

**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

Диссертация на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2014

СОДЕРЖАНИЕ.

Введение	7
Современные задачи астрофотометрии	7
Общая характеристика работы	9
• Актуальность темы исследования	9
• Степень разработанности темы	10
• Цели и задачи работы	11
• Краткое содержание разделов основной части диссертации	12
• Теоретическая и практическая значимость работы	20
• Методология и методы исследования	21
• Положения, выносимые на защиту	21
• Научная новизна	22
• Научная и практическая значимость диссертации. Апробация	23
• Список работ, в которых опубликовано основное содержание диссертации.	25
• Благодарности	30
 Глава 1. Фотометрическая система <i>WBVR</i>	32
1.1. Потребность создания широкополосной системы <i>WBVR</i>	32
1.2. Принципы, положенные в основу широкополосной системы <i>WBVR</i>	38
1.3. Сеть вторичных стандартов фотометрической системы <i>WBVR</i> . Вариант 1976-1984 гг.	44
1.4. Увязка величин вторичных стандартов.	46
1.5. Исследование постоянства первичного стандарта	

фотометрической системы <i>WBVR</i>	49
1.6. Учет спектрального пропускания атмосферы	
Земли	53
1.7. Каталог <i>WBVR</i> -величин ярких звезд северного	
неба	61
Выводы по Главе 1	70
 Глава 2. Фотометрия Солнца и солнечных аналогов	71
2.1. Показатели цвета Солнца в системе <i>WBVR</i>	71
2.2. Фотометрия звезд Гиад и положение Солнца на	
двухцветных диаграммах	88
2.3. Поиск аналогов Солнца на основе многоцветной	
фотометрии	94
2.3. Выбор объектов SETI.	102
Выводы по Главе 2.	109
 Глава 3. Сравнение звездных величин в высокоточных	
фотометрических каталогах	110
3.1. О точности фотометрии в каталогах <i>Hipparcos</i> ,	
<i>Tycho</i> и <i>WBVR</i>	110
3.2. Перевод величин из одной фотометрической системы	
в другую	112
3.3. Систематические ошибки фотометрии, зависящие от	
небесных координат	118
3.4. Подбор кандидатов в состав системы фотометрических	
стандартов	127
3.5. Предвычисление звездных величин в системе	
типичного фотоприемника на основе приборов с	
зарядовой связью	128

Выводы по Главе 3.	136
Глава 4. Обнаружение переменных звезд при помощи многоцветных фотометрических систем	137
4.1. Методы открытия переменных звезд при многоканальных наблюдениях	137
4.2. Метод <i>MZ</i>	142
4.3. Система <i>WBVR</i> -стандартов на северном небе. Анализ переменности	147
Выводы по Главе 4	163
Глава 5. Астрофотометрический проект «Ли́ра-Б». Цели и принципы реализации	164
5.1. Необходимость космического фотометрического обзора	164
5.2. Цели космического эксперимента «Ли́ра-Б»	167
5.3. Научные задачи космического эксперимента «Ли́ра-Б»	169
5.4. Принципы проведения эксперимента «Ли́ра-Б»	179
5.5. Причины проведения эксперимента на МКС и вызываемые этим проблемы	190
5.6. Ожидаемый объем и временная структура данных	193
5.7. Реализация проекта	194
5.8. О названии проекта «Ли́ра-Б»	195
Выводы по Главе 5.	197
Глава 6. Фотометрическая система «Ли́ра-Б» и ожидаемые результаты обзора.	198
6.1. Полосы фотометрической системы «Ли́ра»	198

6.2. Техническая реализация полос фотометрической системы «Лира»	201
6.3. Определение межзвездного поглощения по фотометрии в полосах фотометрической системы «Лира»	203
6.4. Трехмерная спектральная классификация с помощью фотометрической системы «Лира»	208
6.5. Количество звезд разных спектральных классов, наблюдаемое в полосах будущего каталога «Лира» .	211
6.6. Подходы к улучшению фотометрической точности и созданию высокоточной системы звезд-стандартов на всем небе	217
Выводы по Главе 6.	224
Заключение	225
• О фундаментальной фотометрической системе	225
• Основные выводы диссертации.	230
Приложение «А». Оценки некоторых систематических ошибок фотометрии и спектрофотометрии	235
Приложение «Б». О некоторых терминах и формулах ...	245
Приложение «В». Уравнения трансформации величин между некоторыми фотометрическими системами	252
Приложение «Г». Таблицы	257
Таблица Г1. Нормированные кривые реакции системы <i>WBVR</i>	257
Таблица Г2. Величины стандартов системы <i>WBVR</i>	259
Таблица Г3. <i>WBVR</i> -величины звезд Гиад.	271

Таблица Г4. Каталог звезд, отобранных в качестве кандидатов для SETI.	277
Приложение «Д». О программе вычисления спектрального пропускания атмосферы Земли.	280
Приложение «Е». Расчет предельных звездных величин	295
Приложение «Ж». Оценка количества звезд в каталоге «Лиры-Б»	309
Список литературы	325

Введение.

Современные задачи астрофотометрии.

Известно, что успех эксперимента Hipparcos и осуществляемый проект GAIA побуждают к тому, чтобы была достигнута более высокая точность фотометрических и спектрофотометрических измерений.

Многие текущие задачи требуют высокой точности фотометрических измерений.

Как и в древности, звездные величины совместно с координатами служат для целей ориентации и навигации. Только теперь речь идет не об ориентации на поверхности Земли, а об автоматической 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. Чаще всего максимум чувствительности этих датчиков находится в красной или инфракрасной области. А там ярчайшей звездой является уже не белый Сириус, а Бетельгейзе, в число ярчайших входят и другие красные звезды, слабые в визуальной области. Современная астрофотометрия должна уметь по измерениям в одной части спектра предсказывать реакцию прибора на излучение звезд в любой другой полосе пропускания.

Чтобы решить эту проблему нужно справиться с другой важнейшей задачей астрофотометрии. Она заключается в том, чтобы на основе

многоцветной фотометрии звезд восстановить распределение энергии в их спектрах. 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. Сразу подчеркнем, что для успешного решения этой задачи фотометрия должна быть *высоко точной*, 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.

Современная астрофизика не представляется без фотометрических исследований переменных звезд, т.е. без исследования изменений со временем приходящих от звезд потоков излучения. Изучение многочисленных и разнообразных эффектов переменности звезд было и остается крайне необходимым для понимания строения и эволюции звезд и звездных систем. 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 парсеков 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 0,001–0,003 звездной величины, как в случайном, так и в систематическом смысле.

Общая характеристика работы.

Актуальность темы исследования

Перечисленные выше задачи 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 существующих фотометрических обзоров заявлена на уровне $0^m,003$ – $0^m,005$. 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 содержат систематические ошибки примерно в $0^m,01$ – $0^m,02$.

Сегодня многие коллективы исследователей в разных странах планируют осуществить обзоры неба. Несомненно, что, по крайней мере, от 10 до 20 обширных наземных и космических обзоров будут проведены с разными целями. 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 созданная Джонсоном [Джонсон и Морган, 1951, 1953] система *UBV*. Однако, различные исследователи (подробнее см. раздел 1.1 и Приложение А) отмечали ряд существенных недостатков, допущенных при определении этой системы. Типичная случайная среднеквадратичная ошибка звездных величин, измеренных в системе *UBV*, составляла $\pm 0^m,02$. Систематические ошибки у разных авторов были существенно больше. Встающие астрономические задачи требовали существенного повышения точности фотометрии и проведения глобальных обзоров с целью создания высоко-

точных звездных каталогов. Поэтому во второй половине 1980-х годов коллективом сотрудников ГАИШ МГУ с участием автора настоящей работы был создан «Каталог WBVR величин ярких звезд северного неба», выполненный в новой фотометрической системе WBVR. 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 осуществляется миссия GAIA (Европейское космическое агентство) и готовится эксперимент «Лири-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 глобальных систем высокоточных 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 «Ли́ра-Б».

Краткое содержание разделов основной части диссертации

В 1-й Главе описана новая фотометрическая система *WBVR*, созданная на основе опыта электрофотометрических наблюдений, проводившихся в Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции (обсерватории) ГАИШ МГУ с 1976 по 1985 годы. Новизна этой системы заключается не только и не столько в применении оптимального светофильтра для ультрафиолетовой полосы *W*, 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. Диссертант, на равных со своими соавторами Х. Халиуллиным и В.Г. Мошкалевым [Миронов, Мошкалев, Халиуллин, 1984; Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985] участвовал в разработке новых принципов построения фотометрической системы. Для практических наблюдений диссертантом с соавторами было последовательно создано три варианта системы вторичных стандартов фотометрической системы *WBVR*. Для двух первых вариантов величины стандартов определялись в ходе равновысотных наблюдений и увязывались в единую систему способом наименьших квадратов. Диссертантом, совместно с А.В. Кусакиным и В.Г. Мошкалевым [Кусакин, Миронов, Мошкалев, 1991] был тщательно исследован на переменность первичный стандарт системы *WBVR* HD 221525, и не было найдено изменений блеска, превышающих $0^m,006$. Учет спектрального пропускания атмосферы Земли производился способом, разработанным В.Г. Мошкалевым и Х. Халиуллиным [1985]. Для надежной оценки постоянной части атмосферной экстинкции диссертантом был разработан

алгоритм вычисления модели ослабления света в атмосфере Земли [Миронов, 1997; Миронов, Крылова, 1998; Миронов, 1998а; Миронов, Захаров, Прохоров, 2008]. В 1985-м году на основе методов, которыми была создана фотометрическая система *WBVR*, был воспроизведен второй ее вариант объемом в 200 объектов, относительно которых были выполнены наблюдения всех ярких звезд северного неба и получен высокоточный каталог *WBVR*-величин 13600 звезд [Корнилов, Волков, Захаров и др, 1991; Черепашук, Халиуллин, Корнилов, Миронов, 1994; Корнилов, Миронов, Захаров, 1996]. Диссертант являлся одним из руководителей работ по созданию этого каталога.

Третий вариант системы стандартов описывается в главах 3 и 4. В списке стандартов третьего варианта 6484 звезды.

Во 2-й Главе сначала описаны работы по определению показателей цвета Солнца и звезд Гиад [Миронов, Харитонов, 1998; Миронов, Мошкалев Харитонов, 1998]. Наблюдения, проводились диссертантом вместе с А.В. Харитоновым и В.Г. Мошкалевым. Для этих наблюдений была собрана специальная установка с рассеивающим экраном из порошка сернокислого бария. В ходе наблюдений проводился тщательный контроль всех параметров приемника, для чего диссертантом были разработаны специальные методики и изготовлены специальные тестовые осветители. В результате на одной и той же аппаратуре были получены надежные показатели цвета Солнца, а также 149 звезд рассеянного скопления Гиады. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о наличии в окрестностях Солнца, по крайней мере, двух подсистем звезд спектрального типа G2 V, одна из которых представляет сравнительно молодые и более металличные звезды типа звезд Гиад, а другая — звезды, которые по возрасту и химическому составу близки к Солнцу. Два последних параграфа 3-й Главы посвящены поиску близких аналогов Солнца [Миронов, Харитонов, 1998b; Миронов, Харитонов, 2001] и

звезд, пригодных для программы SETI. Были составлены соответствующие списки [Миронов, Кардашев, Гиндилис и др., 2006]. В обоих случаях были использованы определенные нами показатели цвета Солнца и звезд Гиад.

3-я Глава посвящена сравнению фотометрических данных, имеющих в Тянь-Шаньском каталоге *WBVR*-величин и в каталогах, полученных в результате космического эксперимента *Hipparcos* [Захаров, Миронов, Крутяков, 2000; Крутяков, Миронов, Захаров, 2000; Миронов, Захаров, 2002;]. Для такого сравнения диссертантом совместно с А.И. Захаровым была разработана методика, позволяющая по звездам, общим для рассматриваемых каталогов, получить трансформационный полином для вычисления величин и показателей цвета в одном каталоге, через величины и показатели цвета из другого каталога. В отличие от многочисленных работ, имеющих в литературе, где трансформация производилась по линейным формулам, нами были построены полиномы 3-го порядка для вычисления величин H_p , B_T и V_T через W , B , V и R и полиномы 5-го порядка для обратного преобразования. В ходе построения трансформационных полиномов выявилась необходимость добавить в модельное выражение члены с небесными координатами. При этом сходимость вычисляемых и наблюдаемых величин существенно улучшилась. Тем самым было обнаружено наличие систематических ошибок фотометрии, зависящих от небесных координат. Звезды, которые показали наилучшую сходимость при пересчете величин между двумя системами, были отобраны в качестве кандидатов в состав обширной системы (третий вариант) высокоточных фотометрических стандартов [Крусанова, Миронов, Захаров, 2013]. В последнем разделе 3-й главы приведен пример предвычисления звездных величин для типичного приемника излучения на основе прибора с зарядовой связью [Захаров, Колесниченко, Миронов, Николаев, 2008].

4-я Глава посвящена применению многоцветных фотометрических систем для открытия переменных звезд. Описывается новый метод обнаружения переменных на базе многоканальных фотометрических обзоров [Миронов, Захаров, Николаев, 2003]. Метод разработан диссертантом совместно с А.И.Захаровым. Проверка метода на основе данных, полученных в эксперименте Hipparcos, показала, что с его помощью можно обнаруживать до 98% переменных звезд. Важной особенностью метода является возможность оценивать степень достоверности открытия новой переменной. Численный эксперимент, проведенный диссертантом, показал, что для случая одновременных наблюдений в большом количестве (5–10) каналов можно обнаруживать переменные с амплитудами переменности блеска меньшими, чем среднеквадратическая ошибка одного измерения. С помощью этого метода проведена проверка на переменность кандидатов в стандарты, отбор которых описан в главе 3. В результате предложена система фотометрических стандартов на северном небе объемом 6484 звезды [Миронов, Захаров, 2002; Миронов, Захаров, 2007, Крусанова, Миронов, Захаров, 2013].

В 5-й главе описаны основные принципы проведения планируемого космического эксперимента «Ли́ра-Б» [Миронов, Захаров, Прохоров, 2008; Прохоров, Миронов, Захаров, 2008; Прохоров, Захаров, Миронов, 2009; Захаров, Миронов, Прохоров и др., 2012]. Вначале обосновывается необходимость проведения космического фотометрического обзора. Далее, перечисляются требования к современному фотометрическому каталогу и подчеркивается, что в настоящее время нет высокоточных многоцветных фотоэлектрических каталогов звезд, удовлетворяющих всем необходимым условиям.

Целью эксперимента «Ли́ра-Б» является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов от 3^m до 16^m на небесной сфере с помощью телескопа, устанавливаемого на борту

Российского сегмента Международной космической станции. В ходе эксперимента предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 10 спектральных полосах в спектральном интервале от 200 до 1000 нм. Под высокой точностью обзора подразумевается, что 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.

Научные результаты, которые можно ожидать при обработке данных, полученных в эксперименте “Лири-Б”, очень разнообразны. Их серьезное рассмотрение далеко выходит за рамки данной диссертации. В рассматриваемой 5-й главе приведено краткое перечисление основных, наиболее очевидных направлений исследований. К ним относятся:

- создание высокоточного многоцветного фотометрического каталога;
- фотометрическое исследование поверхностей малых планет Солнечной системы;
- изучение Галактики, в том числе составление трехмерной карты межзвездного поглощения и классификация звезд по спектральным классам, светимости и металличности;
- многоцветная поверхностная фотометрия протяженных объектов;
- изучение межзвездного поглощения и оценка расстояний до звезд по межзвездному поглощению в ультрафиолетовой области спектра;
- открытие и изучение переменных звезд;

- обнаружение неразрешенных двойных звезд;
- фотометрия балджей и звездообразных ядер галактик;
- определение параллаксов звезд.

При обсуждении принципов проведения эксперимента «Ли́ра-Б» делается вывод, что должен быть реализован сканирующий режим наблюдений. В качестве фотоприемников должны использоваться матричные ПЗС с обратной засветкой, функционирующие в режиме с временной задержкой и накоплением. Параметры телескопа, используемого в эксперименте «Ли́ра-Б», определяются целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС. Принято решение, что оптимальным будет телескоп, построенный по схеме Ричи-Кретьена с главным зеркалом диаметром 0,5 м, фокусным расстоянием 3 м и полем зрения диаметром 2 градуса.

Сканирующий режим обеспечивается орбитальным и прецессионным движениями МКС.

Многоцветная фотометрия в 10 участках спектра и в панхроматическом фильтре будет обеспечена установкой в фокальной плоскости одиннадцати пар матричных ПЗС, каждая из которых будет покрыта интерференционным покрытием, выделяющим соответствующий спектральный интервал.

В конце главы обсуждаются причины проведения эксперимента на МКС и связанные с этим проблемы. Основной причиной выбора в качестве места проведения эксперимента «Ли́ра-Б» МКС является большой объем научных данных (около 200 Тбайт), который требуется передать на Землю. Намечены способы борьбы с вибрациями станции путем разработки специальной системы стабилизации изображения.

6-я глава посвящена описанию многоцветной фотометрической системы «Ли́ра-Б» и оценкам ожидаемых результатов обзора.

Для эксперимента «Ли́ра-Б» создается новая широкополосная фотометрическая система [Миронов, Захаров, Прохоров и др., 2009; Миронов, Захаров, Прохоров, 2010а; Захаров, Миронов, Прохоров, 2013; Захаров, Миронов, Николаев и др., 2013]. Обосновывается расположение полос системы в диапазоне спектральной чувствительности фотоприемников на основе матричных ПЗС и приводятся результаты расчета многослойных интерференционных покрытий, реализующих требуемые фотометрические полосы. Расчет показывает, что возможно сконструировать интерференционный светофильтр так, чтобы паразитное пропускание вне рабочей области фильтра находилось на уровне порядка 10^{-6} от пропускания в максимуме.

На основании рассчитанных кривых реакции фотометрических полос промоделированы процессы наблюдательного определения межзвездного поглощения в Галактике и проведения трехмерной спектральной классификации по результатам многоцветной фотометрии, оценены предельные звездные величины в каждой полосе и количество звезд разных спектральных классов, которые ожидается зарегистрировать.

Показано, что фотометрическая система даст широкие возможности для определения величины межзвездного поглощения. В отличие от классической системы *UBV*, фотометрическая система «Ли́ра-Б» позволяет определять значения поглощения не только по наиболее горячим звездам со спектрами более ранними, чем В4, но использовать звезды со спектрами от О до F0, а также по карликам и гигантам спектральных классов G и K и по наиболее холодным гигантам спектральных классов позднее М3.

Для целого ряда спектральных типов звезд система «Ли́ра-Б» позволяет проводить трехмерную спектральную классификацию и разде-

лять звезды по температуре, светимости и металличности. В частности, практически для всех спектральных классов удастся отделять сверхгиганты от звезд главной последовательности по их расположению на различных двухцветных диаграммах. Достаточно уверенно можно будет оценивать величину дефицита металлов для звезд позднее, чем A5.

За пять лет наблюдений среднее количество измерений каждой звезды будет около 100. Таким образом, для непериодических звезд погрешность определения звездной величины по измерениям за пять лет снизится примерно в 10 раз. Расчет предельных величин в разных полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б» [Захаров, Миронов, Прохоров и др., 2013] показал, что для звезды спектрального класса A предельная звездная величина при измерении в одном прохождении через фокальную плоскость и при требуемой среднеквадратической ошибке $0^m,01$ составит в полосе “550” $11^m,6$, а при измерениях в течение пяти лет — $16^m,3$. В главе 6 приведены подробные таблицы предельных звездных величин.

На основе ряда предположений о законах изменения звездной плотности в Галактике, было проведено моделирование количества звезд разных спектральных классов, которые будут зарегистрированы приемными устройствами телескопа «Ли́ра-Б» [Захаров, Миронов, Прохоров и др., 2013]. При значении ошибки фотометрии, заданной на уровне $0^m,1$ это количество составит от нескольких десятков звезд на квадратный градус в ультрафиолетовых полосах, до нескольких тысяч звезд на квадратный градус в красной полосе “700”. В главе 6 приведены данные для разных полос и разных спектральных классов.

В последнем разделе главы 6 обсуждается проект создания принципиально новой системы стандартов, пригодных для любой фотометрической системы, которая должна быть создана на основе измерений в эксперименте «Ли́ра-Б» [Миронов, Захаров, Амбарцумян, 2007; Захаров,

Миронов, Николаев и др., 2013]. Первым приближением для этой системы стандартов может служить система стандартов на северном небе, описанная в Главах 3 и 4.

Заключение диссертации состоит из двух частей. В первой из них обсуждаются перспективы развития фотометрических систем [Миронов, 2004; Миронов, Захаров, Амбарцумян, 2007; Прохоров, Захаров, Миронов, 2009] и их применения для наземных и космических наблюдений. Во второй части Заключения собраны основные выводы диссертации.

В семи Приложениях приведены, соответственно,

- оценки некоторых систематических ошибок фотометрии и спектрофотометрии;
- уточнение некоторых терминов и формул;
- уравнения трансформации величин между некоторыми фотометрическими системами;
- таблицы, в том числе, таблица нормированных кривых реакции системы *WBVR*, таблица величины стандартов системы *WBVR*, таблица *WBVR*-величин звезд Гиад, каталог звезд, отобранных в качестве кандидатов для SETI;
- сведения о программе вычисления спектрального пропускания атмосферы Земли;
- расчет предельных звездных величин;
- оценка количества звезд в каталоге «Лиры-Б».

Теоретическая и практическая значимость работы.

В ходе работы разработаны теоретические основы создания фотометрических систем нового типа, 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, определены показатели цвета Солнца в системе *WBVR*, составлен список аналогов Солнца и звезд, пригодных для программы SETI, выведены уравнения перевода величин *WBVR* на систему типичного приемника на основе кремниевого ПЗС.

Разработаны принципы многоцветного фотометрического обзора неба с борта пилотируемой космической станции и создана 10-цветная фотометрическая система для обзорных наблюдений из космоса.

Методология и методы исследования

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

Нами для проведения измерений и их обработки на каждом этапе были созданы новые или существенно уточнены использованные 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.

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, используемой при редукциях фотометрических измерений за атмосферу.

Впервые было показано, что точность индивидуального измерения 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; получен каталог 6484 фотометрических стандартов на северном небе.

