических стандартов. Эксперимент «Ли́ра-Б» должен создать именно такой каталог звезд-стандартов, дополненный набором необходимых данных и описанием процедур обработки. Если имеется каталог, обладающий вышеперечисленными свойствами, то наблюдатель легко может создать каталог стандартов в своей фотометрической системе без дополнительных наблюдений. Для этого нужно иметь набор распределений энергий в спектре (РЭС) для звезд, подобных тем, которые содержатся в каталоге звезд-стандартов, задать (принять) закон межзвездного покраснения и хорошо знать кривые реакции каталога «Ли́ра» и кривые реакции собственного оборудования. При этом становится возможным вычислить набор РЭС для различных значений межзвездного покраснения, затем вычислить синтетические показатели цвета в системе «Ли́ра-Б» и в системе пользователя, и, наконец, вывести уравнение трансформации звездных величин из системы «Ли́ра-Б» в собственную систему наблюдателя.

В заключении обсуждается проблема построения в будущем фундаментальной фотометрической системы, которая должна быть создана на основе сравнения каталогов звезд-стандартов, полученных на разных обсерваториях, и приводятся основные выводы диссертации.

В Приложении «А» даются оценки некоторых систематических ошибок фотометрии и спектрофотометрии. В Приложении «Б» уточняются некоторые термины и приводятся важнейшие формулы. В Приложении «В» приводятся уравнения трансформации звездных величин между некоторыми фотометрическими системами. В Приложении «Г» даны Таблицы, в которых приведены кривые реакции системы WBVR, величины стандартов системы WBVR, использовавшиеся в 1976–1989 годах, величины звезд скопления Гиады, каталог объектов SETI. В Приложении «Д» описан алгоритм расчета спектральной функции пропускания атмосферы Земли. В Приложении «Е» выполнен расчет предельных величин звезд различных спектральных типов, которые ожидается получить в ходе эксперимента «Лира-Б». В Приложении «Ж» сделана оценка количества звезд в будущем каталоге «Лира-Б».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в настоящем исследовании, подтверждают, что методы современной астрофотометрии позволяют проводить измерения с точностью порядка одной тысячной звездной величины, как в случайном, так и в систематическом смысле. Но для этого фотометрическая система должна быть построена с соблюдением ряда важных принципов, основанных на соблюдении требований метрологии и изложенных в тексте диссертации. Основной идеей являлось то, что в современное понятие фотометрической системы входят не только определе-

ния нуль-пункта величин и кривых реакции фотометрических полос, но и методы исследования аппаратуры, проведения и обработки наблюдений. Соблюдение этих принципов позволило создать фотометрическую систему *WBVR*, и выполнить высокоточный каталог *WBVR*-величин ярких звезд северного неба.

Появление высокоточных фотометрических каталогов, построенных в различных фотометрических системах, потребовало создания метода сравнения этих данных с целью выявления взаимных систематических различий. В диссертации показано, что таким методом может быть последовательное построение трансформационных полиномов от показателей цвета, от звездных величин и от положения объекта на небесной сфере. Разработанный метод был применен для сравнения данных Каталога *WBVR*-величин с величинами, полученными в ходе космических экспериментов *Hipparcos* и *Tycho*. В результате сравнения было доказано, что точность измерения блеска непременных звезд в Каталоге *Hipparcos* и в *WBVR*-каталоге примерно одинакова и характеризуется среднеквадратичной ошибкой порядка $0^m,002$; впервые были найдены систематические ошибки фотометрических каталогов, зависящие от небесных координат объектов.

Отбор звезд, показывающих наилучшее согласие по измерениям их блеска в Каталоге *Hipparcos* и в Тянь-Шаньском каталоге *WBVR*-величин, позволил создать каталог фотометрических стандартов на северном небе, в который вошло 6484 звезды.

Поставленная задача создания обширного фотометрического многоцветного обзора всего неба привела к осознанию необходимости проведения космического эксперимента по наблюдениям звезд до 16-й звездной величины в десяти спектральных полосах. Для этого были разработаны принципы проведения фотометрического обзора неба с борта

Международной космической станции (космический эксперимент «Ли-ра-Б»).