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

Разработаны принципы проведения космического многоцветного фотометрического обзора неба.

Создана новая 10-полосная фотометрическая система для широкополосных космических обзоров, позволяющая получать фотометрическую информацию с высокой точностью и проводить параметризацию звезд по эффективной температуре, величине ускорения силы тяжести на поверхности звезды и металличности, а также определять значение межзвездного поглощения.

Научная и практическая значимость диссертации. Апробация.

Диссертация имеет большую научную значимость, так как на основе сделанных в ней выводов, созданных фотометрических каталогов,

и, применяя описанные в ней методики фотометрических измерений, возможно 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.

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 международных 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 «The Multicolor Lyra Photometric System for Variable Stars and Halo Studies» в Звенигороде, на конференции «Calibration and Standardization of Large Surveys and Missions in Astronomy and Astrophysics» в ФермиЛаб (Батавия, штат Иллинойс), 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.

Результаты, полученные в работе, 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, НПО «Энергия» и др.

Список работ, в которых опубликованы основные результаты диссертации:

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, июля 17, стр. 6-7.
2. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф. **Система высокоточных фотоэлектрических стандартов в полосах WBVR.** Астрономический циркуляр, №1351, 1984, стр. 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, pp.291-323.
4. Корнилов В.Г., Крутяков А.Н., Миронов А.В. **Автоматизированный фотометрический комплекс Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции ГАИШ.** В сб. "Современные технологии в автоматизированных системах научных исследований, обучения и управления" под ред. В.А.Садовниченко, М.:Изд. Московского университета, 1990, стр.125-128.
5. 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, стр. 261-267.
6. 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. **Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба.** Под ред. В.Г. Корнилова. Труды ГАИШ, т.63, М.: Изд-во Московского ун-та, 1991. 400 стр.

7. 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.

8. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В., Колыхалова О.М. **Об аппаратурных систематических ошибках фотоэлектрической фотометрии.** Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия физико-математическая. 1995. №4, часть I. стр. 54-64.

9. Миронов А.В., Мошкалев В.Г. **Анализ спектрофотометрических и фотометрических данных для звезд – первичных спектрофотометрических стандартов.** Астрономический журнал, 1995, т.72, вып.1, стр. 80-88.

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

11. Миронов А.В., Мошкалев В.Г. **Анализ и коррекция распределений энергии в спектрах 238 вторичных спектрофотометрических стандартов.** Астрономический журнал, 1996, т.73, вып. 5, стр. 772-782.

12. Миронов А.В. **Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд.** (Учебное пособие.) М. Изд-во ТОО “ЭДЭМ”. 1997. Стр. 1-157.

13. 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.

14. Миронов А.В., Харитонов А.В. **Наблюдательное определение показателей цвета Солнца.** Известия Академии Наук. Серия физическая. 1998. Т.62. No.6. С.1198

15. 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.

16. Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В. **Показатели цвета Солнца и звезд Гиад.** Астрономический журнал, 1998, т.75, No.6. С.903-912.

17. 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. Стр.44-57.

18. 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 года, 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.

19. 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. Пулковое 5-8 июня 2000 года. Изд-во СПбГУ, 2000. С.12-15.

20. Миронов А.В., Харитонов А.В. **Выбор аналогов Солнца на основе различных индексов цвета.** 2001. — М. Труды ГАИШ. Т.71. Стр. 94-101.

21. Mironov A., Zakharov A. **Systematic Errors of High-Precision Photometric Catalogues.** Astrophys. and Space Sci., 2002, v.280, Issue 1/2, p.71-76.

22. Mironov A.V., Zakharov A.I., Nikolaev F.N. **On the New Technique for Discovering Variable Stars.** Baltic Astronomy, 2003, v.12, 589-594.

23. Ambartsoumian A.R., Mironov A.V., Zakharov A.I.. **Ultraviolet Passbands for a Space Multicolor Photometric System** Baltic Astronomy, 2003, v.12, 629-630.

24. 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.— Стр.107-118.

25. Захаров А.В., Миронов А.В., Крутяков А.Н.

О систематических ошибках высокоточных фотометрических каталогов.

2004. Труды ГАИШ. Т. **70**. – М.: Изд. «Янус-К». с.289-303.

26. Миронов А.В., Кардашев Н.С., Гиндилис Л.М., Захаров А.И., 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, 2006, т. **60**.

27. 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. Proceedengs of a meeting held in Blankenberge, Belgium 8-11 May 2006. ASP Conference Series, 2007. Vol. 364, p. 81-83.

28. Миронов А.В., Захаров А.И. **В.Б. Никонов и современные проблемы астрофотометрии.** Известия КрАО, 2007, т. 103, № 3, с. 218-224.

29. 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. Стр. 105-117.

30. Прохоров М.Е., Миронов А.В., Захаров А.И. **Российский космический фотометрический эксперимент «Ли́ра-Б».** "Физика Космоса": Труды 37 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 28 янв.-1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2008. Стр. 141-163.

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

32. 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. , 2008 г. т. **6**. № 6. С.24-29.

33. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В. **Космический астро- и фотометрический эксперимент «Свеча»**. Труды ИПА РАН. Вып. 20.– Спб.: Наука, 2009. Стр. 336-340.
34. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В. **Космический многоцветный фотометрический обзор всего неба «Ли́ра»**. Труды ИПА РАН. Вып. 20.– Спб.: Наука, 2009. Стр. 453-456.
35. 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. Стр. 85-107.
36. 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.
37. Malkov, Oleg; Mironov, Aleksey; Sichevskij, Sergej **Single-binary star separation by ultraviolet color index diagrams**. Astrophysics and Space Science, 2011. Vol. 335, No. 1, p. 105-111.
38. Karpov, S. V.; Malkov, O. Yu.; Mironov, A. V. **Cross-identification of large surveys for finding interstellar extinction**. Astrophysical Bulletin, 2012. Volume 67, Issue 1, pp.82-89.
39. 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, Vol.6, 2012, p.31
40. А.И.Захаров, А.В.Миронов, М.Е.Прохоров, А.В.Бирюков, О.Ю.Стеколыщиков, М.С.Тучин. **Космический эксперимент «Ли́ра-Б»: цели и принципы реализации**. Астрономический журнал, 2013, том 90, №3, с.223-241.

41. 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.
42. 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.
43. Sichevskiy, S.G., Mironov, A.V., Malkov, O.Yu. **Classification of stars with WBVR photometry.** Astron. Nachr. 2013. V.334. P.832–834.
44. 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.

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 литературы содержит 225 наименований.

Оформление диссертации соответствует ГОСТ Р 7.0.11 – 2011.

Благодарности.

С чувством глубокой благодарности я вспоминаю своих учителей, которые направили мою деятельность в русло астрофотометрических исследований: Бориса Васильевича Кукаркина, Дмитрия Яковлевича Мартынова, Александра Сергеевича Шарова, Павла Николаевича Холопова.

Я искренне благодарю своих друзей и коллег, А.М.Черепашука, В.Г.Мошкалева, В.Г.Корнилова, А.И.Захарова, А.В.Крылова, вместе с которыми мы осваивали высоты современной астрофотометрии, и без которых настоящая работа не могла бы быть выполнена.

Я благодарен многим моим коллегам из ГАИШ и из различных институтов и обсерваторий, в дискуссиях с которыми рождалась убежденность в справедливости выводов, сделанных в настоящей работе. Назову только некоторых из них, и прошу извинить меня тем, кто оказался не перечисленным на этой странице. Я благодарен В.Страйжису, Н.Н.Самусю, А.С.Расторгуеву, А.А.Архарову, В.М.Терещенко, Л.Н.Князевой, а также тем, кого уже нет с нами, Х.Халиуллину, А.В.Харитонову, Н.С.Комарову, М.С.Фролову, Е.А.Макаровой, И.Н.Глушневой, Л.Ф.Истомину.

Я благодарю коллег за помощь и ассистирование в наблюдениях на телескопах Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции (обсерватории) ГАИШ: А.В.Кусакина, А.Н.Крутякова, М.И. Крылову, О.М. Колыхалову, Е.Н. Пастухову, Т.М. Погрошеву.

Работа по сравнению данных каталога Hipparcos и Тянь-Шаньского каталога (Гл.3) была поддержана грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-16282). Работа по открытию переменных звезд была поддержана грантом Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 02-02-16069).

Эскизный проект «Создание комплекса научной аппаратуры многоцветного фотометрического обзора неба», шифр «Ли́ра-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.

Глава 1.

Фотометрическая система *WBVR*.

1.1. Потребность создания широкополосной системы *WBVR*.

Очевидно, что предшественницей системы *WBVR* является система *UBV*, сыгравшая революционную роль в астрофотометрии.

Система *UBV* была призвана устранить существенные расхождения между величинами, полученными разными авторами в интернациональной фотометрической системе. Причину возникновения расхождений понял в конце 1940-х годов Гарольд Джонсон. Он обнаружил, что связи показателей цвета, для разных рядов наблюдений являются нелинейными и неоднозначными, и что причиной этого является неодинаковое включение излучения в области бальмеровского скачка в синюю фотометрическую полосу.

Джонсон понял, что справиться с проблемой наиболее простым способом можно, если добавить в состав синей кривой реакции светофильтр, обрезающий ультрафиолетовое излучение с длинами волн короче бальмеровского скачка. Располагая фотоумножителем типа RCA 1P21, распространённым тогда в США, он выделил из области его спектральной чувствительности три полосы. Ультрафиолетовый светофильтр вырезал область бальмеровского континуума в ближнем ультрафиолете и зону бальмеровского скачка. Синий светофильтр выделял



Фото 1. Гарольд Лестер Джонсон
(1921 – 1980).

спектральную область краснее бальмеровского скачка, примерно до $5300 \text{ \AA}$. И, наконец, с помощью желтого светофильтра строилась полоса в области максимума чувствительности глаза. Ее длинноволновая сторона формировалась естественным спадом спектральной чувствительности сурьмяно-цезиевого фотокатода.

В начале 1950-х годов Джонсон и Морган [1951, 1953] опубликовали основополагающие статьи, положив начало новой эпохе звездной фотометрии: эпохе системы

UBV. В этих статьях впервые в истории астрофотометрии были приведены в численной форме кривые реакции использовавшегося фотоэлектрического фотометра.

Нуль-пункт величин *V* системы *UBV*, был перенесён из интернациональной системы с помощью девяти звезд Северного Полярного Ряда. Опираясь на этот нуль-пункт, были определены величины десяти первичных стандартов системы *UBV*, разнесённых вокруг всего неба. Нуль-пункты показателей цвета *U – V* и *B – V* были определены как среднее из инструментальных показателей цвета для шести избранных звезд спектрального типа *A0 V*. Этому среднему было приписано значение, равное нулю.

В системе *UBV* Г.Джонсон с различными соавторами выполнил с многочисленными наблюдения большого количества звезд. Среди них

были яркие звезды, звезды в различных участках неба, звезды рассеянных и шаровых звездных скоплений и др. Эти звезды стали использоваться в качестве вторичных стандартов.

Система *UBV* благодаря сравнительно строгому определению, и обилию вторичных стандартов получила широкое распространение и полностью вытеснила из употребления интернациональную систему *Irg, Irv*. На рубеже 1980-1990-х годов Мермийо [1987, 1991, 1994] составил общую сводку измерений в системе *UBV*, содержащую измерения более чем для 100 000 звезд.

Несмотря на то, что в системе *UBV* были опубликованы кривые реакции всех полос, система была задана не ими, а звездными величинами стандартов, определяемыми с помощью конкретного фотометра Джонсона. Стандартная система *UBV* оказалась связанной с характеристиками конкретного прибора и методикой (к сожалению содержащей ошибки) выноса за атмосферу показателей цвета, применявшейся Джонсоном. В результате, после утраты оригинального фотометра стало невозможно точно воспроизвести при наблюдениях величины стандартов, а методика перевода инструментальных величин в стандартную систему осталась неопределенной.

Внутренние случайные ошибки измерений звездных величин в системе *UBV* у разных авторов сходны и приблизительно характеризуются значением $\sigma = 0^m,02$. Существенно хуже обстоит дело с систематическими ошибками. В качестве примера нами были рассмотрены два ряда измерений звезд Гиад, опубликованных Джонсоном и Нуклесом [1955] и Апгреном и Вайсом [1977]. Сравнение показало, что разность величин *V* в этих двух рядах имеет систематический ход с показателем цвета *B–V* и на интервале $0,6 < B-V < 1,4$ изменяется на $0^m,1$. Кроме этого среднеквадратическое значение разности величин *V* в этих двух рядах (в смысле отклонений от

найденной зависимости) равняется $\sigma = 0^{\text{m}},048$, что сильно превосходит ожидаемую внутреннюю случайную ошибку. Подробнее см. Приложение «А», рисунок А1.

Причины неопределенностей звездных величин, получаемых в системе *UBV*, уже давно были проанализированы вильнюсскими астрономами. Их подробный анализ содержится в статьях Ажусениса и Страйжиса [1966a,b] и в знаменитой монографии В.Страйжиса «Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы» [Страйжис, 1977, глава 6].

На основе сделанного ими анализа были сделаны следующие выводы.

Во-первых, в самом начале введения системы были допущены недочёты в том смысле, что базовые наблюдения первичных стандартов зимой и летом 1951 года реально производились с несколько различными кривыми реакции. Использовался то охлаждаемый, то неохлаждаемый фотоумножитель, в процессе наблюдений первоначальная линза Фабри, изготовленная из кварца и флуорита и склеенная бальзамом, была заменена на цельную кварцевую, возможная селективность отражения света от алюминированных зеркал не учитывалась.

Во-вторых, нуль-пункт величин *V* системы *UBV* был перенесён из старой международной системы *IPV* с помощью звезд Северного Полярного Ряда. Посредством его были определены величины десяти первичных стандартов, которые использовались для определения звездных величин *V* других звезд, а также для определения коэффициентов атмосферной экстинкции. Однако в их число входили звезда η Нуа, которая является переменной типа ВСЕР с амплитудой переменности $0^{\text{m}},06$, и звезды, заподозренные в переменности NSV 725, NSV 3973 и NSV 14458 с амплитудами $0^{\text{m}},06$, $0^{\text{m}},08$ и $0^{\text{m}},09$, соответственно.

В-третьих, нуль-пункт системы колор-индексов $U - B$ и $B - V$ был определён как среднее значение инструментальных колор-индексов звезд шести спектрального класса A0 на северном небе. Это были HR 3314, γ UMa, 109 Vir, α CrB, γ Oph и α Lyr. По данным Общего каталога переменных звезд (ОКПЗ или GCVS) известно, что α CrB — переменная типа Алголя с периодом около 17 суток и амплитудой переменности около $0^m,1$. Постоянство блеска α Lyr также находится под сомнением: ОКПЗ сообщает, что это переменная звезда типа DSCTC с амплитудой переменности $0^m,09$. Звезды γ UMa и 109 Vir входят в каталог звезд, заподозренных в переменности (NSV 05379 и NSV 06794) с амплитудами $0^m,05$ и $0^m,04$, соответственно. В результате, как нуль-пункт величин V , так и нуль-пункт показателей цвета оказались неточно определёнными.

Наконец, самым серьёзным недостатком было то, что редукция за атмосферу показателя цвета $U - B$ производилась с постоянным коэффициентом экстинкции, не зависящим от спектрального класса звезды. В результате, цветовая система показателей цвета $U - B$ оказалась непостоянной и зависящей от величины атмосферной массы, при которой проводились наблюдения. Поскольку десять первичных стандартов системы UBV — это звезды различных спектральных классов, даже для стандартных звезд цветовая система индексов $U - B$ не является единой. Система UBV в принципе не может иметь единых кривых реакции, так как система величин U зависит от зенитного расстояния, атмосферных условий и высоты обсерватории над уровнем моря, а кривая реакции полосы U системы UBV принципиально не определена. В область кривой реакции $R_U(\lambda)$ системы UBV входит бальмеровский скачок, поэтому наблюдаемые отсчёты сильно зависят от действительного положения длинноволнового крыла инструментальной

кривой реакции. Так как последняя изменяется от целого ряда факторов, в частности от температуры, это трудно учитывать, и в величины U входит дополнительная неопределённость, которая искажает высокоточные фотометрические измерения.

Систематические ошибки, вызываемые совокупностью этих неопределенностей, могут достигать $0^m,05$ и более.

Другими словами, в фотометрической системе UBV не были определены ни стандартные процедуры учета атмосферной экстинкции, ни процедуры трансформации инструментальных величин на стандартную систему. Реальное определение системы UBV ни в части ультрафиолетовой полосы, ни в целом, не удовлетворяет требованиям к современной многоцветной фотометрической системе (см. Приложение «Б», раздел Б5).

При ревизии полос системы UBV особое внимание было обращено на ультрафиолетовую полосу U .

Ажусенис и Страйжис [1969] предложили заменить ультрафиолетовую полосу U на новую. По их предложению кривая реакции этой полосы должна удовлетворять следующим условиям:

- а) не включать в себя область бальмеровского скачка;
- б) быть строго определённой;
- в) вынос за атмосферу величин в этой полосе должен проводиться с коэффициентами экстинкции, зависящими от распределения энергии в спектре (спектрального типа) звезды.

Ультрафиолетовая величина, удовлетворяющая этим требованиям, была предложена в работе Страйжиса [1973] и получила обозначение W . Вскоре проверка фильтра W была осуществлена в наблюдениях. Для 103 звезд были определены величины $WBVR$ [Мейштас и др., 1975] и работоспособность новой ультрафиолетовой полосы была подтверждена.

Полоса W отличается от полосы U Джонсона тем, что ее длинноволновая граница смещена в сторону более коротких длин волн так, чтобы практически не захватывать область бальмеровского скачка. Другими словами, если Джонсон убрал из области бальмеровского скачка полосу B , то вильнюсцы убрали оттуда еще и ультрафиолетовую полосу. Применение полосы W вместо U должно было существенно улучшить стабильность результатов фотометрии в ближнем ультрафиолетовом диапазоне.

Существует неопределенность в определении красной полосы R .

Область спектральной чувствительности ФЭУ с мультищелочным катодом позволяет разместить четыре практически неперекрывающиеся фотометрические полосы. То есть, кроме ультрафиолетовой, синей и визуальной полос имеется возможность создать полосу в красной области спектра. В астрономической практике было создано более десятка различных вариантов «красной» фотометрической полосы (см., статью Страйжиса и др., [1981]). Большинство из них имеют недостаточно точно определенные кривые реакции. Анализ Страйжиса и др. [1981] показал, что оптимальными следует считать полосу R Кузинса и полосу T_1 Вашингтонской системы, которые реализовывались с помощью фотоумножителей с катодом из арсенида галлия.

1.2. Принципы, положенные в основу широкополосной системы WBVR.

Для того чтобы измерение любой физической величины можно было воспроизвести, оно должно удовлетворять ряду требований, которые устанавливает метрология. Для воспроизводимости результатов измерения во-первых, должен быть установлен эталон, во-вторых,

должны использоваться определенные средства измерений и, в-третьих, должны быть определены методики измерений и их обработки. Только при соблюдении этих условий можно обеспечить высокую точность измерений, как в случайном, так и в систематическом отношении.

Исходя из того, что современная фотометрическая система должна соответствовать основным требованиям метрологии и используя некоторые идеи вильнюсских астрономов, изложенные выше, в ГАИШ была реализована фотометрическая система *WBVR* [Миронов, Мошкалев, Халиуллин, 1984, Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985]. В 1974 году были начаты работы по массовым измерениям величин звезд в этой системе. Наблюдения производились в Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции ГАИШ, поэтому вариант системы *WBVR*, реализованный в ГАИШ, иногда называют Тянь-Шаньской фотометрической системой.

Тянь-Шаньская широкополосная фотометрическая система *WBVR* отличается рядом новых положений.

При построении фотометрической системы необходимо, прежде всего, иметь в виду, что не существует фотометрических измерений, свободных от случайных и систематических ошибок, связанных с качеством измерительных приборов, характером атмосферных условий, методикой редуций и т.д. Поэтому для того, чтобы не вводить ошибки индивидуальных измерений в основание фотометрической системы, ее определение не должно зависеть от результатов конкретных измерений. Более того, первичный стандарт не должен быть привязан к свойствам конкретной аппаратуры, чтобы иметь возможность постоянных проверок, ревизий и усовершенствований аппаратуры и методов наблюдений.

Рассматривая эти требования, мы в 1974 году сделали вывод, что совершенная фотометрическая система должна быть определена аксио-

матически введенными кривыми реакции и априорной величиной одной единственной звезды: первичного стандарта, постоянство блеска которого должно быть подтверждено с высокой точностью.

Как уже указывалось в предыдущем разделе, нуль-пункт величин V системы UBV был определен из условия, что V -величины 9-ти звезд Северного Полярного ряда (№№ 6, 10, 12, 13, 16, 19, 2г, 4г, 8г) равны их величинам в Международной системе IP_v . Нуль-пункты показателей цвета $U - B$, $B - V$ и $V - R$ были определены так, чтобы в среднем равняться нулю для шести ярких звезд спектрального типа A0 V (HR 3314, α Lyr, α CrB, γ Oph, γ UMa, 109 Vir). Тем самым нуль-пункты звездных величин в разных полосах были определены через различные группы звезд, распределенных по всему небу. Даже не принимая во внимание проблему установления возможной переменности блеска упомянутых звезд, такое определение нуль-пункта вызывает серьезное возражение, как с практической, так и с методической точек зрения. Прежде всего, главным недостатком этого подхода к построению фундаментальной фотометрической системы является, тот факт, что звезды-стандарты системы UBV по существу являются вторичными стандартами. Первичный же стандарт, связанный с фотометрической системой первоначального фотометра и с калибровкой его чувствительности по внешнему искусственному источнику, в настоящее время безвозвратно утерян вместе с фотометром. Цветовая система UBV была определена не в смысле кривых реакции, а через использование результатов измерений с помощью первоначального фотометра в отношении многочисленных звезд различных спектральных типов в различных областях неба; поэтому кривые реакции полос UBV не определяют фотометрическую систему. Наоборот, они становятся предметом интенсивных исследований и повторных ревизий. В этой ситуации нет даже теоретической возможности улучшить величины вторичных стандартов,

оставляя систему *UBV* без постулирования кривых реакции и установления первичных стандартов. Итак, ошибки *UBV* стандартов, являющиеся следствием методических дефектов при закладке системы, постоянно входят во все последующие *UBV* измерения десятков тысяч звезд.