Объединение астрометрической части каталога GAIA с фотометрическим каталогом «Ли-ра-Б» позволит получить суперкаталог с принципиально новыми характеристиками.

В ходе исследования предложено расположение десяти полос фотометрической системы «Ли-ра-Б» в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях. Показано, что такое расположение полос позволяет эффективно определять межзвездное поглощение, и для звезд многих спектральных типов проводить классификацию по спектральным классам и классам светимости. В ряде случаев фотометрическая система «Ли-ра-Б» позволяет оценивать обилие металлов в звездных атмосферах.

Задачей современных наблюдателей-астрофотометристов является строгое соблюдение условий, обеспечивающих возможность прецизионной фотометрии. Значительные усилия должны быть направлены на создание нового современного каталога распределений энергии в спектрах большого количества звезд разных спектральных типов и звезд, предназначенных быть универсальными стандартами.

Современные успехи астрофотометрии в России основаны на прочном методическом и идейном фундаменте, заложенном выдающимися российскими астрономами: В.К. Цераским, Г.А. Тиховым, В.Б. Никоновым, Д.Я. Мартыновым и другими.

Перед современной астрофотометрией стоит важная задача: создать фундаментальный опорный каталог фотометрических стандартов, способных быть пригодными для любой фотометрической системы.

Работа по сравнению данных каталога Hipparcos и Тянь-Шаньского каталога (глава 3) была поддержана грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-16282).

Работа по открытию переменных звезд (глава 4) была поддержана грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-16069).

Эскизный проект «Создание комплекса научной аппаратуры многоцветного фотометрического обзора неба», шифр «Лира-Б», выполнялся в рамках ОКР «МКС-Эксперимент», проводимой ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева» по Госконтракту от 05.06.2007 г. № 351-8623/07 с Федеральным космическим агентством.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Большинство работ, в которых изложено основное содержание диссертации, написаны в соавторстве. Общий вклад в совместных статьях мы считаем равным, однако естественно, что конкретные виды работ (постановка задачи, наблюдения, обработка результатов измерений, анализ результатов и их интерпретация и др.), как правило, выполняются не в равной степени. В список положений, вынесенных на защиту, включены лишь те результаты и выводы, в которых вклад автора диссертации в проведенные исследования был основополагающим или, по крайней мере, равным вкладу других соавторов.

Список работ, в которых опубликовано основное содержание диссертации, состоит из 44 наименований, в их числе 6 статей в российских ведущих рецензируемых научных журналах, включённых ВАК России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных

результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, 16 статей, опубликованных в журналах, представленных в международной базе данных “Astrophysics” (adsabs.harvard.edu), монография «Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба» под ред. В.Г. Корнилова, опубликованная в Трудах ГАИШ МГУ, учебное пособие «Прецизионная фотометрия» и научно-учебная монография «Основы астрофотометрии» (Физматлит, 2008).

Статьи, опубликованные в российских ведущих рецензируемых научных журналах, включённых ВАК России в список изданий, рекомендуемых для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук

1. Кусакин А.В., Миронов А.В., Мошкалев В.Г. Исследование переменности звезд группы первичного стандарта фотометрической системы WBVR. // Письма в Астрономический журнал. 1991. Т.17. №3. С. 261–267.

2. Миронов А.В., Мошкалев В.Г. Анализ спектрофотометрических и фотометрических данных для звезд — первичных спектрофотометрических стандартов. // Астрономический журнал. 1995. Т.72. Вып.1. С. 80–88.

3. Миронов А.В., Мошкалев В.Г. Анализ и коррекция распределений энергии в спектрах 238 вторичных спектрофотометрических стандартов. // Астрономический журнал. 1996. Т.73. Вып. 5. С.772–782.

4. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В. Показатели цвета Солнца и звезд Гиад. // Астрономический журнал. 1998. Т.75. №6. С.903–912.