Аксиоматические кривые реакции, которыми определена стандартная система *WBVR*, приведены в табл. Г1 Приложения «Г». Нуль-пункт шкалы величин был установлен через первичный стандарт, в качестве которого была выбрана звезда HD 221525, находящаяся в северной полярной области. Этой звезде были приписаны звездные величины 5.922, 5.800, 5.574 и 5.346 в полосах *W*, *B*, *V* и *R*, соответственно.

Употребляя термины метрологии, скажем, что эти кривые реакции и нуль-пункт составляют измерительный эталон.

Для наблюдений в мастерских ГАИШ был построен одноканальный фотоэлектрический фотометр. Полосы *WBVR* реализовывались с помощью стеклянных светофильтров, следующим образом:

$W = \text{УФС2}(3.0 \text{ мм}) + \text{БС5}(1.5 \text{ мм}) + \text{CuSO}_4(2 \text{ мм}) + \text{силикон},$

$B = \text{СС5}(2.0 \text{ мм}) + \text{ЖС10}(2.0 \text{ мм}) + \text{СЗС21}(1.7 \text{ мм}),$

$V = \text{ЖС18}(3.0 \text{ мм}) + \text{СЗС21}(1.7 \text{ мм}),$

$R = \text{КС14}(5 \text{ мм}).$

Отметим, что красное пропускание фильтра *W* исключалось путем использования светофильтра изготовленного из кристалла медного купороса $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Полосы *B* и *V* были близки к джонсоновским; полоса *R* была значительно уже, чем ‘*R*’ Джонсона и не перекрывалась с полосой *V*; средняя длина волны полосы *R* близка к средней длине волны полосы *R* Кузинса. Кривые реакции стандартного Тянь-Шаньского варианта системы *WBVR* приведены в таблице Г1а Приложения «Г». Они незначительно отличаются от варианта Страйжиса [1973].

Для измерений применялся фотоэлектрический фотометр со счетом фотонов. Использовался отечественный фотоумножитель ФЭУ-79

с фотокатодом типа S-20, термостатированный с точностью до 0,5 градуса, термокомпенсированный импульсный усилитель [Колпаков и Магницкий, 1976] и цифровой электронно-счетный частотомер.

Так как при наблюдениях наиболее ярких звезд иногда использовался квазинейтральный светофильтр, и существовала слабая зависимость кривых реакции от температуры (использовались не термостабилизированные стеклянные светофильтры), инструментальная цветовая система была несколько переменной в процессе наблюдений. В каждый определенный момент кривые реакции инструментальной системы $R'(\lambda)$ могли быть найдены как произведение коэффициентов отражения r_λ от двух алюминированных зеркал, кривой реакции Q_λ фотокатода, коэффициентов пропускания кварцевой линзы Фабри q_λ , нейтрального светофильтра (если применялся) N_λ , и соответствующего цветного светофильтра $S_\lambda(t)$ для одной из полос W, B, V и R., то есть

$$R'_\lambda = r_\lambda Q_\lambda q_\lambda N_\lambda S_\lambda(t).$$

Кривые r_λ , Q_λ , q_λ и N_λ принимались неизменными, а зависимость $S_\lambda(t)$ от температуры исследовалась в лабораторных условиях для всех спектральных полос. Затем наблюдения в инструментальной системе $R'(\lambda)$ редуцировались в стандартную систему $R(\lambda)$ по формуле (Б8.2 в Приложении «Б»). Все наблюдения, начиная с 1976 года и заканчивая 1984 годом, проводились с одними и теми же фотометром, фотоумножителем и набором светофильтров.

Стабильность существенных параметров аппаратуры систематически контролировалась. В течение всего периода наблюдений, никаких изменений чувствительности аппаратуры, превосходящих 0,5% в час, не было замечено. Необходимо подчеркнуть, что всегда применялся квазидиф-

ференциальный метод наблюдений (т.е. измерение программной звезды относительно вторичного стандарта или взаимное сравнение двух стандартов), следовательно, нас интересовали только относительные изменения чувствительности за время между последовательными наблюдениями одного и того же стандарта (обычно от 5 до 20 минут). Такие изменения чувствительности измерительной аппаратуры обычно не превышали 0,1%, и их вкладом в ошибку наших фотометрических измерений можно было пренебречь.

Много внимания уделялось проверке параметров нелинейности системы счета импульсов. Редукции за нелинейность проводились по формуле

$$N = N' / (1 - \tau N')$$

(см., например, Энге, [1966] или книгу Миронова [Миронов, 2008]), где N' – измеренная скорость счета от источника света (в импульсах в секунду), N – скорость счета, исправленная за нелинейность, τ – параметр, определяемый экспериментально («мертвое время»). Определение параметра τ для измерительного прибора производилось двумя методами: во-первых, из условия постоянства отношения монохроматических потоков от двух звезд различного блеска ($\Delta m \sim 2^m$), измеренных при различном диафрагмировании главного зеркала или с набором различных нейтральных светофильтров и, во-вторых, по измерениям лабораторных источников света с известным отношением световых потоков. Оба метода дали одинаковый результат. Величина τ была принята равной $55 \cdot 10^{-9}$ с. Приведенная выше формула позволяла оценить нелинейность нашей аппаратуры с точностью выше, чем 0,5%, если $N' \leq 0,5 \cdot 10^6$ импульсов в секунду. При больших потоках другие нелинейные эффекты (такие, например, как усталость фотоумножителя) становятся заметными [Юнгблат, 1970], поэтому, для того, чтобы измерять звезды ярче пятой величи-

ны мы использовали набор нейтральных фильтров, чтобы оставаться в соответствующем участке кривой нелинейности фотометра.

В результате описанных мероприятий были соблюдены два оставшихся метрологических требования: строго зафиксированы средства измерения и установлены неизменные методики измерений и их обработки. Важнейший этап обработки измерений: учет атмосферной экстинкции будет рассмотрен далее в разделе 1.6.

1.3. Сеть вторичных стандартов фотометрической системы WBVR. Вариант 1976-1984 гг.

Чтобы предпринять массовые фотометрические измерения в оптимальных условиях, повысить точность и эффективность фотометрических измерений, а также точно определить и принять в расчет атмосферную экстинкцию, нужно располагать высокоточной системой вторичных стандартов. На первом этапе в качестве кандидатов в стандарты была выбрана группа белых и желтых звезд в интервале величин от 4^m до 7^m , равномерно распределенных по небу.

Если оказывалось, что кандидат в стандарты — двойная или кратная звезда, он исключался из числа стандартов в двух случаях. Во-первых, если звезда была двойной с расстоянием между компонентами менее одной угловой минуты и, одновременно, разность величин между компонентами была менее 5^m ; во-вторых, когда было известно, что звезда является спектральной двойной, причем спектр вторичного компонента существенно влияет на суммарное распределение энергии. В первом случае мы опасались, что вклад крыльев изображения вторичного компонента в световой поток, проходящий через диафрагму фотометра, может быть различен при повторном наведении телескопа на ту же са-

мую звезду, ухудшая этим точность измерений. Во втором случае составной спектр звезды затрудняет вычисление коэффициента атмосферного ослабления света как функции спектрального класса.

В результате была выбрана группа из 62 звезд, в основном принадлежащих главной последовательности, в интервале спектральных классов от B9 до G7.

Отличительной чертой звезд от B9 до F5 является сравнительно гладкое распределение энергии в спектре, число сильных линий и полос в их спектре малó, существуют значительные по длине спектральные интервалы занятые практически континуумом. Для этих звезд вычисление параметров атмосферной экстинкции в широкополосной фотометрии достаточно просто и определено. Таким образом, эти звезды были выбраны, чтобы использоваться главным образом как экстинкционные стандарты. Однако известно, что значительная часть A-F звезд является переменными типов δ Sct, β Cep, и α CVn. Естественно, что постоянство блеска этих стандартов должно быть тщательно проверено.

Вероятность обнаружить физическую переменность блеска существенно уменьшается у звезд в интервале спектральных классов F6V-G7V. Это преимущество особенно важно для звезд-стандартов, так что некоторые неопределенности процедур редукции за атмосферу и трансформации между системами, вызванные различием в металличности звездных атмосфер, выглядят не слишком существенными; в особенности трудности уменьшаются для звезд с непосредственно измеренными распределениями энергии в спектре. Очевидно, что выбранные звезды-стандарты не должны показывать никакой переменности с амплитудой, сравнимой с точностью определения величин. Стабильность блеска каждой звезды из списка кандидатов в стандарты может быть проверена только в результате продолжительной серии тщательных измерений в течение нескольких лет. Заслуживает упоминания то, что переменность общепринятого международного

спектрофотометрического стандарта α Луг с амплитудой до $0^m,09$ (ОКПЗ) делает сомнительной оценку точности абсолютной спектрофотометрии, произведенных во всем мире для сотен звезд.

Наблюдения звезд-стандартов в полосах *WBVR* проводились с 1976 года на 48-см рефлекторе Тянь-Шаньской высокогорной экспедиции (обсерватории) ГАИШ на высоте около 3000 м над уровнем моря.

Чтобы построить сеть вторичных стандартов, в качестве основного метода наблюдений был избран метод равных высот. Для взаимного сравнения стандартов обычно производились, по крайней мере, два независимых измерения каждой звезды из равновысотной пары по следующей схеме:

$$St\ 1 \rightarrow St\ 2 \rightarrow St\ 1 \rightarrow St\ 2.$$

Все измерения были исправлены за атмосферную экстинкцию, т.е. редуцированы к внеатмосферным значениям. Определение атмосферной экстинкции и ее учет при многоцветной фотометрии является специальной проблемой. Нами использовался итерационный способ, развитый Мошкалевым и Халиуллиным [1985]. Способ обеспечивает точность редуций за атмосферу лучше, чем $0^m,005$ в каждом из фильтров *WBVR*. (см. далее раздел 1.6)

1.4 Увязка величин вторичных стандартов.

Равновысотные измерения пары стандартов, исправленные за атмосферную экстинкцию итерационным методом, дают в результате уравнение вида

$$m_i - m_j = \Delta m_{ij}; \quad (1.1)$$

здесь m_i и m_j – неизвестные внеатмосферные величины i -го и j -го стандартов, соответственно, в заданной фотометрической полосе, а Δm_{ij} – измеренная разность этих величин в стандартной системе. Перевод разности величин из инструментальной системы $T'(\lambda)$ в стандартную, обладающую кривой реакции $T(\lambda)$, производится в соответствии с очевидной формулой

$$\Delta m_{ij} = \Delta' m_{ij} - 2.5 \log \frac{\int E_i(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int E_i(\lambda) T'(\lambda) d\lambda} + 2.5 \log \frac{\int E_j(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int E_j(\lambda) T'(\lambda) d\lambda}, \quad (1.2)$$

где Δm_{ij} и $\Delta' m_{ij}$ – разности величин в стандартной и инструментальной системах, соответственно, а E_i и E_j – относительные распределения энергии в спектрах этих стандартов.

Рассмотрим наблюдения K вторичных стандартов, каждый из которых сравнивался равновысотным методом по крайней мере с двумя другими. Некоторые из них (в нашем случае – большинство) имели прямое сравнение с первичным стандартом HD 221525, величины которого определены как нуль-пункты четырех полос фотометрической системы $WBVR$.

Если N – число измеренных пар, то уравнения вида (1.1) для них составят систему из N условных уравнений с K неизвестными. Искусственно добавим в уравнения (1.1) сумму произведений нулевых коэффициентов на неизвестные величины всех остальных стандартов. Тогда система (1.1) будет иметь вид:

$$\sum_{k=0}^{k=K} a_k m_k = \Delta m_{ij}, \quad (1.3)$$

$$\text{где } a_k = \begin{cases} +1, & k = i \\ -1, & k = j \\ 0, & k \neq i, k \neq j \end{cases}.$$

Поскольку точность измерений разных пар стандартов обычно различна, каждому из уравнений (1.3) можно приписать различный вес. При назначении веса во внимание принимаются конкретные условия наблюдений: средняя воздушная масса и разность воздушных масс для стандартов в момент их увязки, угловое расстояние между ними, стабильность атмосферной прозрачности и т.п.

При решении системы условных уравнений (1.3) методом наименьших квадратов создаваемая матрица системы нормальных уравнений оказывается вырожденной. При любом числе подобных уравнений ранг этой матрицы всегда на единицу меньше, чем число неизвестных, а определитель её равен нулю. В системе (1.3) всегда недостаёт одного независимого уравнения. Это уравнение произвольного нуля-пункта. Достаточно добавить к системе условных уравнений дополнительное уравнение вида $m_0 = M$, где m_0 — величина, приписанная произвольно одной из звезд, чтобы система стала определённой и имела единственное решение. В нашем случае к системе добавляется уравнение, приписывающее первичному стандарту априорно заданную величину.

Описанным способом были установлены величины в каждой из полос *WBVR* для 62 звезд, формирующих сеть вторичных стандартов в первом варианте стандартов системы *WBVR*. Они получены в результате решения способом наименьших квадратов системы из 980 уравнений и представлены в таблице Г2-а Приложения «Г». В восьми колонках этой таблицы, соответственно находятся: HD номера, спектральный тип, величины *W*, *B*, *V* и *R*; среднеквадратическое отклонение σ_V индивидуальных измерений в фильтре *V* от средней табличной величины *V*; количество *n* индивидуальных измерений.

Мы называем индивидуальным измерением любое сравнение данного стандарта *i*, в паре с другим стандартом *j*. Индивидуальные значения m_i получаются путем прибавления измеренных разностей Δm_{ij} к таб-

личному значению другого стандарта, в соответствии с уравнением (1.1). Индивидуальные *WBVR* величины стандартов для соответственных юлианских моментов опубликованы в таблице 4 в статье Халиуллина, Миронова и Мошкалева [Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985].

Данные в таблице Г2-а дают возможность для большинства из наших стандартов, в том числе и для HD 221525 прийти к выводу о том, что нет переменности блеска, превышающего по амплитуде $0^m,015$, а также что их средние величины остаются стабильными на протяжении нескольких лет. Следует отметить, что в результате наблюдений по программе построения сети стандартных звезд, мы нашли микропеременность нескольких звезд (см., например, работу Колыхаловой, Миронова и Мошкалева [1978]). Как следствие, эти звезды были исключены из списка стандартов. Звезды, помеченные в таблице звездочкой в последнем столбце, согласно КATALOGу ярких звезд [Хоффлейт и Уоррен, 1991] имеют переменную лучевую скорость; нельзя исключить возможности, что они имеют переменность блеска с амплитудой менее $0^m,015$.

1.5. Исследование постоянства первичного стандарта фотометрической системы *WBVR*.

Чтобы постоянно контролировать постоянство блеска первичного стандарта, около него были выбраны контрольные звезды HD 221142, HD 221829 и HD 224687. Данные об этих звездах приведены в табл. 1.1. Необходимо подчеркнуть, что величины контрольных звезд, приведенные в этой таблице, являются результатом наших измерений, поэтому точность значений ограничена вполне определенными ошибками ($0^m,001$ – $0^m,003$) в противоположность четко постулированным величинам первичного стандарта HD 221525, которые не имеют ошибок изме-

рений. Точность величин первичного стандарта связана только с возможной микропеременностью звезды. Постоянство блеска HD 221525 исследовалось специально. С 1978 по 1983 год переменность с амплитудой, превышающей $0^m,01$ не была обнаружена ни для главного стандарта, ни для контрольных звезд. Мы считали, что если какая-либо переменность блеска первичного стандарта будет обнаружена, его функция легко перейдет к одной из контрольной звезд без заметной потери точности системы.

Таблица 1.1.

Первичный стандарт системы *WBVR* и его контрольные звезды.

HD	Sp	W	B	V	R	Примечание.
221525	A7 IV	$5^m,922$	$5^m,800$	$5^m,574$	$5^m,345$	первичный стандарт
221142	F0	6,954	6,896	6,613	6,336	контрольный стандарт
221829	A5	7,444	7,286	7,110	6,907	контрольный стандарт
224687	A0	6,917	6,830	6,767	6,680	контрольный стандарт

Приписывая величины первичному стандарту, мы старались сделать величины *WBVR* непокрашенных A0 V звезд в нашей системе возможно более близкими к *UBVR* величинам соответствующих звезд в каталоге Джонсона и др. [1967]. Однако это условие близости не включено в определение системы *WBVR* иным образом, как установлением величин стандарта HD 221525.

В 1988 г. Ворошилов [1989], анализируя наблюдения первичного стандарта HD 221525, опубликованные в нашей работе [Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985], заподозрил наличие у этой звезды переменности с амплитудой около $0^m,015$ и периодом между $0^d,05$ и $0^d,17$. В связи с этим нами заново была проведена проверка постоянства блеска первичного стандарта, и контрольных звезд фотометрической системы *WBVR* [Кусакин, Миронов, Мошкалев, 1991].

Фотометрические наблюдения были выполнены в 1988-1990 годах в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории ГАИШ на 48-сантиметровом телескопе.

метровом рефлекторе АЗТ-14 с новым электрофотометром на счете фотонов [Корнилов и Крылов, 1990], о котором будет рассказано позже в разделе 1.7. Новая методика наблюдений позволяла одновременно регистрировать световой поток во всех четырех спектральных полосах, что значительно сокращало время, затрачиваемое на одно измерение. Сигнал от объекта накапливался, как правило, в течение 30 с.

Инструментальная фотометрическая система нового фотометра несколько отличалась, как от стандартного тянь-шаньского варианта системы *WBVR*, так и от инструментальной системы фотометра, с которым проводились наблюдения стандартов ранее. В связи с этим при обработке наблюдений особое внимание было уделено переводу звездных величин в стандартную систему *WBVR*. Редукции за атмосферу производились по формуле (Б8.3) из числа основных формул гетерохромной фотометрии. Кривые распределений энергии в спектрах звезд для подстановки в эту формулу были взяты из Спектрофотометрического каталога звезд, созданного сотрудниками Астрофизического института им. В.Г. Фесенкова АН КазССР [Харитонов и др., 1978, 1988, 2011].

Стандарт HD 221525 наблюдался в четырех спектральных полосах относительно стандарта HD 224687. Наблюдательные ночи отличались достаточно высокой и устойчивой прозрачностью атмосферы, характерной для высокогорных обсерваторий на Тянь-Шане [Миронов, Мошкалев, Халиуллин, Черепашук, 1978]. Например, бугеровские коэффициенты атмосферной экстинкции для полосы *B*, определенные по наблюдениям HD 224687, во все ночи хорошо сошлись между собой, их вариации не превышали $0^m,004$ за время порядка 1 часа. Учет атмосферной экстинкции проводился согласно методике Мошкалева и Халиуллина [1985], описанной далее в разделе 1.6.

Для проверки относительной стабильности блеска указанных стандартов были использованы 185 оценок разности их звездных величин, по-

лученных за 16 ночей в 1988–1990 гг. Статистические параметры, характеризующие эти разности во всех четырех спектральных полосах, приведены в табл. 1.2. Приводимые данные позволяют сделать вывод о том, что обе звезды в полосах *B* и *V* не имеют изменений блеска с амплитудой более чем $0^{\text{m}},0045$, т. е. практически являются постоянными. Предварительный вывод Ворошилова [1989] о переменности HD 221525 не подтвердился. К такому же выводу пришел и сам Ворошилов после серии наблюдений, проведенных им совместно с Метловым в мае 1989 г. [Ворошилов и Метлов, 1989].

Таблица 1.2.

Статистика наблюденных разностей звездных величин для стандартов HD 224687 и HD 221525. Данные основаны на 185 наблюдениях в течение 16 ночей.

HD 224687 и HD 221525	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>
Разности звездных величин	$0^{\text{m}},987$	$1^{\text{m}},032$	$1^{\text{m}},191$	$1^{\text{m}},327$
Среднеквадратичная ошибка среднего значения разности величин	$0^{\text{m}},0008$	$0^{\text{m}},0005$	$0^{\text{m}},0005$	$0^{\text{m}},0008$
Среднеквадратичная ошибка одного измерения разности величин	$0^{\text{m}},0109$	$0^{\text{m}},0064$	$0^{\text{m}},0065$	$0^{\text{m}},0114$

Как показала тщательная проверка, контрольные звезды HD 221142 и HD 221829 оказались переменными с малой амплитудой изменения блеска. HD221829 оказалась переменной типа ELL, а HD221142 — пульсирующей переменной типа δ Щита. Именно их переменность повлияла на опубликованные в статье Халиуллина Миронова и Мошкалева [1985] величины первичного стандарта HD 221525. Анализ переменности этих звезд дан в статье [Кусакин, Миронов, Мошкалев, 1991].

1.6. Учет спектрального пропускания атмосферы Земли.

Для обработки электрофотометрических наблюдений, выполненных с поверхности Земли, крайне важно точно учесть ослабление света в земной атмосфере. Это показал еще в 1930-х годах В.Б.Никонов [Никонов и Куликовский, 1939], указав, что легко можно достичь аппаратурной точности электрофотометров порядка $0^m,003$, в то время как ошибки выноса за атмосферу могут быть в 10–30 раз большими. Эта проблема становится особенно острой, когда речь идет о строго определенных фотометрических системах, таких как система *WBVR*, и о современных высокоточных методах регистрации световых потоков. Если случайная аппаратурная среднеквадратичная ошибка отдельного измерения с помощью фотоэлектрического фотометра с фотоумножителем составляет, как правило, немного тысячных долей звездной величины, то при выносе измерений за атмосферу ошибки редко бывают меньше, чем 1%, обычно составляют 2–3%, и нередко могут достигать 5–10%.

Мы проводили учет атмосферной экстинкции в разных спектральных полосах итерационным методом, разработанным Мошкалевым и Халиуллиным [1985].

Этот метод стал неотъемлемой частью определения системы *WBVR*. Метод позволяет оценить распределение энергии в спектре звезды $E(\lambda)$ и получить функцию спектрального пропускания земной атмосферы $p(\lambda)$ из самих многоцветных наблюдений. Рассмотрим кратко основные положения этого метода так, как они изложены в пособии [Миронов, 1997] и книге Миронова [2008].