5. Захаров А.И., Колесниченко Г.Н., Миронов А.В., Николаев Ф.Н. Расчет величин опорных звезд в системе типового широкополосного приемника на основе данных астрономических каталогов, содержащих фотометрическую информацию. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Т. 6, № 6. 2008. С.24–29.

6. Захаров А.И., Миронов А.В., Прохоров М.Е., Бирюков А.В., Стекольников О.Ю., Тучин М.С.. Космический эксперимент «Лири-Б»: цели и принципы реализации. // *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90. №3. С.223–241.

Статьи, опубликованные в журналах, представленных в международной базе данных Astrophysics (adsabs.harvard.edu)

1. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф., Черепашук А.М. Атмосферная прозрачность в полосах WBVR в районе Высокогорной экспедиции ГАИШ. // *Астрономический циркуляр*. №1003, 1978. С.6–7.

2. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф. Система высокоточных фотоэлектрических стандартов в полосах WBVR. // *Астрономический циркуляр*. №1351, 1984, С.1–4.

3. Khaliullin Kh., Mironov A.V., Moshkalyov V.G. The New Photometric WBVR System. // *Astrophys. and Space Sci.* 1985. V.111. No.2. P.291–323.

4. Cherepashchuk A., Khaliullin Kh., Kornilov V., Mironov A. Sternberg WBVR photometric survey of bright stars. // *Astrophys. and Space Sci.* 1994. V.217. No.1–2. P.83–85.

5. Kornilov V.G., Mironov A.V., Zakharov A.I. The WBVR catalogue of bright stars. // *Baltic Astronomy*. 1996. V.5, No.1–2. P.379–390.

6. Mironov A.V., Kharitonov A.V. Selection of Solar Analogs on the basis of various color indices. // *Proceedings of "Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates"* Held 5–7 Oct. 1997 at Lowell Observatory. 1998. P.149–152.

7. Mironov A., Zakharov A. Systematic Errors of High-Precision Photometric Catalogues. // *Astrophys. and Space Sci.* 2002. V.280. Issue 1/2. P.71–76.

8. Mironov A.V., Zakharov A.I., Nikolaev F.N. On the New Technique for Discovering Variable Stars. // *Baltic Astronomy*. 2003. V.12. P.589–594.

9. Ambartsoumian A.R., Mironov A.V., Zakharov A.I. Ultraviolet Passbands for a Space Multicolor Photometric System. // *Baltic Astronomy*. 2003. V.12. P.629–630.

10. Mironov A., Zakharov A., Ambartsumyan A. Improved Photometric Accuracy and the Creation of an All-sky High-Accuracy Stellar Standard System. / The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization. Proceedings of a meeting held in Blankenberge, Belgium 8–11 May 2006. // ASP Conference Series. 2007. V.364. P.81–83.

11. Mironov, Alexey V.; Zakharov, Andrey I.; Prokhorov, Mikhail E.; Nikolaev, Fedor N.; Tuchin, Maxim S. The Multicolor LYRA Photometric System for Variable Stars and Halo Studies. / Variable Stars, the Galactic halo and Galaxy Formation, Proceedings of an international conference held in Zvenigorod, Russia, 12–16 October 2009. Eds. C.Sterken, N.Samus, L.Szabados. // Published by Sternberg Astronomical Institute of Moscow University. Russia. 2010. P.185–191.

12. Malkov, Oleg; Mironov, Aleksej; Sichevskij, Sergej. Single-binary star separation by ultraviolet color index diagrams. // Astrophysics and Space Science. 2011. V. 335. No. 1. P.105–111.

13. Karpov, S. V.; Malkov, O. Yu.; Mironov, A. V. Cross-identification of large surveys for finding interstellar extinction. // Astrophysical Bulletin. 2012. V.67. Issue 1. P.82–89.

14. Zakharov, A.I., Mironov,A.V., Nikolaev,F.N., Tuchin,M.S. The LYRA Photometric System and the Catalog of Photometric Reference Standard Stars. // Astron. Nachr. 2013. V.334. P.822–826.

15. Zakharov, A.I.,Mironov,A.V., Prokhorov, Nikolaev,F.N., Tuchin, M.S., Biryukov, A.V. Expected Characteristics of Data from the LYRA mission. // Astron.Nachr. 2013. V.334. P.827–830.

16. Sichevskiy, S.G., Mironov,A.V., Malkov,O.Yu. Classification of stars with WBVR photometry. // Astron.Nachr. 2013. V.334. P.832–834.

17. Krusanova N.L., Mironov A.V., Zakharov A.I. WBVR standards in the northern sky. Analysis of variability by MZ-technique. // Peremennye Zvezdy (Variable Stars). 2013, 33. 8.

Опубликованные монографии и учебные пособия

1. Корнилов В.Г., Волков И.М., Захаров А.И., Козырева В.С., Корнилова Л.Н., Крутяков А.Н., Крылов А.В., Кусакин А.В., Леонтьев С.Е., Миронов А.В., Мошкалева В.Г. Погрошева Т.М., Семенцов В.Н., Халиуллин Х.Ф. Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба. / Под

ред. В.Г. Корнилова. // Труды ГАИШ. Т.63. М.: Изд-во Московского университета. 1991.— 400 с.

2. Миронов А.В. Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. Учебное пособие. // М.: Изд-во ТОО “ЭДЭМ”. 1997.— 157 с.

3. Миронов А.В. Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 260 с.

Другие публикации по теме диссертации

1. Корнилов В.Г., Крутяков А.Н., Миронов А.В. Автоматизированный фотометрический комплекс Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции ГАИШ. / Современные технологии в автоматизированных системах научных исследований, обучения и управления. Под ред. В.А.Садовниченко. // М.: Изд. Московского университета, 1990. С.125–128.

2. Миронов А.В., Мошкалева В.Г., Харитонов А.В., Колыхалова О.М. Об аппаратных систематических ошибках фотоэлектрической фотометрии. // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия физико-математическая. 1995. №4, ч. I. С.54–64.

3. Миронов А.В., Крылова М.И. Расчет спектрального пропускания земной атмосферы для произвольного астрономического пункта умеренных широт. //Труды IV съезда Астрономического Общества. // Москва: СП. 1998. С.153–156.

4. Миронов А.В., Харитонов А.В. Наблюдательное определение показателей цвета Солнца. // Известия Академии Наук. Серия физическая. 1998. Т.62. №.6. С.1198–1200.

5. Миронов А.В. Методика и результаты современной высокоточной фотометрии звезд. // Физика Космоса. Обзорные лекции по астрономии: 27-я международная студенческая научная конференция; под ред. С.А.Гуляева, Екатеринбург, 2–6 февраля. 1998 г. С.44–57.

6. Захаров А.И., Миронов А.В., Крутяков А.Н. О переменных звездах, открытых по данным космического эксперимента HIPPARCOS. // "Переменные звезды — ключ к пониманию строения и эволюции Галактики". Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б.В.Кукаркина. 25–29 октября 1999 г. Москва.

ГАИШ МГУ. Сб. трудов; под ред. Н.Н.Самуся и А.В.Миронова. Нижний Архыз: Компьютерный инф.-изд. центр "CYGNUS". 2000. С.72–77.

7. Krutyakov A.N., Mironov A.V., Zakharov A.I. HIPPARCOS and other Catalogues: the Photometric Accuracy. // JENAM-2000. Труды присоединенного симпозиума «Спектрофотометрические и фотометрические стандарты и каталоги. Звезды-стандарты и аналоги Солнца». Под ред. А.А.Архарова и А.В.Миронова. Пулково, 5–8 июня 2000 г. СПб. Изд-во СПбГУ. 2000. С.12–15.

8. Миронов А.В., Харитонов А.В. Выбор аналогов Солнца на основе различных индексов цвета. М., Труды ГАИШ. Т.71. 2001. С. 94–101.

9. Миронов А.В. Будущие космические эксперименты и перспективы развития звездной астрономии. // "Физика Космоса": Труды 33 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 2–6 февраля 2004 г. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2004. С.107-118.