Сначала для всех измерений в каждой полосе с номером i вычисляем предварительную величину выноса A'_i в соответствии с третьей

основной формулой гетерохромной фотометрии (Б8.3), которую теперь перепишем в виде

$$A'_i = -2,5 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R'(\lambda) p'[\lambda, M(z)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R'(\lambda) d\lambda}. \quad (1.4)$$

Сделаем необходимые замечания о функциях, входящих в эту формулу.

Функция $E(\lambda)$ представляет распределение энергии в спектре звезды на верхней границе земной атмосферы. Как правило, она нам неизвестна, тем не менее, её обязательно нужно оценить. В том случае, если для звезды известен спектральный тип, в качестве оценки $E(\lambda)$ следует принять нормальное распределение энергии $E_0(\lambda)$ для звезд такого типа. Следует, однако, принимать во внимание, что это распределение может быть искажено межзвездным покраснением. Если $\tau(\lambda)$ — закон межзвездного поглощения, то $E(\lambda) = E_0(\lambda) [\tau(\lambda)]^X$, где X — количество единиц межзвездного вещества. Во многих случаях находятся соображения, по которым можно оценить X . Если же нет никаких данных о типе звезды и поглощении света в данном направлении в Галактике, то нужно задать $E(\lambda)$ произвольно. Например, можно использовать распределение энергии для звезды спектрального класса F5 V, как это делалось при обработке данных Тянь-Шаньского каталога (см. раздел 1.7).

$R'(\lambda)$ — это функция мгновенной аппаратурной кривой реакции. Чем лучше мы знаем эту функцию для каждого момента времени, тем увереннее будут произведены все редукции.

Функция $p'[\lambda, M(z)]$ определяет спектральное пропускание атмосферы на зенитном расстоянии z . Это модельная функция, вычислен-

ная в соответствии с нашими представлениями о состоянии атмосферы в момент измерений.

Основой метода является алгоритм последовательных приближений и разделение функции спектрального пропускания атмосферы в зените $p_o[\lambda, M(z)=1]$ на две составляющие: основную (постоянную) и переменную. Такое разделение имеет не принципиальное, а практическое значение, поскольку решает оптимальным образом проблему начального приближения для быстрой сходимости итерационного процесса. Постоянная часть — это модельное приближение $p'_o[\lambda, M(z)=1]$. Переменная часть — это поправочная функция; обозначим её через $\delta p(\lambda)$. Итак,

$$p_o[\lambda, M(z)=1] = p'_o[\lambda, M(z)=1] \cdot \delta p(\lambda) \quad (1.5)$$

$$-2,5 \lg p_o[\lambda, M(z)=1] = \alpha_{const}(\lambda) + \alpha_{var}(\lambda) \quad (1.6)$$

В качестве постоянной части применяется функция длины волны, включающая все основные составляющие спектрального пропускания атмосферы: релеевское (молекулярное) рассеяние, рассеяние на аэрозолях, поглощение в теллурических полосах озона, кислорода, водяного пара и др. Постоянная часть вычисляется, исходя из выбранной модели атмосферы для заданной высоты над уровнем моря.

Разумеется, предвычисленная постоянная часть коэффициента экстинкции не является точным представлением реальной экстинкции в момент наблюдений. Она отличается от истинной функции $\alpha(\lambda)$ на величину $\alpha_{var}(\lambda)$. В функции $\alpha_{var}(\lambda)$ собраны все различия между модельной и реальной атмосферами: отличия реального релеевского рассеяния от модельного, отличия реальных мгновенных функций рассеяния на аэрозолях от предвычисленных, отличия, вызванные неправильным заданием общего количества озона, общего количества водяного пара, отличия высотных

распределений температуры и парциального давления газов от модельных, и пр. В эту же функцию входят неучтённые различия мгновенной и принятой кривых реакции инструментальной фотометрической системы. Однако, все эти отличия невелики. Их суммарное влияние можно представить простой эмпирической функцией длины волны: полиномом невысокой степени.

В практике обработки фотометрических измерений, выполнявшихся в Тянь-Шаньской обсерватории ГАИШ, в качестве эмпирической модели переменной составляющей использовалась формула $\alpha_{\text{var}}(\lambda) = x\lambda^{-n} + y$. Показатель степени при λ принимался постоянным. Для случая наблюдений на Тянь-Шане использовалось значение $n = 3$.

Пусть в начале наблюдений измерены два стандарта, находящиеся на различных зенитных расстояниях так, чтобы их атмосферные массы $M(z)$ заметно различались. Это экстинкционные стандарты. Поскольку это стандарты, нам известна истинная внеатмосферная разность их звездных величин в каждой из полос: $\Delta m_{1,2}^{\circ,i} = m_1^{\circ,i} - m_2^{\circ,i}$. Из наблюдений же можно получить податмосферную разность величин и вычислить по формуле (1.4) предварительные внеатмосферные величины этих стандартов с *пробными* значениями параметров x и y .

$$(m_j^{\circ,i})' = m_j^i - 2,5 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_j(\lambda) R_i'(\lambda) p_{\circ}[\lambda, M(z)] 10^{x\lambda^{-n}+y} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_j(\lambda) R_i'(\lambda) d\lambda}. \quad (1.7)$$

В выражении (1.7) i — номер фотометрической полосы, а j — номер стандарта. Пробные внеатмосферные величины везде обозначаем верхним штрихом.

Для всех полос используемой фотометрической системы можно составить уравнение типа (1.7). В случае системы WBVR каталога таких

полос было четыре, в общем случае у нас N фотометрических полос. Задача состоит в том, чтобы отыскать такие значения параметров x и y , чтобы различия между известными истинными внеатмосферными величинами стандартов и пробными внеатмосферными величинами стали минимальными. Следовательно, перед нами встаёт задача нахождения минимума некоторого функционала. Естественно записать такой функционал в виде:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N q_i \left\{ \left(m_1^{o,i} - m_2^{o,i} \right) - \left[\left(m_1^{o,i} \right)' - \left(m_2^{o,i} \right)' \right] \right\}^2. \quad (1.8)$$

Перед нами сумма квадратов разностей между истинными и пробными внеатмосферными разностями величин пары стандартов. q_i — веса наблюдений в разных полосах. Наилучшие значения параметров x и y можно найти одним из современных методов минимизации.

В ходе наблюдений кроме экстинкционных стандартов необходимо систематически измерять блеск по крайней мере одного контрольного стандарта (лучше если контрольных стандартов два или три). Между измерениями стандартов измеряются программные звезды. Первое измерение контрольных стандартов производилось непосредственно после измерения пары экстинкционных стандартов так, чтобы можно было считать, что эти измерения произведены при одинаковом состоянии атмосферы.

Все измерения контрольных стандартов выносим за атмосферу с величинами x и y , найденными на момент измерения экстинкционной пары. Очевидно, что с течением времени эти величины будут несколько изменяться. Такие изменения можно считать отражением изменяющейся атмосферной экстинкции. Поскольку селективная часть экстинкции, в основном, учтена в постоянной части $\alpha_{const}(\lambda)$ и найденном наклоне x переменной части $\alpha_{var}(\lambda)$, то все изменения можно отнести на счет вариаций

неселективного члена 10^y . Этот фактор, как не имеющий зависимости от длины волны, выходит из под знака интеграла и, в виде поправки равной минус $2,5y$, может быть прибавлен ко всем измерениям звезд, произведённым близко к моменту наблюдения контрольного стандарта. Понятно, что поправки минус $2,5y$, полученные в моменты разных измерений контрольного стандарта, могут быть проинтерполированы на моменты измерений программных звезд.

Для интервалов наблюдений с устойчивой прозрачностью параметры x и y можно оценивать также по неперенным программным звездам, которые измерялись более одного раза за интервал наблюдений. Пусть проведены измерения для k таких звезд с номерами j ($j = 1, 2, \dots, k$); каждая из них сначала измерялась в момент времени t_{j1} , а затем в момент t_{j2} , причем за время между этими измерениями воздушная масса звезды несколько изменилась. Воспользуемся тем, что величины неперенной звезды, вынесенные за атмосферу, должны быть одинаковы. В этом случае речь пойдет о минимизации следующего функционала:

$$\Psi(x, y) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^N q_i \left[m_j^{\circ'}(t_{j1}, x, y) - m_j^{\circ'}(t_{j2}, x, y) \right]^2. \quad (1.9)$$

Несмотря на то, что воздушная масса между двумя измерениями одной и той же программной звезды, как правило, изменяется мало, при большом количестве таких звезд удастся оценить параметры x и y .

Постоянная часть коэффициента экстинкции зависит, вообще говоря, от времени года, от координат обсерватории и, конечно, от высоты обсерватории над уровнем моря. Поэтому нельзя принять в качестве ее стандартную атмосферу из справочника. Нами была специально построена фотометрическая модель пропускания света земной атмосферой.

Понятно, что если мы почти точно «угадали» постоянную часть в формуле (1.5), то переменная часть будет мала и надежно определится из наблюдений для каждого момента времени. Итак, успех метода во многом зависит от того, насколько хорошо мы оцениваем постоянную часть.

Атмосферная экстинкция обусловлена двумя типами процессов: рассеянием (молекулярным и на частицах аэрозоля) и поглощением света газами, составляющими атмосферу Земли. Для спектральной области 3000-9000 Å, в которой располагаются полосы наиболее распространенных фотометрических систем, в том числе и системы *WBVR*, существенны релеевское и аэрозольное рассеяние и поглощение в линиях и полосах кислорода, озона, и водяного пара.

Нами был разработан алгоритм расчета спектральной функции пропускания атмосферы Земли [Миронов, Крылова, 1998]. Описание этого алгоритма, набор применявшихся формул и табличные данные приведены в Приложении «Д». Для реализации алгоритма была составлена компьютерная программа, вычисляющая функцию $p'_0[\lambda, M(z)]$ в спектральной области 300-900 нм. Эту функцию следует использовать как начальное приближение для метода Мошкалева-Халиуллина.

При вычислениях атмосфера разбивается на большое количество слоев по высоте. На основе введенных данных, характеризующих атмосферные условия в пункте и в момент наблюдений, строится модель атмосферы, и определяются ее параметры внутри каждого слоя. На основе этих параметров вычисляются величины ослабления света для различных длин волн.

Результаты расчетов по программе позволяют количественно оценить влияние изменений важнейших атмосферных параметров на зави-

симось пропускания от длины волны. При вычислениях по данной программе учитывается высота пункта наблюдений над уровнем моря.

В том случае, когда наблюдения производятся на пункте, расположенном в умеренных широтах северного полушария, программа позволяет оценить величину тонких эффектов в атмосферной экстинкции. Для этого в программу вводятся значения географической широты пункта, атмосферного давления и температуры воздуха в момент наблюдений. Кроме того, имеется возможность использовать конкретные (а при их отсутствии — среднестатистические) данные о содержании и высотном распределении атмосферных газов, оптически активных в области спектра 300–900 нм: озона, кислорода и водяного пара. Проведенные нами расчеты, часть из которых представлена в Приложении «А», показывают, что наиболее заметные эффекты могут встретиться при фотометрии экстремально красных звезд, а также звезд с уникальными распределениями энергии (Новых, катаклизмических и пр.).

Примеры результатов расчетов по нашей программе показаны на рис. 1.1.

Приведены кривые атмосферного пропускания для двух пунктов, расположенных на высоте 1400 м и 2760 м над уровнем моря. Первая высота соответствует обсерватории Астрофизического института им. В.Г.Фесенкова в Алма-Ате (АФИ), а вторая — это высота Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории ГАИШ. На двух левых панелях показаны кривые для зимнего сезона на разных воздушных массах, а на двух правых панелях — кривые для зимы и лета (только участок в красной и инфракрасной области). Хорошо видно, как меняется с воздушной массой и с сезоном глубина теллурических полос.

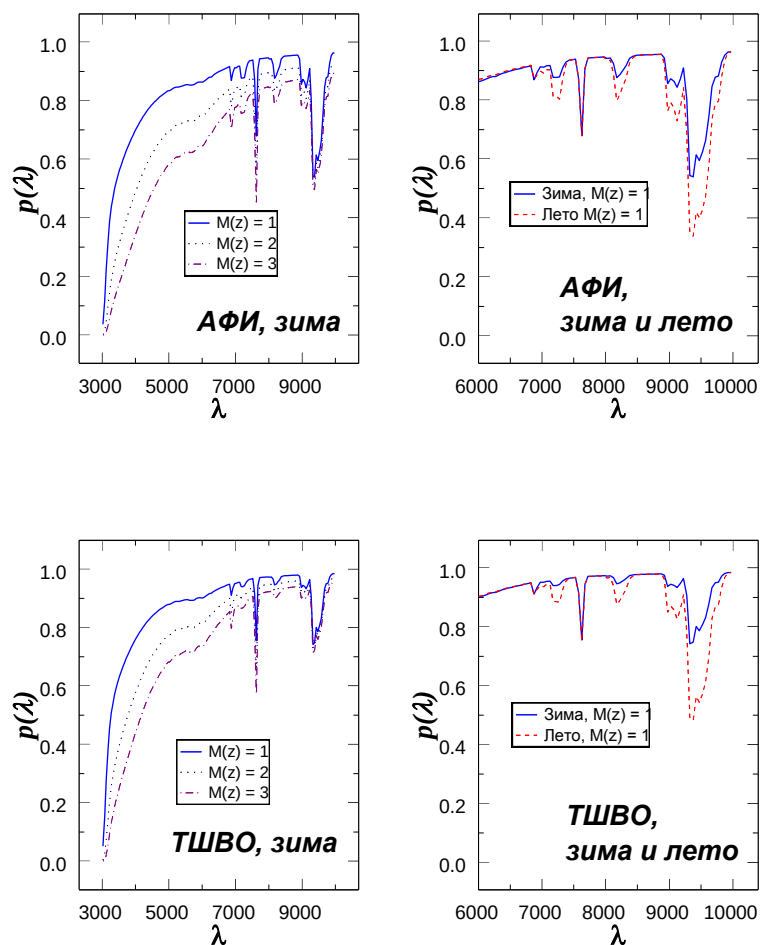


Рисунок 1.1. Расчетные кривые спектрального пропускания земной атмосферы для пунктов на высотах 1400 (АФИ) и 2760 (ТШВО) м над уровнем моря.

1.7. Каталог WBVR-величин ярких звезд северного неба.

Важнейшим достижением при работе в фотометрической системе WBVR явилось создание Каталога WBVR-величин ярких звезд северного неба (Тянь-Шаньского каталога) [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991].

К середине 1980-х годов в ГАИШ был накоплен значительный опыт проведения фотометрических наблюдений в системе WBVR их

обработки. За период с 1977 по 1984 год в полосах *WBVR* было измерено более 2000 звезд в диапазоне блеска $0^m - 8^m$, в том числе несколько переменных, см. например, работы, в которых являлся соавтором автор настоящей диссертации: Колыхалова, Миронов и Мошкалев [1978]; Корнилов, Миронов, Халиуллин и Черепашук [1979]; Кобелев, Миронов, Мошкалев и Фролов [1979]; Фролов и др., [Frolov, Pastukhova, Mironov, Moshkalev, 1980], Фролов и др. [Frolov, Kusakin, Mironov, Moshkalev, 1990]; Миронов и Пастухова, [1980]; Миронов, Мошкалев и Колыхалова [1981]; Миронов, Мошкалев и Шугаров, [1983a, 1983b], Миронов, Мошкалев, Трунковский и Черепашук, [1984, 1986]; Миронов и Старицын [1985]. Стало очевидно, что фотометрическая система, аппаратура, на которой она реализована, и методика обработки позволяют достичь высокой точности. Для звезд 7–8 величины при наблюдениях на 48-см телескопе с классическим одноканальным фотометром стандартная ошибка не превышала $0^m,01$.

Дефицит надежных многоцветных фотоэлектрических данных для практических астрономических работ побудил нас поставить в 1984 году задачу измерения блеска всех ярких звезд северного неба. Для проведения этого обзора была выбрана система *WBVR*.

В программу было включено около 15000 звезд, от наиболее ярких до объектов величины $7^m,2$ в полосе *V*, со склонениями между $+90$ и минус 14 (зона *BD -14* была включена полностью). Программные звезды были выбраны из исходного каталога, основанного на списке *CSI* (The catalog of stellar identification) [Оксенбайн и Бишофф, 1975].

Все наблюдения были выполнены на Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории ГАИШ на 48-см рефлекторе АЗТ-14.

Место обсерватории на Тянь-Шане отличается высокой прозрачностью атмосферы. Проведенное нами исследование [Миронов, Мошкалев, Халиуллин, Черепашук, 1978] показало, что среднегодовые буге-

ровские коэффициенты экстинкции в полосах W , B , V и R составляют, соответственно, $0^m,54$, $0^m,25$, $0^m,15$ и $0^m,09$. Вклад аэрозольного компонента в полное поглощение в хорошие ночи не превышает 1%, а атмосфера является стабильной. Для наблюдений использовались только ночи с полным отсутствием облачности, когда вариации прозрачности не превышали $0^m,01$ за 20 минут.

Для фотометрии мы использовали четырехканальный фотометр, [Корнилов, Крылов, 1990] производящий одновременные измерения в фотометрических полосах W , B , V и R и связанный с компьютером для измерения, записи и предварительного анализа данных. Основными новыми аппаратными средствами для реализации наблюдений послужили:

- переход от одноканального электрофотометра с последовательной сменой светофильтров к четырехканальному электрофотометру, позволяющему одновременно измерять блеск звезды в четырех спектральных диапазонах системы $WBVR$;
- автоматизация процесса фотоэлектрической многоцветной фотометрии на основе применения электронно-вычислительной техники для сбора, анализа, регистрации измеряемых данных и управления ходом наблюдений.

Главной особенностью применявшегося электрофотометра является деление светового пучка между каналами с помощью полупрозрачных алюминиевых пленок. Аппаратура для измерений, записи и предварительного анализа данных была основана на мини-компьютере «Электроника-60М» и составила автоматизированный фотометрический комплекс АФК-2 [Корнилов, Крутяков, Миронов, 1990; Миронов, 1997]. Используемое техническое и программное обеспечение помогло повысить эффективность фотоэлектрических наблюдений и уменьшить вероятность ошибочных измерений.

Наблюдения были начаты в январе 1985 года и завершены в октябре 1988 года. Фотометрические измерения всех программных звезд были выполнены в течение 360 ночей, полное время наблюдений составило 2400 часов. Было выполнено около 57000 независимых измерений программных звезд и более 13000 измерений звезд-стандартов. За период наблюдений была получена *WBVR* фотометрия 13560 объектов (звезд и кратных систем). Результаты были опубликованы в виде Каталога *WBVR*-величин ярких звезд северного неба [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991; Черепашук, Халиуллин, Корнилов, Миронов, 1994; Корнилов, Миронов, Захаров, 1996].

Как правило, для каждой программной звезды были получены четыре измерения: два измерения с интервалом от 15 до 20 минут в одну ночь и два таких же других измерения в другую ночь и другой сезон. Такой способ позволял контролировать как стабильность атмосферной экстинкции во временной шкале порядка 10 минут, так и стабильность фотометрической системы за весь период наблюдений.

Обычно в течение 15 минут вместе с программными звездами наблюдались две или три звезды-стандарта. Пары стандартов на одинаковых высотах также наблюдались более или менее периодически. Чтобы получить параметры атмосферной экстинкции, два или три раза в ночь наблюдались пары экстинкционных звезд-стандартов с разницей воздушных масс около 0,6.

На четырех панелях рис. 1.2 сплошной линией показаны функции отклика для кривых реакции стандартной Тянь-Шаньской системы *WBVR* [Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985], а длинными штрихами их аппаратурная реализация [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991] в комплексе АФК-2 (вариант каталога). Кроме этого на панели **а**) пунктиром показана полоса реакции системы *W* как она была рекомендована в монографии Страйжиса [1977].

Кривые реакции определяются, наряду с пропусканием светофильтров и спектральной чувствительностью используемых ФЭУ-79, пропусканием светоделительного блока прибора. Они были определены как произведение пропускания светофильтров, промеренных на лабораторном спектрофотометре “Specord-40M” и спектральных кривых чувствительности фотометра, (без светофильтров) измеренных с использова-

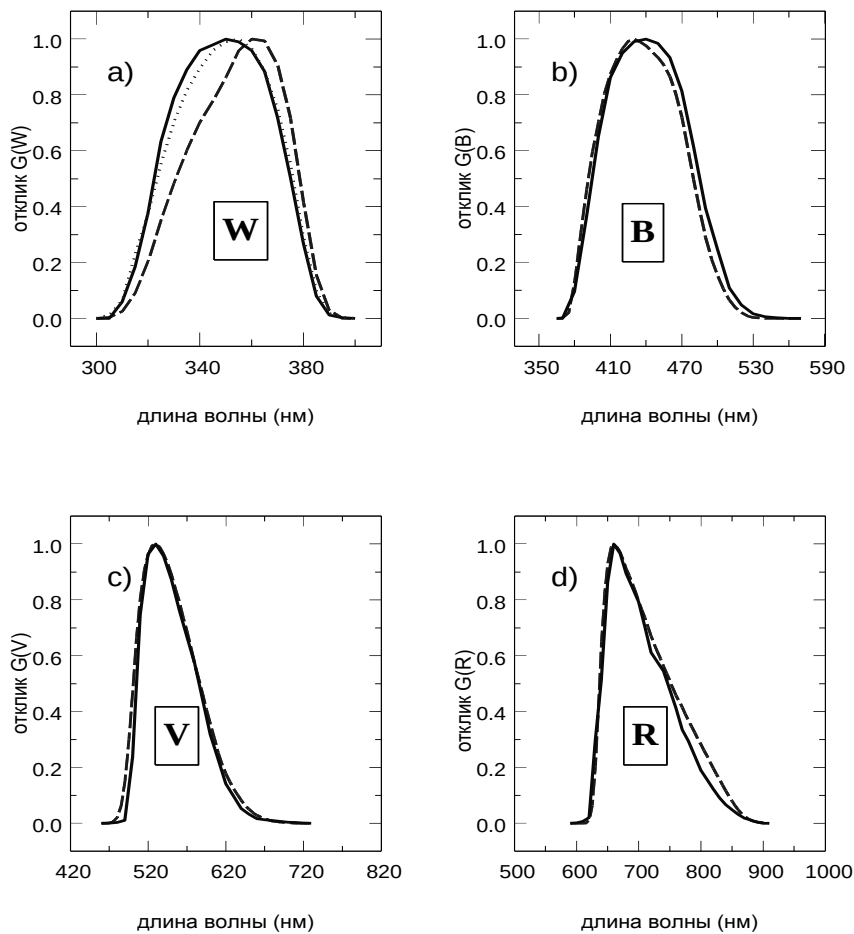


Рисунок 1.2. Кривые реакции двух реализаций системы WBVR.

нием монохроматора МДР-23, прокалиброванного по пироэлектрическому радиометру PR-200.

На рис.1.3. кривые реакции системы $WBVR$ в варианте каталога показаны совместно с кривыми реакции системы $UBV(R_c)$, как они были восстановлены в работе Бесселля [1990].

Видно, что во всех трех реализациях полосы системы V практиче-

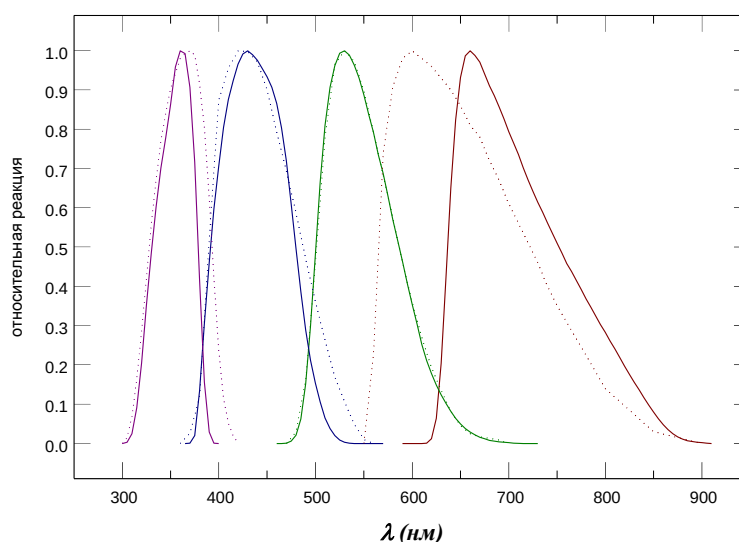


Рисунок 1.3. Нормализованные кривые реакции полос Тянь-Шаньского (АФК-2) варианта системы $WBVR$ (сплошная линия) и полос $UBVR_c$, восстановленных Бесселлем (пунктир).

ски совпадают. Полосы B и R в стандартном варианте системы $WBVR$ и в варианте АФК-2 очень близки друг к другу. Стандартная реализация Тянь-Шаньской полосы W очень близка к варианту Страйжиса, а вот вариант АФК-2 несколько отличается от них. Здесь максимум полосы сдвинут в длинноволновую сторону примерно на $100 \text{ \AA}$, однако же без того, чтобы длинноволновая граница заходила в область бальмеровского скачка. Очевидны, также отличия полос W от U и Тянь-Шаньского B от B Джонсона. Особенно сильно различаются полосы ' R_c ' (полоса Кузинса) и ' R ' в системе $WBVR$.

Данные о кривых реакции в варианте АФК-2 (в варианте каталога) приведены в таблице Г1b в Приложении «Г».

Одновременно с наблюдениями программных звезд была создана новая сеть звезд-стандартов. Чтобы определить величины 228 стандартных звезд, было использовано более 13000 измерений. Впоследствии часть звезд была по разным причинам исключена из списка стандартов

В отличие от стандартной системы *WBVR*, где нуль-пункт аксиоматически устанавливался по звезде HD 221525, для установки нуль-пункта величин *V* в Тянь-Шаньском каталоге была использована звезда HD 5015 (F8 V); для нее было принято $V = 4^{\text{m}},797$, как и в нашей статье [Халиуллин, Миронов, Мошкалев, 1985]. Для установки нуль-пункта показателей цвета и, следовательно, величин *W*, *B* и *R* звезды HD 5015, были использованы 14 звезд типа A0 V: средний колор-индекс для них был принят равным нулю. Величины стандартов и оценки их ошибок выводились одновременно. Около 50% из 192 звезд-стандартов имеют среднеквадратические ошибки величины *V* менее чем $0^{\text{m}},0016$, 90% – менее чем $0^{\text{m}},0023$. Величины стандартов в версии каталога (АФК-2) приведены в таблице Г2-б в Приложении «Г». Для справки в этой таблице даны также величины H_p , B_T и V_T , полученные в эксперименте Hipparcos.

Для редукиции величин за атмосферу использовался метод Мошкалева-Халиуллина [1985].

В процессе обработки данных выяснилось, что за период наблюдений происходили некоторые изменения фотометрической системы. Эти изменения имели особенное влияние на величины *W* и *B* для красных звезд. Наиболее вероятное объяснение этому эффекту — температурный сдвиг кривых реакции. Поскольку большинство звезд были измерены в разные сезоны при разных внешних температурах, этот эффект оказалось возможным оценить.

Кроме того, был обнаружен дополнительный эффект: сдвиг кривых реакции *W* и *B* со временем. По-видимому, эти сдвиги объясняются

изменениями спектральных свойств полупрозрачных алюминиевых слоев и оптического клея в светоделителе фотометра.

Все данные были редуцированы к фиксированному периоду (сентябрь 1987 года) и к средней температуре наблюдательной ночи (-4°C).

Среднеквадратичные ошибки величин были вычислены для всех звезд, за исключением кратных и переменных. Ошибки и коэффициенты корреляции для различных групп звезд показаны в таблицах 1.3а и 1.3б. Заметная корреляция между ошибками для величин W , B , V и R является эффектом одновременного изменения прозрачности атмосферы в четырех спектральных полосах. Эта корреляция уменьшает ошибки показателей цвета.

Исследование полноты каталога провели Корнилов и Семенцов [1992]. Они показали, что каталог содержит более чем 95% звезд ярче $V = 7^{\text{m}},2$.

Также как и стандартный вариант, каталожный вариант системы $WBVR$ основывался на аксиоматическом задании кривых реакции (в качестве которых были приняты инструментальные кривые фотометра АФК-2 по состоянию на сентябрь 1987 г.), и априорных величинах звезды HD 5015. Методы наблюдений и обработки были едиными для всех ночей. Таким образом, основные метрологические принципы были соблюдены. Уравнение редукции от величины V и показателей цвета в стандартном варианте системы $WBVR$ к величинам и показателям цвета в варианте каталога приведены в таблице В1 и на рис. В1 в приложении «В».

К вопросу о точности полученных звездных величин мы еще вернемся в Главе 3. Здесь укажем только, что данные Тянь-Шаньского каталога были использованы при разработке методов отделения галактических звезд от внегалактических квазизвездных источников создателями цифрового обзора SLOAN [Ньюберг и Янни, 1997, 1998], при этом

подчеркивалось, что именно высокая точность данных этого каталога позволила надежно протестировать применяемые алгоритмы.

Таблица 1.3а.
Среднеквадратические ошибки σ и коэффициенты корреляции ρ в полосах *WBVR* для различных групп звезд

Группа	σ_W mag	σ_B mag	σ_V mag	σ_R mag	ρ_{WB}	ρ_{BV}	ρ_{VR}
Ярче 5^m	0,008	0,006	0,006	0,006	0,33	0,57	0,52
$5^m - 6^m,5$	0,009	0,006	0,006	0,006	0,31	0,45	0,40
Слабее $6^m,5$	0,010	0,007	0,007	0,008	0,29	0,38	0,29
Все звезды	0,010	0,007	0,006	0,007	0,30	0,41	0,34

Таблица 1.3b.
Среднеквадратические ошибки σ и коэффициенты корреляции ρ в полосах *WBVR* как функция показателя цвета $B - R$

$B - R$	σ_W mag	σ_B mag	σ_V mag	σ_R mag	ρ_{WB}	ρ_{BV}	ρ_{VR}
-0,25	0,008	0,006	0,006	0,008	0,32	0,47	0,32
+0,25	0,008	0,006	0,007	0,008	0,39	0,44	0,29
+0,75	0,009	0,006	0,006	0,008	0,41	0,45	0,29
+1,25	0,010	0,006	0,007	0,008	0,41	0,43	0,34
+1,75	0,011	0,007	0,006	0,007	0,21	0,40	0,35
+2,25	0,014	0,008	0,006	0,006	0,10	0,32	0,36
+2,75	0,019	0,008	0,006	0,006	0,07	0,34	0,44
+3,25	0,026	0,009	0,008	0,007	0,18	0,30	0,53

Каталог *WBVR* величин в электронном виде доступен в сети ИНТЕРНЕТ на сайте ГАИШ по адресу <http://lnfm1.sai.msu.ru/lnfm/>.

В ресурсе GCPD: General Catalogue of Photometric Data по адресу <http://obswww.unige.ch/gcpd/> можно затребовать и получить величины звезд в системе *WBVR* из нашего каталога.

Выводы по Главе 1.

При построении новой фотометрической системы *WBVR* впервые в практике астрофотометрии были учтены требования, предъявляемые к измерениям обычными правилами метрологии. Энергетические потоки от звезды – первичного стандарта, приведенные к аксиоматически заданным кривым реакции и нуль-пунктам служили эталонами, с которыми в конечном итоге сравнивались результаты измерений. Средства измерений, т.е. оптические, механические, электрические и электронные узлы приемной аппаратуры были тщательно изучены. Методы измерений и их обработки не изменялись на протяжении всего периода измерений и были надлежащим образом описаны. Особое внимание было уделено методикам учета атмосферной экстинкции и редуций к единым стандартным кривым реакции. Эти меры позволили точно сравнивать результаты измерений, произведенных в разные сезоны, при разном состоянии земной атмосферы и при изменениях чувствительности аппаратуры. В результате удалось создать беспрецедентный по точности четырехцветный фотометрический каталог.

Глава 2.

Фотометрия Солнца и солнечных аналогов.

2.1. Показатели цвета Солнца в системе *WBVR*.

2.1.1. Проблематика задачи.

Знание различных характеристик Солнца как звезды, в первую очередь его показателей цвета, необходимо для разных целей. Это и уточнение положения Солнца на диаграмме Герцшпрунга-Рессела и двухцветных диаграммах, и уточнение его спектрального подкласса, и его эволюционный статус, и, наконец, исходные данные для проблемы SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence). Кроме того, Солнце — один из важнейших фотометрических стандартов на небе.

Неудивительно, что было сделано много попыток определения показателей цвета и звездной величины Солнца; применялись как прямые фотометрические, так и косвенные методы. Тем не менее, итоги этих работ представлялись нам недостаточно удовлетворительными.

Во-первых, результаты, полученные разными авторами, показывали разброс, заметно выходящий за пределы точности фотоэлектрической фотометрии звезд. Так, значения $(B - V)$ по разным определениям заключены в пределах от $0^{\text{m}},63$ до $0^{\text{m}},68$, а $(U - B)$ — в пределах от $0^{\text{m}},14$ до $0^{\text{m}},20$.

Во-вторых, было ясно, что неопределенности кривой реакции полюсы U и процедур редукций фотометрической системы UBV , о которых

говорилось в первой главе, не позволяют корректно сравнить данные для Солнца и звезд.

В третьих, в ряде работ, в частности в статье Харитонов, Глушневой и Князевой [1994], указывалось на несоответствие между результатами определений показателей цвета Солнца и его спектральным подклассом. В системе МК Солнце является стандартом спектрального подкласса G2 V. Средние показатели цвета для выборки звезд этого подкласса из Каталога ярких звезд [Хоффлейт и Уоррен, 1991] $\overline{B-V} = 0^m,63$, а $\overline{U-B} = 0^m,09$. Между тем по наблюдениям Галлуе [1964] показатели цвета Солнца равны $B-V = 0^m,68$ и $U-B = 0^m,15$, а по наблюдениям Тьюга и Шмидт-Калера [1982] — соответственно, $0^m,68$ и $0^m,18$. Методически работы этих авторов представляются наиболее надежными, но, как указывается в вышеупомянутой статье Харитонов, Глушневой и Князевой. [1994], с такими показателями цвета Солнце оказывается на самом краю области двухцветной диаграммы ($U-B$, $B-V$), образованной звездами G2 V, и скорее соответствует средним характеристикам звезд G4 V или даже G5 V. Эксцентрично расположено Солнце и на диаграмме ($W-B$, $B-V$) фотометрической системы WBVR, когда сравниваются синтетические показатели цвета, вычисляемые из наиболее надежных данных о распределении энергии в спектре Солнца, и наблюдаемые значения показателей цвета ($W-B$) и ($B-V$) ярких звезд, надежно классифицированных как G2 V.

Фотометрические характеристики Солнца часто сравнивают с характеристиками звезд рассеянного скопления Гиады. Гиады — ближайшее к Солнцу звездное скопление, расстояние до него составляет около 45 пк при радиусе скопления около 8 пк [Хэнсон, 1975]. Поэтому среди звезд земного неба должно быть немало членов короны Гиад. Низкотемпературный конец главной последовательности Гиад для $(B-V) > 0^m,55$,

звезды в котором за время жизни скопления (около 700 миллионов лет) еще не успели заметно проэволюционировать, традиционно является основой для построения начальной главной последовательности. Известно [Холопов, 1981], что Гиады (как и Ясли) являются скоплением с максимальным для окрестностей Солнца содержанием тяжелых элементов. Металличность звезд Гиад относительно Солнца составляет $[m/H] = +0,2$. В показателе цвета $(U - B)$ поправка, связанная с различной величиной покровного эффекта, для звезд Гиад относительно Солнца, составляет $\delta(U - B) = 0^m,44$.

Различные звезды — члены Гиад были измерены в системе UBV многими авторами. Однако внимательное рассмотрение этих измерений показывает, что между различными рядами существуют заметные расхождения. В разделе 1.1 первой главы мы уже указывали на существенные систематические различия между фотометрическими измерениями звезд Гиад, выполненных Джонсоном и Нуклесом [1955] и результатами, полученными Апгреном и Вайсом [1977].

Все эти обстоятельства побудили нас провести работу по определению новых показателей цвета звезд Гиад и Солнца из непосредственных наблюдений, используя единую аппаратуру и принимая различные меры для повышения точности [Миронов, Харитонов, 1998а; Миронов, Мошкалев, Харитонов, 1998].

2.1.2. Аппаратура и методика для наблюдений Солнца

Наблюдения проводились в Тянь-Шаньской высокогорной обсерватории в той же фотометрической системе, на таком же телескопе и с тем же экземпляром фотометра [Корнилов и Крылов, 1990], с которым были выполнены работы по созданию Тянь-Шаньского каталога. Напомним, что электрофотометр системы Корнилова и Крылова позволяет

регистрировать сигнал строго одновременно в четырех спектральных полосах W , B , V и R .

При наблюдениях Солнца главная трудность состоит в необходимости очень большого ослабления солнечного излучения, чтобы его можно было измерять на звездном фотометре. Ослабление должно быть неселективным или, в крайнем случае, с известной зависимостью от длины волны. Такого ослабления можно достигнуть, наблюдая в телескоп небольшой неселективно рассеивающий экран, отнесенный достаточно далеко от телескопа.

После целого ряда проб была изготовлена установка, схематически изображенная на рисунке 2.1. Экран, представляющий собой порошок сернокислого бария, запрессованный в круглую чашечку диаметром 27 мм, помещался внутри трубообразной конструкции длиной около

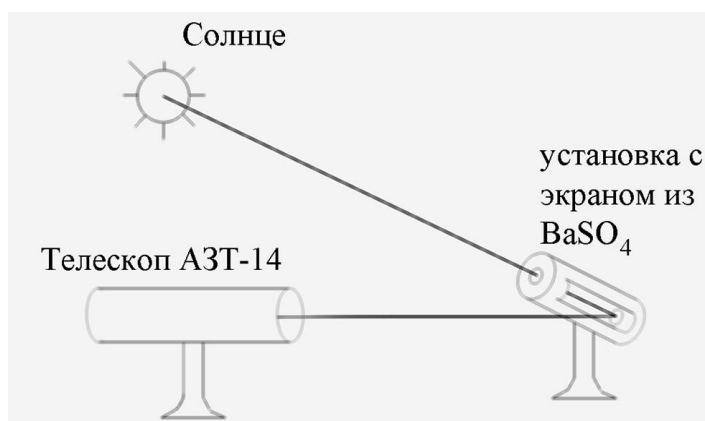


Рис. 2.1. Схема измерений показателей цвета Солнца

135 см. Стенки конструкции были выполнены из черной светонепроницаемой ворсистой ткани, задний торец был заглушен полностью, а в торце, обращенном к Солнцу устанавливалось входное отверстие, через которое Солнце освеща-

ло экран. В боковой стенке конструкции имелась щель шириной немного больше диаметра экрана. Через нее производились наблюдения экрана в телескоп с фотометром. Вся конструкция была укреплена на параллактическом штативе с часовым ведением, так что экран всегда был перпендикулярен солнечным лучам. Конструкцию было можно поворачивать вокруг продольной оси. Такой поворот был необходим, чтобы

экран был виден в телескоп через щель при различных азимутах и высотах Солнца. Штатив был отнесен на 200 м от телескопа. Телескоп фокусировался на экран, изображение которого в фокальной плоскости имело линейный размер около 1 мм и полностью проваливалось во входную диафрагму фотометра. Угол между нормалью к экрану и направлением на телескоп легко вычисляется из соответствующего сферического треугольника.

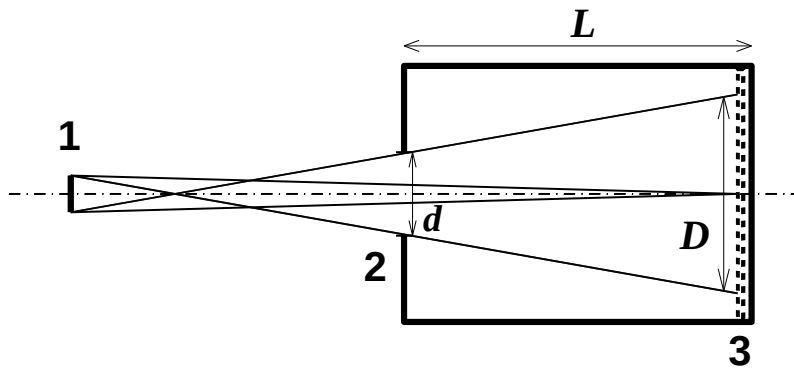


Рис 2.2. Ход лучей при измерениях светового потока от Солнца:
1 — видимый диск Солнца, 2 — входная диафрагма, 3 — экран из порошка сернокислого бария.

Рассмотрим ход лучей в конструкции (рисунок 2.2). Засветка от Солнца на экране имела размер $D = 2\rho_{\odot}L + d$, где $\rho_{\odot}$ — угловой радиус Солнца, L — расстояние от входной диафрагмы до экрана и d — диаметр диафрагмы. В нашем случае $L = 1,2$ м, а диафрагмы были сменные, диаметром в 12 и 9 мм, т.е. диаметр засветки D составлял либо 23, либо 20 мм. Экран, имевший размер 27 мм, полностью перехватывал пучок прямых солнечных лучей, прошедших через диафрагму. В то же время лучи от околосолнечного ореола проходили мимо экрана и попадали на стенки конструкции из черной ткани. Исключение составляла узкая краевая зона экрана. В случае 12-миллиметровой диафрагмы ширина этого кольца на экране была около 2 мм или, в переносе на небо, 5,7 уг-

ловой минуты дуги от края солнечного диска, а в случае 9-миллиметровой диафрагмы, соответственно, 3,5 мм и 10 минут на небе.

Можно оценить помеху, вносимую этими кольцевыми зонами ореола. Они имеют площади, соответственно, 675 и 1320 квадратных минут. По данным Линке и Ульмица (цитируется по К.Я. Кондратьеву, 1954), при средних атмосферных условиях поток от кольцевой зоны вокруг Солнца между расстояниями в 27,5 минуты и 4 градусами от центра диска составляет 0,99 % от прямого солнечного потока. Площадь кольцевой зоны в измерениях Линке и Ульмица составляла более 180000 квадратных минут. Ясно, что помехами от кольцевых зон в нашем случае вполне можно пренебречь, даже при условии сильного возрастания яркости ореола в непосредственной близости к краю диска.

Рассмотрим выражение для светового потока $F(\lambda)$, входящего в телескоп и вызывающего отсчет фотометра. Для простоты отвлечемся от кривых реакции фотометра и рассмотрим монохроматические лучи

$$F(\lambda) = \sigma E(\lambda) \left(\frac{\Delta}{\Delta_{cp}} \right)^2 \times [P(\lambda)]^M r(\lambda) \cos \varphi P_{\text{зоп}}(\lambda) \left(\frac{S_{\text{мел}}}{l} \right) \quad (2.1)$$

Здесь σ — площадь диафрагмы, через которую освещается экран; $E(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической освещенности от Солнца на среднем расстоянии Земли от него вне земной атмосферы; Δ и Δ_{cp} , соответственно, приходящиеся на момент наблюдений и среднее расстояния Земли от Солнца; $P(\lambda)$ — коэффициент прозрачности земной атмосферы в месте наблюдения; M — воздушная масса Солнца в момент наблюдений.

Таким образом, первые четыре сомножителя выражают поток, вошедший в нашу конструкцию и перехваченный экраном. Далее, $r(\lambda)$ — альбеда экрана. Известно, что экраны из прессованного порошка сернокислого бария рассеивают падающий на него свет по закону Ламбер-

та, а их отражательная способность в спектральной области 300–1300 нм мало меняется с длиной волны и заключена в пределах от 0,980 до 0,999.

Угол φ образован направлениями от экрана на Солнце и от экрана на телескоп, он легко вычисляется из соответствующего сферического треугольника. Сомножитель $P_{гор}(\lambda)$ представляет собой прозрачность воздуха на горизонтальном пути между экраном и телескопом, и, наконец, последний сомножитель $S_{тел}/l^2$ — это телесный угол с вершиной на экране, стягиваемый телескопом.