10. Захаров А.В., Миронов А.В., Крутяков А.Н. О систематических ошибках высокоточных фотометрических каталогов. Труды ГАИШ. Т.70. – М.: Изд. «Янус-К», 2004. С.289–303.

11. Миронов А.В., Гиндилис Л.М., Захаров А.И., Кардашев Н.С., Кацова М.М., Куимов К.В., Расторгуев А.С., Рудницкий Г.М., Тимофеев М.Ю., Сурдин В.Г., Черепашук А.М., Филиппова Л.Н. 100 звезд и ВЦ: где Они? // Бюллетень САО РАН. Т.60–61. 2006. С.62–78.

12. Миронов А.В., Захаров А.И. В.Б. Никонов и современные проблемы астрофотометрии. // Известия КрАО 2007. Т.103, № 3. С.218–224.

13. Миронов А.В., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Проблемы современной астрофотометрии. // "Физика Космоса": Труды 37 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 28 янв. –1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2008. С.105–117.

14. Прохоров М.Е., Миронов А.В., Захаров А.И. Российский космический фотометрический эксперимент «Лири-Б». // "Физика Космоса": Труды 37 международной студенческой научной конференции, Ека-

теринбург, 28 янв.–1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2008. С.141–163.

15. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В. Космический астро- и фотометрический эксперимент «Свеча». // Труды ИПА РАН. Вып. 20. СПб.: Наука. 2009. С.336–340.

16. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В. Космический многоцветный фотометрический обзор всего неба «Лира». // Труды ИПА РАН. Вып. 20. СПб.: Наука. 2009. С.453–456.

17. Миронов А.В., Захаров А.И., Прохоров М.Е. Многоцветные фотометрические системы: прошлое и настоящее. // "Физика Космоса": Труды 39 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 1–5 февр. 2010 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. 2010. С.85–107.

18. Kilpio, E. Yu.; Malkov, O. Yu.; Mironov, A. V. Comparative analysis of modern empirical spectrophotometric atlases with multicolor photometric catalogues. / International Workshop on Stellar Libraries, Proceedings of a conference held 5-9 December, 2011 at University of Dehli, India. Edited by P. Prugniel and H. P. Singh. // Astronomical Society of India Conference Series. V.6. 2012. P.31–38.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ESA: The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200.

Vol.1–17. 1997.

2. ESA: GAIA: Composition, Formation and Evolution of the Galaxy, Technical Report, ESA-SCI. 2000. 4.

3. Cutri R.M., Skrutskie M.F., Van Dyk S. et al. 2004. //

The 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources. CDS II/246.

4. Skrutskie, M. F., Cutri, R.M., Stiening R., et al.), 2006. //

Astron.J. V.**131**. P.1163.

5. Adelman-McCarthy, J. K., Agueros, M.A., Allam, et al. //

- Astroph.J. Suppl. Ser. V.172, P.634.
6. Mironov A., Zakharov A., Ambartsumyan A., / International conference «The Future of Photometric, Spectrophotometric and Polarimetric Standardization». Proceedings of a meeting held in Blankenberge, Belgium 8–11 May 2006. // ASP Conference Series, 2007. V.36. P.81–83.
 7. Martin, D. C., Fanson, J., Schiminovich D., et al.), // Astrophys. J. (Letters). 2005. V.619. L1.
 8. Wamsteker, W. // ASP Conf. Ser. 1999. V.164. P.261.
 9. Epchtein, N., de Batz, B., Copet, E. et al., // Astrophys. and Space Sci. 1994. V.217. P.3.
 10. Wright, J.T., Marcy, G.W., Butler, R.P., Vogt, S.S. // Astroph.J.Suppl.Ser. 2004. V.152. P.261.
 11. Johnson H.L., Morgan W.W. // Astroph.J., 1951. V.114. P.522
 12. Johnson H.L., Morgan W.W. // Astroph.J., 1953. V.117. P.313
 13. Ажусенис А., Страйжис В., 1966. // Бюллетень Вильнюсской обсерватории. № 16. С.3.
 14. Страйжис В. Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы. // Вильнюс. Изд-во «МОКСЛАС». 1977.
 15. Корнилов В.Г., Волков И.М., Захаров А.И., Козырева В.С., Корнилова Л.Н., Крутяков А.Н., Крылов А.В., Кусакин А.В., Леонтьев С.Е., Миронов А.В., Мошкалев В.Г. Погрошева Т.М., Семенцов В.Н., Халиуллин Х.Ф. 1991. / Под ред. В.Г. Корнилова.// Труды ГАИШ, 63. М.: Изд-во Московского ун-та, 1991. 400 стр. (Тянь-Шаньский фотометрический каталог).
 16. Khaliullin Kh., Mironov A.V., Moshkalyov V.G. // Astrophys. and Space Sci. 1985. V.111. No.2. P.291–323.
 17. Миронов А.В. 2008. Основы астрофотометрии. Практические Основы фотометрии и астрофотометрии звезд. //