Из формулы (2.1) следует, что уравнивание световых потоков, входящих в телескоп от звезды и от Солнца, достигается, в основном, благодаря следующим обстоятельствам. Первое: малый телесный угол $S_{тел}/l^2$, внутри которого поток от экрана попадает в телескоп. При незадиафрагмированном зеркале АЗТ-14 обеспечивается ослабление более чем в 200000 раз, т.е. на 13 звездных величин. Второе: экран освещается через диафрагму диаметром 12 или 9 мм. Сравнительно с полным отверстием телескопа это дает для уравнивания еще 8 звездных величин. Наконец, мы ослабляем солнечный поток еще на несколько величин, диафрагмируя телескоп при наблюдениях экрана. В результате в фотометр попадает поток, примерно соответствующий звезде нулевой или минус первой величины, т.е. лежащий на границе рабочего диапазона звездного фотометра.

Сомножитель $P_{гор}(\lambda)$ — прозрачность воздуха на горизонтальном пути в 200 м между экраном и телескопом, мало отличается от единицы и может быть легко определен теоретически. Соответствующую оптическую толщину можно представить как сумму релеевской и аэрозольной составляющих. Релеевский компонент вычисляется, т.к. известны концентрация молекул для любого уровня в стандартной модели атмосферы и сечение рассеяния (Батес, 1984; Николе, 1984). Аэрозольный компонент берется

как $\frac{200}{1848}$ долей аэрозольной вертикальной толщи, которая легко находится из наблюдаемого коэффициента прозрачности; 1848 — это высота однородной аэрозольной атмосферы (в м) для места наблюдения (2750 м над уровнем моря). Вычисления были проведены для монохроматических лучей, а потом, для случая широкополосных наблюдений, было взято среднее взвешенное с привлечением кривых реакции фотометрических полос и распределения энергии падающего излучения.

Для оптических толщ в полосах *WBVR* были получены следующие значения:

Полоса	<i>W</i>	<i>B</i>	<i>V</i>	<i>R</i>
Релеевская	0,0102	0,0043	0,0018	0,0008
Аэрозольная	0,0103	0,0078	0,0073	0,0062
Полная	0,0205	0,0121	0,0091	0,0070

Вычисления были сделаны для средних условий прозрачности, но, поскольку оптические толщи очень малы, отличие реальных условий от средних не имеет значения.

Для уменьшения количества рассеянного света экран был помещен в установку, напоминающую модель абсолютно черного тела. Но, несмотря на это, в различных сеансах количество рассеянного света составляло от 10 до 50 % от полного сигнала. При измерениях на экран попадало значительное количество рассеянного света от грунта и окружающих предметов, проходившего через боковую щель конструкции. Оно зависело от расположения щели трубообразной конструкции относительно деталей окружающего рельефа, от отражающей способности рельефа и от высоты Солнца над горизонтом. Отсчетами на рассеянный свет (при закрытой передней диафрагме трубообразной конструкции) сопровождался каждый отсчет на освещенный экран. Очень важно, что-

бы изображение экрана в фокальной плоскости телескопа было бы спокойным и можно было использовать диафрагму фотометра минимально возможного диаметра. Спокойствие изображения сохраняется только в течение ограниченного времени после восхода Солнца — не более двух часов. При этом воздушная масса изменяется от значения 5,5 при восходе до 2,0 при окончании сеанса.

Для измерения спектральных коэффициентов пропускания оптики всего тракта совместно с кривыми реакции фотоумножителей, для измерения коэффициентов отражения от рассеивающего экрана из BaSO_4 и для исследования изменений этих коэффициентов со временем была собрана специальная установка. Монохроматический световой поток известной длины волны от точечного источника направлялся в телескоп. Этот поток измерялся квазиодновременно фотометром и неселективным пироэлектрическим приемником. В дальнейшем обработка измерений звезд и Солнца проводилась с применением полученных "мгновенных" кривых реакции.

2.1.3. Учет влияния параметров аппаратуры при высокоточной фотометрии.

Фотометрические измерения такого объекта, как Солнце, посредством звездного электрофотометра, безусловно, потребовали разработки и изготовления ряда устройств для контроля хода измерений и определения параметров, необходимых для обработки результатов.

2.1.3.1. Контроль стабильности измерительного тракта.

Поскольку между концом измерений звезд и восходом Солнца проходило около двух часов, нужно было контролировать и, при необходимости, учитывать изменения чувствительности во всех четырех каналах фотометра.

При фотоэлектрической фотометрии отсчеты на постоянный световой поток, сделанные в разные моменты времени, различаются из-за малых изменений выходного напряжения высоковольтных и низковольтных источников питания, изменений температуры фотокатодов, «плавления» коэффициента умножения ФЭУ и коэффициентов импульсных усилителей, непостоянства уровня дискриминации и других причин. Чтобы привести полученные отсчеты к единой чувствительности аппаратуры нужно измерять световой поток от эталонного источника излучения. В практике наблюдений в СССР в 1970-80-е годы для контроля стабильности чаще всего применялись радиолюминесцентные источники (РЛИ). В классической схеме одноканального фотометра свет от РЛИ направляется на фотокатод ФЭУ путем механического ввода на оптическую ось фотометра зеркала или призмы полного внутреннего отражения. Однако из-за наличия люфтов и гнуптия различных частей фотометра на практике трудно разработать простую и компактную оптико-механическую конструкцию, которая обеспечивала бы при вводе перебрасывающей оптики проекцию света РЛИ строго в одно и то же место фотокатода. Опыт фотометристов ГАИШ показал, что ошибки установки перебрасывающей призмы вызывают изменения отсчета такого же порядка, что и изменения чувствительности аппаратуры, или даже превосходят их. Поэтому в исходном варианте фотометра конструкции Корнилова и Крылова [1990] эталонный источник даже не был предусмотрен.

Кроме РЛИ в практике фотоэлектрической фотометрии могут применяться светодиоды. Возможность этого была показана рядом исследователей еще в 1980-е годы (см., например Сухов и Чайчук, [1984]). В отличие от РЛИ, дающих малые потоки, светодиоды значительно ярче. Поэтому можно измерять рассеянный свет, создаваемый ими внутри корпуса фотометра. В этом случае светодиод неподвижен относительно

фотокатода, и не используются никакие движущиеся оптические элементы. Рассеянный свет всегда одинаково освещает фотокатод, а включение и выключение светодиода производится электрическим путем. Стабильный световой режим устанавливается не более чем через 1–2 секунды. Такая модернизация фотометра Корнилова-Крылова была произведена диссертантом. Внутри корпуса фотометра был установлен светодиод АЛ-102, питаемый от стабилизатора тока. Рабочий ток светодиода составлял 10 мА. На время выключения светодиода под корпусом фотометра источник тока переключался на эквивалентную нагрузку. Яркость светодиода зависит в основном от двух параметров: силы тока и температуры. В нашей установке ток стабилизировался и контролировался с точностью до 0,01 мА. Стабилизация температуры не осуществлялась, а производилось регулярное измерение температуры светодиода с помощью терморезистора. Для этого светодиод и терморезистор были заключены в общий массивный алюминиевый корпус. Измерение сопротивления терморезистора производилось с точностью около 1%. Для области рабочих температур (в среднем около -5°C) это соответствует изменению температуры на $0,05^{\circ}\text{C}$. На рис. 2.3 показана сводная экспериментальная зависимость отсчетов фотометра в канале *B* на эталонный светодиод от сопротивления терморезистора, полученная в четыре даты: 21, 22, 24 и 25 февраля 1995 г.

Остаточные отклонения, обусловленные всеми вышеперечисленными источниками ошибок, в том числе и вариациями светового потока от светодиода, не превышают 0,5% и характеризуются среднеквадратичным отклонением $0^{\text{m}},0036$ звездной величины.

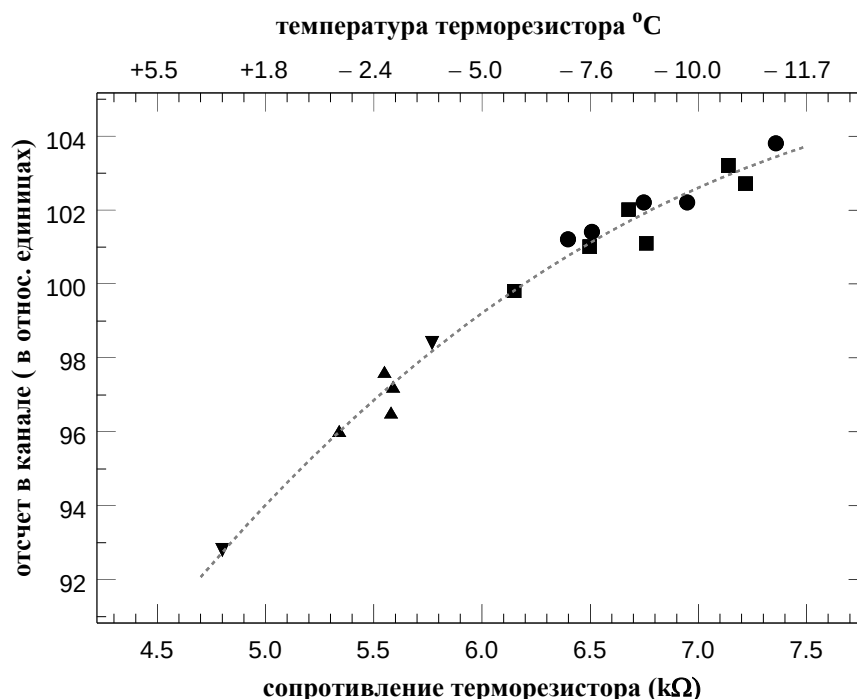


Рисунок 2.3. Изменение отсчетов фотометра в канале В на эталонный светодиод в зависимости от температуры. Различными значками на графике показаны данные, полученные в разные даты:
 ● – 21.02.95; ■ – 22.02.95; ▲ – 24.02.95; ▼ – 25.02.95.

2.1.3.2. Аппаратурные азимутальные эффекты.

Хорошо известно, что магнитное поле Земли, намагничивая колонну и другие ферромагнитные детали телескопа, влияет на траектории электронов внутри ФЭУ и, как следствие, на величину фототока. Поэтому при конструировании фотометров фотоумножители помещают в стаканы из металлов, экранирующие магнитное поле. Тем не менее, в процессе наблюдений многие исследователи замечают, что сигнал зависит от положения телескопа. Обычным способом проверки является наведение на одну и ту же звезду в двух разных перекладках телескопа. При этом нередко отсчеты отличаются на несколько процентов.

При наблюдениях в узкой области неба аппаратурные азимутальные эффекты влияют на отсчеты от звезд практически одинаково. Одна-

ко при определении атмосферной экстинкции или привязки к далекому стандарту их учет становится совершенно необходимым. К сожалению, подробные исследования этих эффектов, как правило, не проводятся.

В нашем случае, когда в течение наблюдательной ночи проводились измерения нескольких десятков опорных стандартов в различных часовых углах, а затем, с восходом Солнца измерялся поток, отраженный от экрана, находящегося вблизи математического горизонта, необходимо было точно измерить влияние аппаратурных азимутальных эффектов [Миронов, Мошкалев, Харитонов, Колыхалова, 1995].

Созданный нами светодиодный источник позволил тщательно изучить зависимость регистрируемого сигнала от положения фотометра. На передние торцы фотоумножителей были наклеены диафрагмы из черной бумаги, чтобы рассеянный внутри корпуса фотометра свет попадал только в те области, где линзы Фабри строят изображения входного зрачка. Диафрагмы были закрыты матовыми экранами.

Телескоп помещался в различные положения по склонению и по часовому углу и регистрировался сигнал от эталонного источника. Периодически телескоп возвращался в контрольное положение. В результате была получена карта поправок за азимутальный аппаратурный эффект. В качестве иллюстрации на рис. 2.4 для некоторых значений склонения показаны зависимости измеренного сигнала от часового угла в разных перекладках телескопа. Видно, что зависимости имеют синусоидальный характер. Амплитуда синусоид при одном и том же склонении достигает 4%, а средние линии зависимостей для разных склонений могут различаться на 2%. Характер и амплитуда эффекта различны для каждого канала. Они изменяются, также, при повороте фотометра вокруг своей оси на позиционном подшипнике.

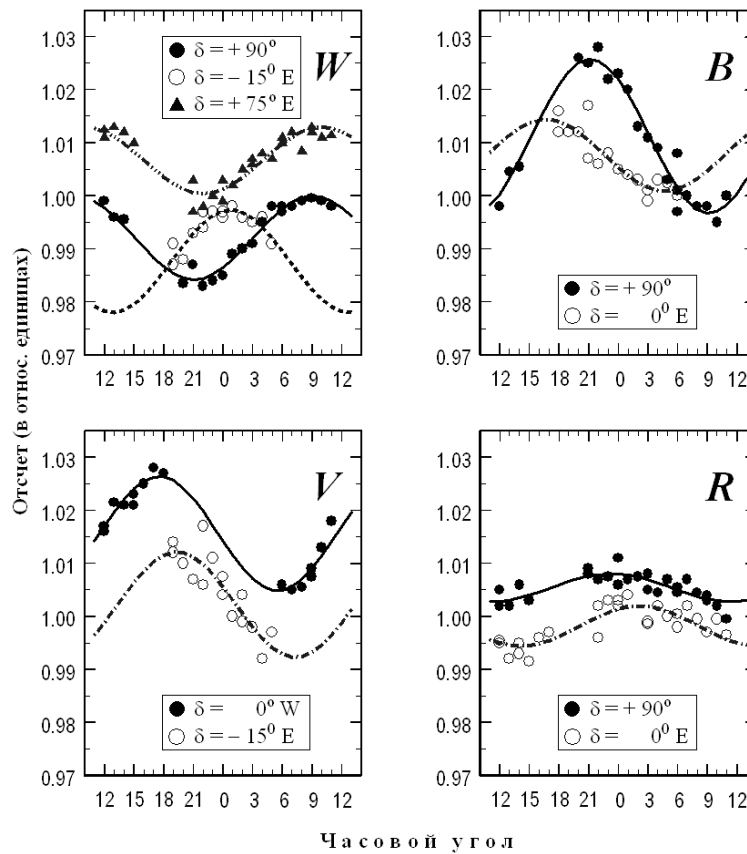


Рисунок 2.4. Примеры зависимостей отсчета на эталонный источник от положения телескопа. Индексы E и W после значения склонения означают, что при положении телескопа в меридиане и направлении трубы телескопа в область между полюсом и зенитом или к югу отзенита труба находится, соответственно, к востоку или к западу от колонны.

2.1.3.3. Определение параметров нелинейности.

Метод счета фотонов обеспечивает линейное соответствие светового потока и отклика фотометра при относительно слабых сигналах. Отсчеты счетчика фотонов при наведении на экран, освещенный Солнцем, были максимальны в канале *B*. Они увеличивались по мере подъема Солнца над горизонтом и достигали уровня $6 \cdot 10^6$ импульсов в секунду при окончании измерений. Очевидно, что при таких условиях было необходимо тщательно учитывать нелинейность, связанную с наличием мертвого времени измерительного тракта.

При учете нелинейности в большинстве случаев принимается модель с продлевающимся мертвым временем. Тогда для учета нелинейности теория (см. например, [Миронов, 2008, раздел 4.8]) дает формулы:

$$N' = Ne^{-\tau N} \text{ и } (N - N')/N = 1 - e^{-\tau N}. \quad (2.2)$$

Здесь N — истинная скорость счета (имп/с); N' — измеренная скорость счета и τ — параметр мертвого времени. Впрочем, чаще используются упрощенные формулы

$$N' = N/(1 + \tau N) \text{ и } N = N'/(1 - \tau N). \quad (2.3)$$

Формулы (2.3) получаются из формул (2.2.) если оставить только два первых члена в разложении экспоненты в ряд. Заметим, что в силу формул (2.2) величина N' имеет максимум $N'_{\max} = 1/e\tau$ при $N = 1/\tau$.

Для измерения τ нами использовался специально изготовленный осветитель. Галогенная лампочка накаливания запитывалась стабилизированным током и освещала на просвет экран с четырьмя одинаковыми круглыми отверстиями, закрытыми матовыми стеклами. Каждое из отверстий можно было закрыть специальной непрозрачной крышкой. Яркость отверстий можно было изменять, изменяя расстояние между ними и лампочкой. Осветитель и телескоп, на котором находился фотометр, разделяло расстояние около 200 м. Угловой размер отверстий при этом составлял около 10 угловых секунд, то есть был сравним с размером турбулентного диска звезды при посредственном качестве изображений. Измерение потоков от каждого отверстия в отдельности и суммарного потока от нескольких отверстий совместно, позволяет определить величины τ и N . Сводку способов определения параметра мертвого времени τ при счете фотонов можно найти в книге А.В. Миронова [2008, раздел 10.5].

На рис. 2.5 показан пример экспериментальной зависимости величины относительной потери импульсов $(N - N')/N$ от измеренной ско-

рости счета N' . Видно, что для скоростей счета N' менее чем $2 \cdot 10^6$ имп/с, формула удовлетворительно описывает измерения, и $20 \text{ нс} < \tau < 30 \text{ нс}$. При скорости счета $2 \cdot 10^6$ имп/с, что для фотометра Корнилова-Крылова примерно соответствует звезде минус первой величины, потери импульсов составляют 5–6%. При скорости счета свыше $(6-7) \cdot 10^6$ имп/с, любой учет нелинейности становится проблематичным. При необходимости измерять потоки от $2 \cdot 10^6$ имп/с, до $6 \cdot 10^6$ имп/с, уже нельзя пользоваться моделью, описываемой формулами (2.2), а целесообразнее получить в эксперименте эмпирическую формулу и регулярно контролировать ее применимость.

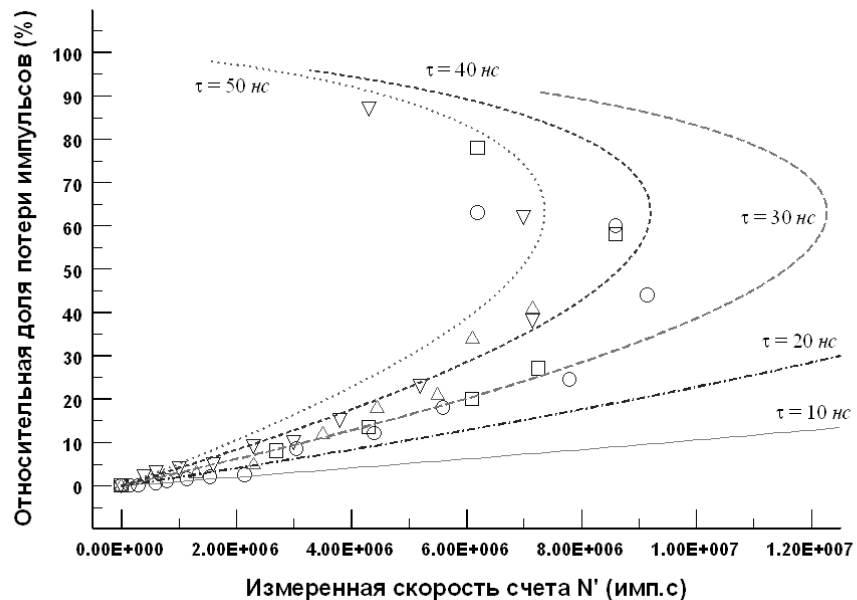


Рисунок 2.5. Экспериментальные и теоретические зависимости относительной потери импульсов $(N - N')/N$ от измеренной скорости счета N' . Теоретические кривые вычислены по формуле (2.2.) для пяти значений мертвого времени τ . Кружками, квадратами, треугольниками и перевернутыми треугольниками показаны, соответственно, потери импульсов в каналах W , B , V и R .

Так это и было сделано при нашем измерении сигнала от Солнца. Как показали наши исследования, в нашем случае можно было считать, что величина τ сама линейно зависит от измеренной скорости счета:

$\tau(N') = a + bN'$. Величины τ , a и b систематически измерялись в лабораторных экспериментах.

2.1.4. Обработка измерений.

Наблюдения, использованные при обработке, были выполнены в течение сеансов "ночь-утро" 8/9, 26/27, 27/28, 30/31 августа и 1/2 сентября 1996 года. Звездные величины звезд выносились за атмосферу по методу Мошкалева и Халиуллина [1985]. При обработке выяснилось, что во всех сеансах, кроме 1/2.09.96, в течение ночи происходило заметное изменение (улучшение) прозрачности атмосферы. После восхода Солнца наблюдались как периоды изменения, так и периоды относительного постоянства экстинкции. Поэтому, для редуций за атмосферу наблюдений Солнца нельзя было применить коэффициенты экстинкции, полученные по звездам. В этих случаях, измерения звезд использовались только для вычисления аппаратных констант, а величины Солнца выносились за атмосферу методом Бугера, причем использовались те фрагменты измерений, когда внеатмосферные показатели цвета оставались практически неизменными. Во время сеанса 1/2.09.96 наклоны бугеровских линий, построенных по звездам и по Солнцу (разумеется, после внесения необходимых поправок за различие спектральных классов), были близки. При усреднении результатов данные этого сеанса были взяты с двойным весом.

2.1.5. Результаты измерений.

В результате обработки измерений Солнца были получены следующие значения:

$$(W - B)_{Sun} = -0^m,05 \pm 0^m,02;$$

$$(B - V)_{Sun} = +0^m,67 \pm 0^m,01;$$

$$(V - R)_{Sun} = +0^m,53 \pm 0^m,01;$$

Для звезд главной последовательности с показателями цвета $(B - V)$, находящимися в интервале от $0^m,50$ до $0^m,70$, справедливы следующие соотношения между показателями цвета систем UBV и $WBVR$:

$$(B - V)_{UBV} = (B - V)_{WBVR} - 0,0068;$$

$$(U - B)_{UBV} = (W - B)_{WBVR} + 0,1668.$$

Таким образом, если редуцировать полученные показатели цвета в систему UBV , то

$$(U - B)_{Sun} = +0^m,12; \quad (B - V)_{Sun} = +0^m,66.$$

2.2. Фотометрия звезд Гиад и положение Солнца на двухцветных диаграммах.

2.2.1. Наблюдения звезд Гиад.

Наблюдения звезд в Гиадах проводились в течение 8 ночей: 13, 20, 21, 22, 23, 24 и 25 февраля и 6 марта 1995 года. Всего по программе было измерено 149 из 152 звезд классического списка ван Бурена [1955] членов рассеянного скопления Гиады, отобранных по пространственным скоростям. Наблюдения и их обработка проводились по той же самой схеме, как и при создании Тянь-Шаньского каталога. Каждая звезда наблюдалась в течение двух ночей. Окончательные результаты были переведены в систему Тянь-Шаньского каталога $WBVR$ -величин на основании сравнения величин общих звезд.

В каждую ночь для каждой звезды проводилось два измерения, разделенные измерением стандарта. Результаты представлены в таблице

ГЗ Приложения «Г» и на рисунке 2.6. В первой и второй колонках табл. ГЗ даны, соответственно, номера звезд по ван Бурену [1955] и по каталогу HD. В остальных колонках приведены величины и показатели цвета.

2.2.2. Анализ результатов.

На рис. 2.6 показано полученное нами положение Солнца на двухцветной диаграмме ($W-B, B-V$) относительно звезд Гиад, а на рис. 2.7 — относительно ярких звезд, имеющих заведомо надежно определенный спектральный класс G2 V. Это та же самая выборка звезд, которая использовалась в работе Харитонов и др. [1994], с рассмотрения которой мы начали изложение данной главы, и в которой сообщалось об обнаружении эксцентричного положения Солнца на диаграмме.

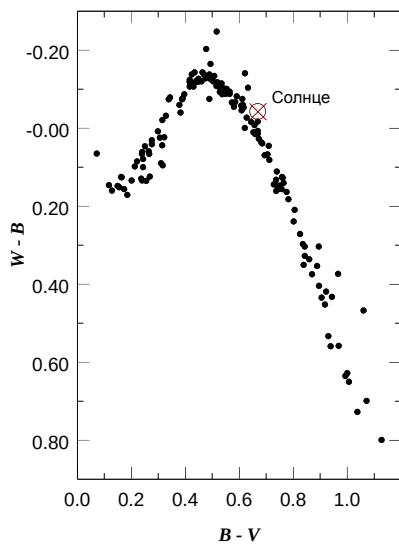


Рисунок.2.6. Диаграмма ($W-B, B-V$). Положение звезд скопления Гиады. Показано положение Солнца по нашим измерениям.

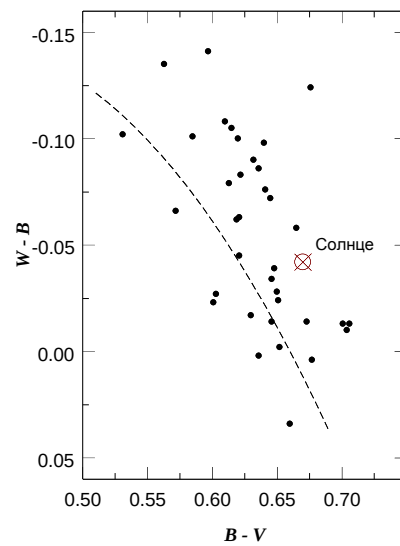


Рисунок.2.7. Положение Солнца и звезд спектрального типа G2 V на диаграмме ($W-B, B-V$). Штриховой линией показано среднее положение главной последовательности Гиад по нашим измерениям

Величины ($W-B$) и ($B-V$) звезд взяты из Тянь-Шаньского каталога. Штриховой линией показано положение участка главной последова-

тельности звезд Гиад по данным наших измерений. Из рисунка следует, что среди ярких звезд G2 V есть звезды, как сходные со звездами Гиад, так и отклоняющиеся от последовательности Гиад. К последним принадлежит и Солнце. По всей вероятности на двухцветной диаграмме мы наблюдаем тенденцию разделения звезд по химическому составу и возрасту: более старое и менее металлическое относительно Гиад Солнце занимает естественное положение среди звезд спектрального класса G2 V с аналогичными характеристиками. Его нецентральное положение по отношению к совокупности ярких G2 V звезд на двухиндексных диаграммах можно объяснить тем, что используемая выборка в значительной степени состоит из звезд, сходных со звездами Гиад, то есть имеющих более высокое, чем Солнце, содержание металлов.

Нами было проведено сравнение полученных данных с теоретическими моделями, рассчитанными Куруцем. Мы вычислили синтетические показатели цвета в системе *WBVR* для ряда моделей желтых звезд, близких по параметрам к Солнцу. Распределения энергии в спектре моделей брались из каталога A6039, хранящегося в Страсбургском Центре астрономических данных и содержащего сведения о 1200 моделях, из которых первые 284 были опубликованы ранее [Куруц, 1979]. Параметры отобранных моделей приведены в табл. 2.1. Чтобы получить синтетические показатели цвета необходимо для каждого из этих теоретических распределений определить константу нуль-пункта, используя распределение энергии и показателям цвета некоторой нормировочной звезды. Для вычислений констант мы взяли модель № 202 из каталога A6039 с параметрами $T_{\text{eff}} = 9400 \text{ K}$, $\lg g = 3,90$, $[\text{m/H}] = 0,0$. Эта модель соответствует звезде, близкой к Веге; ей мы приписали реальные показатели цвета Веги из каталога *WBVR*.

Таблица 2.1.

Параметры моделей, для которых были вычислены показатели цвета
в системе WBVR.

№ п/п	T_{eff}	$\lg g$	[m/H]	№ п/п	T_{eff}	$\lg g$	[m/H]
1.	6000	4,50	– 0,25	8.	5500	4,50	– 0,25
2.	6000	4,50	0,00	9.	5500	4,50	0,00
3.	6000	4,50	+ 0,25	10.	5500	4,50	+ 0,25
4.	6000	3,75	– 0,25	11.	5500	3,75	– 0,25
5.	6000	3,75	0,00	12.	5500	3,75	0,00
6.	6000	3,75	+ 0,25	13.	5500	3,75	+ 0,25
7.	5780	4,44	0,00				

В настоящее время существуют указания на то, что химический состав атмосферы Веги в целом характеризуется некоторым дефицитом металлов и отклонение содержания металлов от солнечного по разным элементам составляют в среднем $[m/H] = -0,3$ [Любимков, 1995]. Однако, влияние уменьшенного содержания металлов на покровный эффект и показатели цвета для относительно горячей Веги мало. Выполненные нами контрольные расчеты с использованием моделей Куруца для белых звезд с различной металличностью показывают, что при изменении параметра $[m/H]$ в модели белой нормировочной звезды на $\pm 0,5$, точка, соответствующая модели звезды сходной с Солнцем, перемещается на двухцветной диаграмме почти параллельно оси $W-B$ на величину, не превышающую $\pm 0^m,02$. Напротив, изменение металличности модели желтой звезды сдвигает соответствующие точки весьма значительно. При изменении $[m/H]$ от $-0,25$ до $+0,25$ для разных моделей $W-B$ уменьшается на величину от $0^m,15$ до $0^m,20$, а $B-V$ увеличивается на величину от $0^m,02$ до $0^m,04$.

Примененная процедура, безусловно, содержит некоторую неопределенность, ибо для вычисления констант нуль-пунктов с таким же успехом можно было взять показатели цвета любой другой непокрашенной звезды спектрального типа A0 V или средние показатели цвета для

подобных звезд. Естественный разброс показателей цвета белых звезд главной последовательности, принадлежащих к одному и тому же спектральному классу, как правило, составляет около $0^m,03$ для показателей цвета $(B - V)$ и $(V - R)$ в смысле среднеквадратического отклонения. В связи с этим для контроля были привлечены результаты синтетической фотометрии Бузера и Куруца [1992], выполненной для тех же самых моделей в полосах $UBVRI$. Представленные ими данные были переведены в систему $WBVR$.

Результаты представлены на рис. 2.8. Малые заполненные кружки представляют положение звезд Гиад, согласно нашим измерениям. В правой части рисунка большой квадрат показывает измеренные нами показатели цвета Солнца.

В левой верхней части рисунка показаны линии бланкетирования для моделей с эффективной температурой 6000 К. Сплошными линиями соединены точки, относящиеся к моделям, у которых $\lg g = 4,50$, а штриховыми — у которых $\lg g = 3,75$. Треугольниками показаны результаты Бузера и Куруца [1992], а косыми крестами — данные наших расчетов. Большие ромб и круг в центре рисунка показывают положение модели с параметрами $T_{\text{eff}} = 5780$ К, $\lg g = 4,44$, $[m/H] = 0,0$, согласно упомянутым вычислениям Бузера и Куруца и нашим, соответственно. Параметры этой модели близки к солнечным. В правой нижней части рисунка представлены линии бланкетирования для моделей с эффективной температурой 5500 К. Смысл сплошных и штриховых линий — тот же, что и раньше. Пустыми кружками показаны результаты Бузера и Куруца, а прямыми крестами — данные наших расчетов. На всех линиях бланкетирования металличность моделей увеличивается при движении слева направо и сверху вниз. Во всех случаях три точки на каждой линии бланкетирования относятся, соответственно, к моделям с параметрами $[m/H] = -0,25, 0,00$, и $+0,25$.

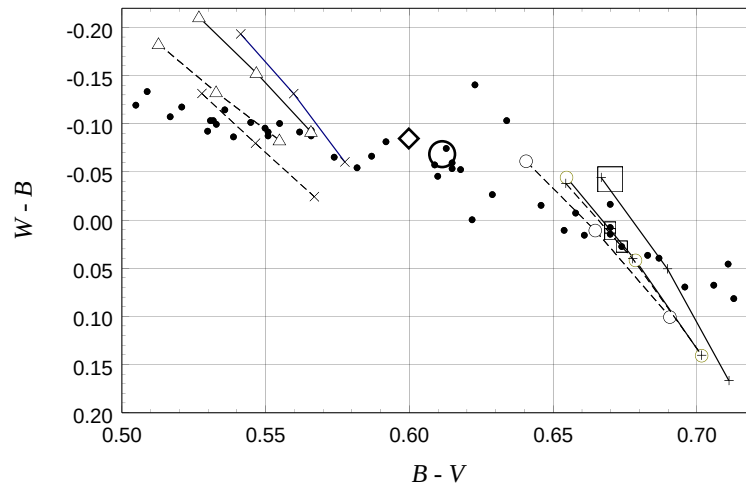


Рисунок 2.8. Наблюдаемое положение Солнца (квадрат) и моделей Куруца, перечисленных в таблице 2. относительно звезд Гиад на диаграмме ($W-B$, $B-V$). Темными кружками показано положение звезд Гиад. Три из них, обведенные квадратиками — аналоги Солнца согласно Хардорпу [1980b]. Показаны линии бланкетирования для различных случаев. Подробнее обозначения см. в тексте.

Из рисунка видно, что, независимо от методики расчета, точки, соответствующие моделям звезд с $[m/H] = 0$, в том числе модель, представляющая Солнце, лежат либо непосредственно на последовательности Гиад, либо весьма близко к ней. Этот результат находится в противоречии с тем фактом, что металличность Гиад характеризуется параметром $[m/H] = +0,2$. Таким образом, наши данные указывают на то, что либо модели Куруца недостаточно точны, либо при вычислениях методами синтетической фотометрии как мы, так и Бузер и Куруц воспользовались неправильными (но сходными!) значениями констант нульпунктов, то есть выбранным моделям были приписаны показатели цвета звезд, физические параметры которых отличаются от модельных. Сравнение результатов проведенных расчетов с синтетическими показателями цвета, вычисленными для усовершенствованных моделей Куруца

[1993], показало, что и новые модели не противоречат сделанному выводу о некотором противоречии теории и наблюдений.

Причины обнаруженного расхождения требуют дальнейшего исследования. Заметим, что положение на диаграмме точки, соответствующей полученным нами показателям цвета Солнца, (большой квадрат), по индексу $(B - V)$ почти точно совпадает с положением трех звезд Гиад, отобранных более 25 лет назад Хардорпом [1980b] на основе анализа их спектральных характеристик в качестве близких аналогов Солнца. На рисунке эти точки обведены кружками.

2.3. Поиск аналогов Солнца на основе многоцветной фотометрии.

Под аналогами Солнца следует понимать звезды, у которых совпадают с солнечными численные значения различных параметров, как непосредственно наблюдаемых, (показатели цвета, распределение энергии, интенсивности спектральных линий), так и физических (температура, ускорение силы тяжести и т.д.).

В конце 1970-х и начале 1980-х годов Хардорп [1978, 1980a, 1980b, 1981, 1982], Хардорп, Тьюг и Шмидт-Калер [1982] и Хардорп и Томкин [1983] опубликовали серию статей, в которых обосновали точку зрения, согласно которой близкими аналогами Солнца следовало считать следующие пять звезд: известный компонент визуальной двойной 16 Суг В, звезду южного полушария BS 2290 (HD 44594) и трех членов скопления Гиады — ν B 64, ν B 106 и ν B 142. Хардорп отобрал эти звезды, сравнивая с солнечным их линейчатые спектры в ближней ультрафиолетовой области, при этом особое внимание уделялось полосе CN при 3850 Å. Требовалось, чтобы совпадали интенсивности этой полосы и некоторых других деталей в спектрах звезды и "заменителей Солнца",

в качестве которых наблюдались несамосветящиеся тела Солнечной системы.

Хотя Хардорп считал эти звезды лучшими солнечными аналогами, все они в той или иной мере отличаются от Солнца. Покажем, например, нормированное к единице в длине волны $5500 \text{ \AA}$ отношение спектральных потоков от 16 Cyg B и от Солнца в интервале длин волн $3200\text{--}7200 \text{ \AA}$ (рис. 2.9). Для 16 Cyg B распределение энергии взято из каталога Харитонова и др. [1988], оно хорошо согласуется с данными, полученными Тейлором [1984]. Для Солнца взято распределение энергии, приведенное в монографии Макаровой, Харитонова и Казачевской [1991] и представляющее собой среднее из результатов пяти независимых исследований, которые были отобраны как наиболее надежные.

Легко видеть, что ультрафиолетовая область спектра 16 Cyg B явно отличается от Солнца. Имеется свидетельство, [Фриэль и др., 1993], что 16 Cyg A и 16 Cyg B имеют несколько более высокое содержание

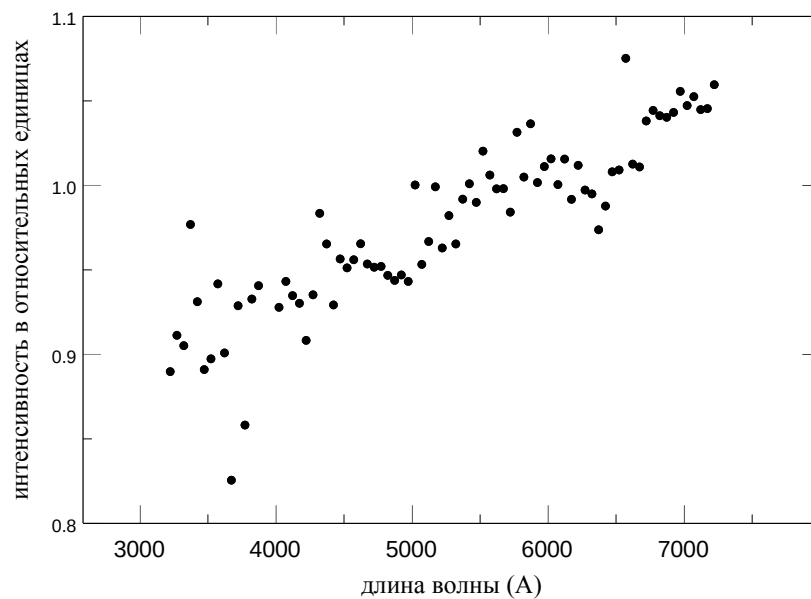


Рисунок 2.9. Нормированное на длину волны $\lambda 5500 \text{ \AA}$ отношение спектральных потоков от звезды 16 Cyg B и Солнца.

металлов и несколько больший возраст, чем Солнце.

Одним из способов поиска "двойников" Солнца, является выделение звезд, у которых совокупность показателей цвета наиболее близка к солнечным. Это можно делать, так как избытки цвета карликов спектрального класса G, более ярких чем предел каталога HD, практически равны нулю. Нами был произведен поиск звезд, показатели цвета которых наиболее близки к таковым для Солнца. Были использованы три каталога: широко известный компилятивный каталог Мермийо [1987, 1991], содержащий измерения в системе UBV (из каталога Мермийо, были отобраны только звезды, включенные в каталог HD), каталог измерений в вильнюсской системе $UPXYZVS$ [Страйжис и Казлаускас, 1993] и Тянь-Шаньский фотометрический каталог [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991].

В качестве критерия близости показателей цвета Солнца и любой избранной звезды была выбрана величина

$$\rho = \sqrt{\sum_{i=1}^K (c_i^{Sun} - c_i^*)^2}$$

где i — номер показателя цвета; K — количество независимых показателей цвета фотометрической системы; c_i^{Sun} — показатели цвета Солнца и c_i^* — показатели цвета звезды.

Показатели цвета Солнца в любой фотометрической системе могут быть либо получены из наблюдений, либо вычислены путем интегрирования произведения функции распределения энергии в спектре Солнца $E^{Sun}(\lambda)$ и кривых реакции заданной системы $T(\lambda)$. В табл. 2.2 приведена сводка результатов основных определений.

В настоящее время прямые измерения произведены только в двух системах: UBV и $WBVR$.

Таблица 2.2.

Наблюденные и вычисленные показатели цвета Солнца по данным разных авторов.

1. Система <i>UBV</i>									
автор	метод	<i>U–B</i>	<i>B–V</i>	Литература					
				распред. энергии	кривые реакции				
Галлуе [1964]	наблюд.	0,15	0,68	–	–				
Тьюг и Шмидт-Калер, [1982]	наблюд.	0,183	0,686	–	–				
Харитонов и Князева, [1997]	синтет.	0,033	0,648	I	II				
		0,067	0,652	I	III				
Страйжис и Вальяуга, [1994]	синтет.	0,14	0,64	IV	II				
		0,13	0,60	V	II				
		0,15	0,62	VI	II				
2. Система <i>WBVR</i> .									
автор	метод	<i>W–B</i>	<i>B–V</i>	<i>V–R</i>	Литература				
					распред. энергии	кривые реакции			
Миронов и др. [1998]	наблюд.	–0,05	0,67	0,531	–	–			
Харитонов и Князева, [1997]	синтет.	–0,072	0,674	0,505	I	VII			
3. Вильнюсская система									
автор	метод	<i>U–P</i>	<i>P–X</i>	<i>X–V</i>	<i>Y–V</i>	<i>Z–V</i>	<i>V–S</i>	Литература	
								распред. энергии	кривые реакции
Страйжис и Вальяуга, [1994]	синтет.	2,51	2,06	1,41	0,55	0,21	0,59	IV	II
	синтет.	2,48	2,01	1,35	0,54	0,22	0,51	V	II
	синтет.	2,48	2,06	1,39	0,54	0,21	0,59	VI	II
Харитонов и Князева [1997]	синтет.	2,46	2,02	1,37	0,54	0,21	0,55	I	II

Литература к таблице 2.2. I. – Макарова и др., [1994]; II. – Страйжис [1977]; III. – Бессель, [1990]; IV. – Неккель и Лабс, [1984]; V. – Локвуд и др., [1992]; VI. – Макарова и др. [1989]; VII. – Корнилов и др. [1991] (Тянь-Шаньский каталог);

Прямые измерения показателей цвета Солнца в системе *UBV* выполнили Галлуе [1964] и Тьюг и Шмидт-Калер [1982]. Однако ввиду из-

вестных неопределенностей полос пропускания и метода редукций, сравнение показателей цвета любых двух звезд, которые были измерены в системе *UBV* в разное время, с разной аппаратурой и в разных обсерваториях, не является надежным.

Прямые измерения показателей цвета Солнца в системе *WBVR* [Миронов, Харитонов, 1998; Миронов, Мошкалев, Харитонов, 1998] были описаны в разделе 2.1 настоящей главы.

Многие исследователи вычисляли синтетические показатели цвета Солнца и использовали ряд версий распределений энергии в спектре Солнца и кривых реакции. В качестве примера достаточно указать на обстоятельную статью Страйжиса и Вальяуги, [1994], в которой для нескольких вариантов вычислены показатели цвета Солнца в системах *UBV* и вильнюсской. Как можно видеть из таблицы 2.2, синтетические показатели цвета в системе *UBV*, полученные для разных случаев, показывают значительные разногласия.

Для выбора аналогов нами были приняты следующие показатели цвета Солнца [Миронов, Харитонов, 1998b; Миронов, Харитонов, 2001]:

- для системы *UBV*: среднее из прямых измерений Галлуе [1964] и Тьюга и Шмидта-Калера [1982]; ввиду заметных разногласий синтетические величины не использовались;
- для системы *WBVR*: результат прямых измерений Миронова, Мошкалева и Харитонова [Миронов, Харитонов, 1998b; Миронов, Харитонов, 2001], который находится в согласии с результатом вычисления синтетических величин Страйжисом и Вальяугой [1994];
- для вильнюсской системы: результаты расчетов Харитонова и Князевой [1997], которые находятся в хорошем согласии с результатами, полученными Страйжисом и Вальяугой [1994].

Предельная величина параметра $\rho_{\max}$ задавалась равной $r\sqrt{K}$, где K — количество независимых показателей цвета фотометрической системы, а $r = 2\sigma \cong 0^{\text{m}},04$ — параметр, примерно равный удвоенному значению стандартной ошибки показателей цвета в системе UBV . Критерию $\rho < \rho_{\max}$ удовлетворили 346 звезд из каталога для системы UBV , 140 звезд из каталога для системы $WBVR$ и 259 звезд из каталога для вильнюсской системы.

13 звезд входят одновременно во все три выборки. Они перечислены в табл. 2.3.

Таблица 2.3.
Звезды, показатели цвета которых близки к показателям цвета Солнца в выборках из каталогов в трех фотометрических системах.