- М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 — 260 с.
18. Krusanova N.L., Mironov A.V., Zakharov A.I. // *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)*. 2013. V.**33**. 8.
 19. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В. // *Астрон. ж.* 1998. Т.**75**. С.903–912.
 20. Миронов А.В., Харитонов А.В. М. Труды ГАИШ. 2001. Т.**71**. С.94–101.
 21. Миронов А.В., Кардашев Н.С., Гиндилис Л.М. и др. 2006. // *Бюллетень САО РАН*. Т.**60-61**. С.62–78.
 22. Захаров А.И., Колесниченко Г.Н., Миронов А.В., Николаев Ф.Н. // *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2008. Т.**6**. № 6, С.24–29.
 23. Захаров А.И., Миронов А.В., Прохоров М.Е., Бирюков А.В., О.Ю.Стекольников, М.С.Тучин. 2013. // *Астрон. Ж.* Т.**90**. №3. С.223–241.
 24. Zakharov, A.I., Mironov, A.V., Nikolaev, F.N., Prokhorov, M.E., Tuchin, M.S.) // *Astron. Nachr.* 2013. V.**334**. P.822–826.
 25. Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф. // *Астрон. ж.* 1985. Т. **62**. С.393
 26. Mironov A.V., Zakharov A.I., Nikolaev F.N. // *Baltic Astronomy*. 2003. V.**12**. P.589–594.
 27. Johnson H.L., Mitchell R.I. // *Astroph. J.* 1968. V.**153**. P.313.
 28. Cousins A.W.J. // *South Africa Astron. Observ. Circ.*, 1, 1980. P.166–168 and P.234-256.
 29. Zakharov, A.I. ,Mironov, A.V., Prokhorov, M.E., Nikolaev,F.N., Tuchin,M.S., Biryukov,A.V. // *Astron.Nachr.* 2013. V.**334**. P.827–830.
 30. Mironov, A.V., Zakharov, A.I., Prokhorov, M.E., Nikolaev, F.N., Tuchin, M.S. / “Variable Stars, the Galactic halo and Galaxy Formation”, Proceedings of an international conference held in Zvenigorod, Russia, 12–16 October 2009. Eds. C.Sterken, N.Samus,

- L.Szabados. // Published by Sternberg Astronomical Institute of Moscow University, Russia. 2010. P.185–191.
31. Zakharov, A.I., Mironov, A.V., Nikolaev, F.N., Prokhorov, M.E., Tuchin, M.S. // Astron. Nachr. 2013. V.334. P.822–826.
32. Pickles A.J. // Publ. Astron. Soc. Pac. 1998. V.110. P.863.
33. Fluks, M.A., Plez, B., Thé, P.S., et al. // Astron.& Ap.Suppl., 1994. V.105. P.311.
34. Lejeune, Th., Cuisinier, F., Buser, R. // Astron.& Ap.Suppl., 1997. V.125. P.229.

Подписано в печать: 30.01.2014
Объем: 1,7 п.л.
Тираж: 100 экз. Заказ № 41
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 39
(495) 363-78-90; www.reglet.ru