BS	HD	Sp	V	W-B	B-V	V-R
88	1835A	G3 V	6,402	0,034	0,660	0,537
321	6582A	G5 Vp	5,177	-0,092	0,692	0,592
	9407	G6 V	6,529	0,041	0,696	0,546
1729	34411A	G2 IV-V	4,705	-0,033	0,622	0,499
5384	126053	G1 V	6,266	-0,110	0,644	0,527
5853	140538AB	G5 V	5,874	0,023	0,689	0,553
6060	146233A	G2 Va	5,499	-0,028	0,650	0,524
	153344	G5 IV	7,084	0,037	0,673	0,543
6538	159222	G5 V	6,537	-0,006	0,646	0,510
7503	186408	G1,5V	5,986	-0,004	0,659	0,521
7504	186427	G2,5V	6,244	0,008	0,671	0,531
	187237	G2 III	6,896	-0,013	0,654	0,512
7569	187923A	G0 V	6,164	-0,032	0,664	0,520

Эти звезды, по-видимому, можно рассматривать как оптимальных кандидатов на роль "двойников" Солнца по близости показателей цвета. Две из них — это уже известные 16 Cyg A и 16 Cyg B (HD 186408 и HD 186427). Таким образом, несмотря на различия в ультрафиолете, 16 Cyg B по совокупности показателей цвета все-таки является одной из звезд, наиболее подобных Солнцу. В то же время, звезды Гиад, выбранные Хардорпом, не вошли в этот список. Лишь звезда HD 28099 = vB64

попала в выборку из вильнюсского каталога, где из 259 объектов занимает 180 место по величине параметра ρ .

Известно, что ошибки в вильнюсском и *WBVR* каталогах меньше, чем в компилятивном каталоге Мермийо, поэтому мы думаем, что звезды, которые находятся одновременно в выборках из вильнюсского каталога и из каталога *WBVR*, также можно рассматривать в качестве кандидатов в аналоги Солнца. Их список приведен в таблице 2.4.

Важно отметить тот факт, что в таблицах 2.3 и 2.4 присутствуют звезды в широком интервале спектральных подклассов от F9 до G5. Очевидно, что этот факт является, с одной стороны, следствием ошибок в спектральной классификации и, с другой стороны, — связан с естественными различиями параметров линейчатого спектра у звезд с одинаковыми показателями цвета (т.е. со сходными энергетическими распределениями). Наличие в Таблицах 2.3 и 2.4 переменных звезд (HD1835=BE Cet и HD29310=V998 Tau) не противоречит причислению их к числу аналогов Солнца. Эти переменные принадлежат к типу BY Dra, который в настоящее время дополнен вращающимися карликами спектрального класса G с неоднородной поверхностной яркостью и хромосферной активностью, в том числе и не показывающими водородной эмиссии в своих спектрах (GCVS).

Одновременно с нашей работой по поиску аналогов Солнца на основе анализа показателей цвета в разных фотометрических системах [Миронов, Харитонов, 1998b], вышла работа Кейрел де Стробель и Фриели [1998], в которой проводился поиск аналогов Солнца по положению их на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. Использовались величины в системе *V* и параллаксы, определенные Hipparcos. Оказалось, что наиболее близкими параметрами к Солнцу обладает звезда 18 Sco = HD 146233. Наш способ также указал на эту звезду. Она входит в состав 13 звезд-двойников в табл. 2.3.

Галеев, Бикмаев, Мусаев и Галазутдинов [2004] подвергли 24 звезды из списков в таблицах 2.3 и 2.4 подробному спектроскопическому анализу. Они показали, что четыре звезды: HD 10307, HD 34411, HD 143233 (18 Sco) и HD 186427 (16 Cyg B) близки к Солнцу не только по фотометрии, но и по детальному химическому составу. Наилучшим кандидатом в «двойники» Солнца они также сочли 18 Sco.

Отметим, что в таблицы 2.3 и 2.4 вошли три звезды 47 UMa (HD 95128) ρ CrB (HD 143761) и 16 Cyg B (HD 186427), у которых имеются планетные системы. Учитывая рисунок 2.9, рассматриваемые здесь звезды вряд ли можно считать в полном смысле аналогами ("двойниками") Солнца; скорее это квазианалоги. Поиск аналогов нужно продолжать, т.к. с ними связаны многие задачи, например, сравнительное изучение активности Солнца и звезд, уточнение положения Солнца среди звезд и, наконец, проблема SETI.

Таблица 2.4.
Звезды, показатели цвета которых близки к показателям цвета Солнца
в выборках из каталогов в Вильнюсской системе и в системе *WBVR*.

BS	HD	Sp	V	W-B	B-V	V-R
203	4307A	G2V	6,158	- 0,086	0,612	0,512
	4915	G0V	6,982	- 0,027	0,666	0,543
	8262	G3V	9,973	- 0,079	0,630	0,513
483	10307	G1,5V	4,965	- 0,049	0,623	0,499
	29310	G1V	7,547	- 0,045	0,608	0,516
4277	95128	G0V	5,037	- 0,056	0,622	0,505
3648	79028	F9V	5,195	- 0,054	0,605	0,498
4277	95128	G0V	5,0378	- 0,056	0,622	0,505
	115043A	G1Va	6,815	- 0,089	0,615	0,502
5596	133002	F9V	5,643	0,003	0,682	0,555
5868	141004	G0V	4,419	- 0,064	0,611	0,494
5968	143761	G2V	5,411	- 0,105	0,615	0,508
	152792	G0V	5,827	- 0,096	0,645	0,535
6458	157214A	G0V	5,394	- 0,107	0,625	0,524
6573	160269AB	G0Va+K3V	5,233	- 0,082	0,608	0,525
	168874AB	G2IV	7,014	- 0,046	0,637	0,512
	177082	G2V	6,895	- 0,076	0,641	0,518
7522	186760	G0V	6,304	- 0,038	0,594	0,478
	187003A	G0IV	6,776	- 0,069	0,605	0,484
	187462	G0IV/V	6,962	- 0,055	0,608	0,460
7683	190771AB	G5IV	6,185	0,000	0,668	0,523
7914	197076A	G5V	6,444	- 0,082	0,628	0,505
	202908AB	G0V	7,016	- 0,088	0,602	0,491
8283	206301	G2V+G3V	5,159	0,019	0,685	0,546
	208776	G0V	6,959	-0,082	0,592	0,486
	221830	F9V	6,871	- 0,128	0,621	0,519
8964	222143	G5	6,591	- 0,018	0,652	0,522
9088	224930AB	G3V+K6V	5,761	- 0,124	0,676	0,594

2.4. Выбор объектов SETI

На протяжении всего времени исследования проблемы SETI было составлено много списков звезд, в системах которых разные авторы считали наиболее вероятным нахождение планет, пригодных для жизни и для разумной жизни. Начиная с середины 1980-х годов, внимание исследователей привлекали звезды, на планетах которых могли существовать

цивилизации, достигшие высокого уровня технологий. Среди этих списков следует указать на работы Д. Содерблома [1985, 1986], в которых были сформулированы критерии, которым должны удовлетворять звезды, способные иметь планеты с развитыми технологическими цивилизациями. Ключевым требованием был возраст звезды, который должен быть достаточно большим, чтобы на планетах ее системы успела сформироваться и развиться технологическая цивилизация. Содерблом оценил нижний предел этого возраста в 3 миллиарда лет, и этой оценки придерживаются и в настоящее время. Во время создания списков Содерблома внимание было привлечено только к звездам солнечного типа. В последнее время в такие списки включают также красные карлики спектральных классов К и М, которые являются основными представителями звездного населения в окрестностях Солнца.

Нами был составлен новый список кандидатов для поиска высокотехнологичных внеземных цивилизаций (ВЦ) [Миронов, Кардашев, Гиндилис и др., 2006]. Причиной, побудившей сделать это, было появление новых каталогов. Это, во-первых, «Женевско-Копенгагенский обзор звезд в окрестностях Солнца» [Нордстрем и др., 2004], и, во-вторых, «Каталог вспыхивающих звезд типа UV Кита и родственных объектов в окрестностях Солнца» [Гершберг, Кацова, Ловкая и др., 1999; Гершберг, 2002].

За основу нами была принята третья версия Каталога ближайших звезд (CNS3) Глизе и Ярайса [1999]. Всего каталог CNS3 содержит 3802 объекта и Солнце.

Отметим, что после появления каталога Hipparcos обнаружились противоречия в определениях расстояний ближайших звезд. На этот факт указывали еще авторы Hipparcos [Турон, 1999]. Hipparcos и CNS3 содержат 1736 общих звезд. Сравнение их расстояний по данным этих двух каталогов показано на рис. 2.10. Параллаксы общих звезд в 1237

случаях сходятся с разницей не превышающей 30 %. Но для 499 объектов различие параллакса более 30 %.

Итак, между расстояниями в CNS3 и Hipparcos каталогах около 29% противоречий. Из рассмотренной выборки общих звезд по данным Hipparcos 1063 звезд находятся ближе 25 пк. Каталог CNS3 утверждает, что таких звезд больше, а именно 1495. Условие $R \leq 25$ пк одновременно выполняется для 965 звезд выборки. Таким образом, CNS3 каталог подтверждает 25-парсековую близость для 91% расстояний Hipparcos. Наоборот, Hipparcos подтверждает близость расстояний только для 64,5% объектов CNS3. Причина таких значительных расхождений должна быть установлена дополнительными исследованиями.

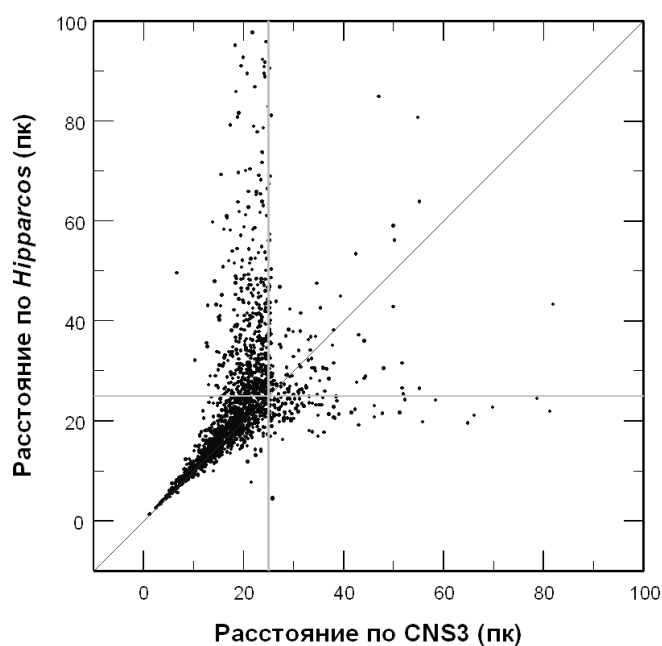


Рисунок 2.10. Сравнение расстояний ближайших звезд по данным каталогов Hipparcos и CNS Глизе и Ярайса.

При выборе наших кандидатов в программу SETI мы исходили из того, что нужно отобрать сравнительно небольшое число объектов, на-

пример, 100, для которых достаточно надежно определены основные критерии: расстояние, спектральный тип, возраст и пр. Мы сразу же исключали звезды, для которых не было определено соответствующих параметров.

Как сказано выше, отбор производился из числа объектов каталога CNS3. Чтобы получить сведения о возрастах были привлечены данные из семи каталогов, сведения о которых приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5.
Литературные источники, содержащие сведения о возрастах ближайших звезд.

Название каталога	Ссылка	количество объектов CNS3
The Geneva-Copenhagen survey of the Solar neighbourhood. Ages, metallicities, and kinematic properties of ~ 14000 F and G dwarfs.	Нордстрем и др., [2004]	648
Catalogue of ages, metallicities, orbital elements and other parameters for nearby stars.	Марсаков и Шевелев [1995]	259
Metallicity effects on the chromospheric activity-age relation for late-type dwarfs	Роха-Пинто и Масьель [1998]	128
Lithium abundances of the local thin disc stars.	Ламберт и Редди [2004]	128
The solar neighbourhood age-metallicity relation. Does it exist?	Фельтцинг и др. [2001]	158
HIPPARCOS age-metallicity relation of the solar neighbourhood disc stars.	Ибукияма и Аримото [2002]	147
Lithium abundances for 185 main-sequence stars.	Чен и др. [2001]	89
Chromospheric Ca II emission in nearby F, G, K, and M stars.	Райт и др., [2004]	278

В последнем столбце указано число общих звезд каждого каталога с CNS3. Все данные получены с помощью ресурса **VizieR**. Разброс значений возраста по различным источникам велик, однако данные разных авторов явно коррелируют друг с другом. Графики, иллюстрирующие корреляции, показаны на рис. 2.11.

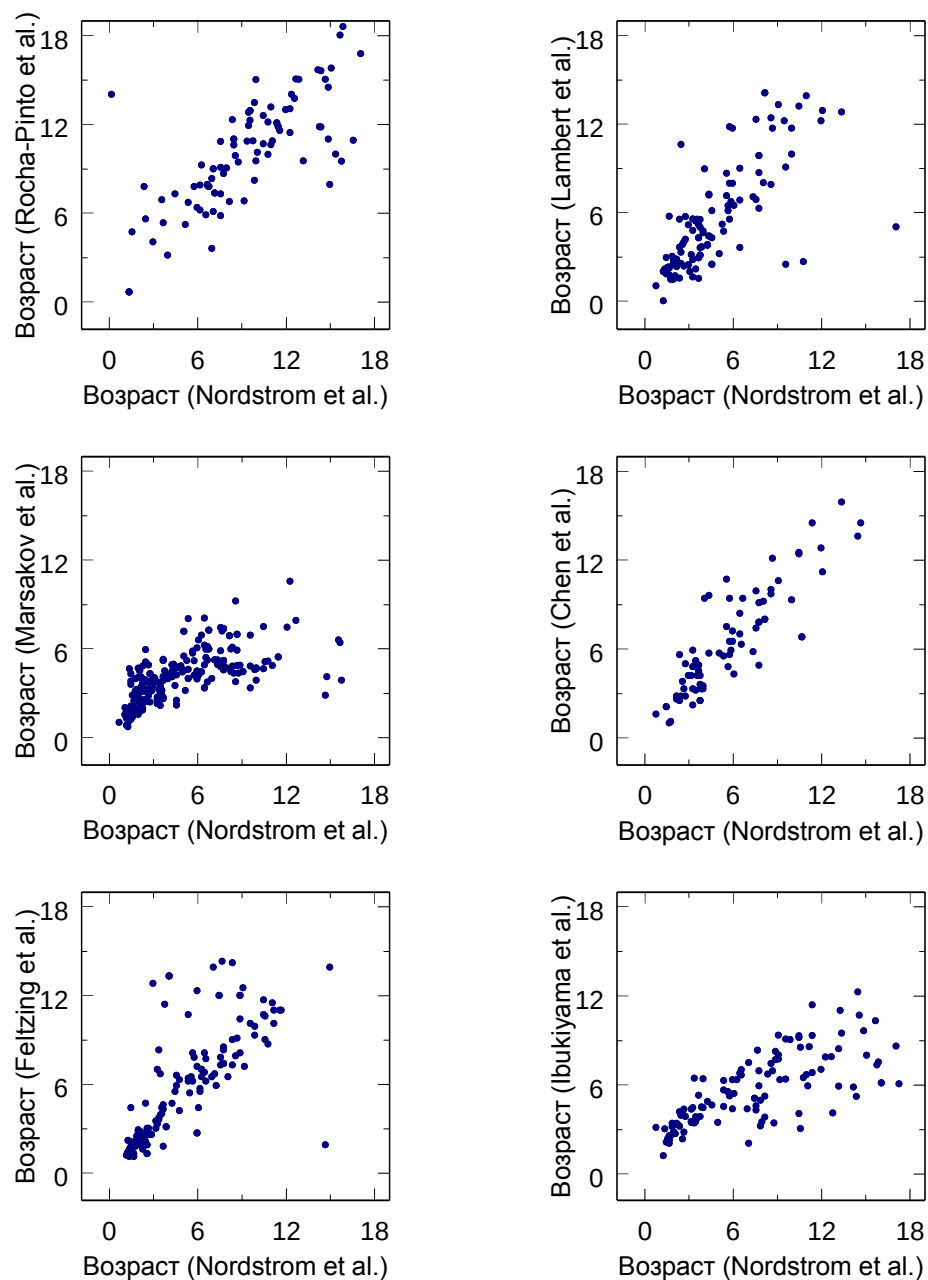


Рисунок. 2.11. Сравнение возрастов близких звезд по данным нескольких современных каталогов

Кроме оценок возрастов мы использовали данные Райта и др. [2004] по скоростям осевого вращения звезд. Корреляция между возрастом и периодом вращения звезды вокруг своей оси показывает, что если возраст звезды превышает 3 миллиарда лет, то оценка периода вращения, с учетом ошибок, не может быть менее 10 суток.

Отбор наших кандидатов проводился в следующем порядке.

Вначале были удалены все звезды, для которых параллакс в каталоге CNS3 или в Hipparcos был менее 0,040. Далее последовательно были удалены:

- звезды, для которых не было данных ни о возрастах, ни о периодах осевого сравнения;
- звезды, спектральные классы которых были ранее F5, в том числе звезды со спектральными типами a , f , и $f-g$ в CNS3;
- звезды, имеющие классы светимости II, III и III-IV, также как и звезды, имеющие префикс g в Гарвардской классификации;
- белые карлики;
- коричневые карлики;
- звезды с противоречиями между спектральным классом и абсолютной звездной величиной;
- звезды с противоречиями между спектральным классом и показателем цвета ($B_T - V_T$);
- звезды, для которых в большинстве привлеченных каталогов оценка возраста была менее чем 2,5 Gyr.

Несмотря на то, что индивидуальные оценки возрастов имеют очень большую неопределённость, данные разных каталогов коррелируют друг с другом. Из рисунка 2.11 видно, что если возраст менее 3 млрд лет, то это подтверждается почти всеми каталогами одновременно.

В результате был составлен список из 505 звезд. Он был принят за основу при формировании дальнейших выборок. В число 505-ти входят 188 М-карликов.

Чтобы создать более краткий список, пригодный для наблюдений с территории России, мы привлекли данные многоцветной фотометрии.

Во-первых, мы отобрали только те звезды, которые содержатся в Тянь-Шаньском каталоге. Таких объектов оказалось 232.

Во вторых, было учтено, что для звезд в окрестностях Солнца на двухцветной диаграмме точка Солнца сдвинута от линии Гиад по направлению вектора дебланкетирования (см. выше рисунки 2.6 2.7, 2.8). Поэтому, мы исключили из окончательного списка звезды, находящиеся вблизи линии Гиад на диаграмме ($W-B$, $B-V$), оставляя объекты, через которые проходит линия двухцветной диаграммы, если ее провести через точку Солнца. Скорее всего, исключенные звезды сходны с членами Гиад и значительно моложе Солнца, несмотря на то, что в литературе для них были получены оценки возраста, превышающие 2,5 Gyr. В довершение всего, были удалены объекты, пекулярная пространственная скорость которых превышает 60 км/с. Эти объекты, имеющие кинематические характеристики звезд гало Галактики, по статистике имеют экстремально низкую металличность, что может препятствовать нормальному образованию планет подобных Земле.

В итоге был оставлен 91 объект [Миронов, Кардашев, Гиндилис и др., 2006], список которых приведен в таблице Г4 в Приложении «Г». Положение на двухцветной диаграмме всех кандидатов SETI, входящих в Тянь-Шаньский каталог, показано на рисунке 2.12. Заполненными кружками показано положение отобранных звезд.

Выводы по Главе 2.

Аппаратура и методики, которые обеспечивали высокую точность фотометрических измерений, дали возможность надежно определить показатели цвета Солнца и сравнить их с заново определенными показателями цвета звезд Гиад. Для выполнения этих измерений было создано несколько тестовых устройств, позволяющих учесть разнообразные систематические ошибки. На основании полученных показателей цвета

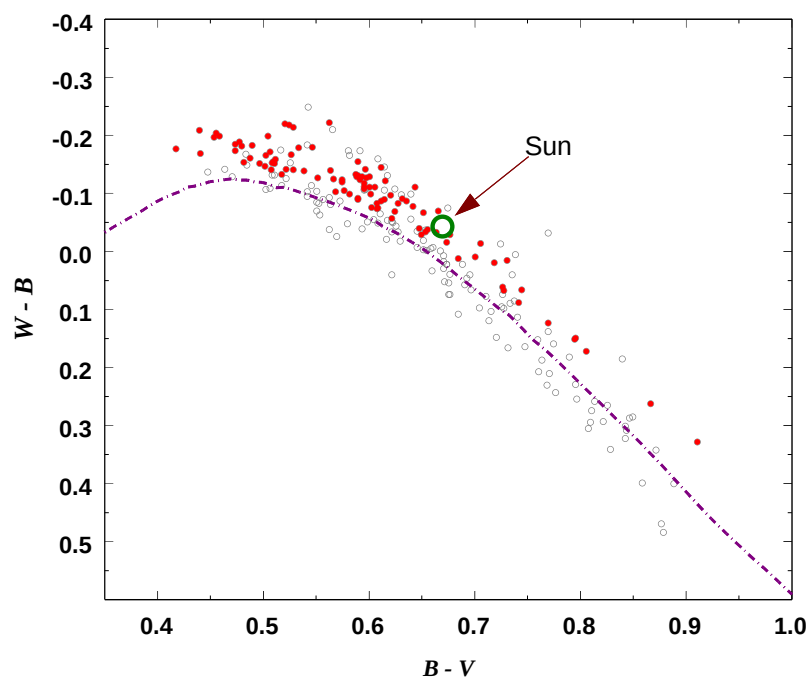


Рисунок 2.12. Положение на двухцветной диаграмме звезд, отобранных в качестве объектов для программ SETI.

Солнца был сделан вывод, что в солнечной окрестности находятся звезды спектрального типа G2 V, имеющие разные возрасты и металличности, причем высока доля относительно молодых звезд с повышенным содержанием тяжелых элементов. Полученные показатели цвета Солнца в системе *WBVR*, в комбинации с измеренными или вычисленными показателями цвета Солнца в системе *UBV* и в Вильнюсской фотометрической системе были использованы для проведения поиска фотометрических аналогов Солнца. Были составлены два списка, послужившие основой для дальнейших исследований их методами спектроскопии. Совокупность данных Тянь-Шаньского фотометрического каталога, высокоточной фотометрии звезд Гиад и показателей цвета Солнца помогли составить список кандидатов для изучения по программе SETI.

Глава 3.

Сравнение звездных величин в высокоточных фотометрических каталогах.

3.1. О точности фотометрии в каталогах Hipparcos, Tycho и WBVR.

В 1990-х годах была завершена работа над грандиозным проектом, осуществлённым Европейским космическим агентством. На космическом аппарате Hipparcos был выполнен обзор всего неба [ESA: 1997]. В результате для 118 тысяч звезд были получены высокоточные положения,

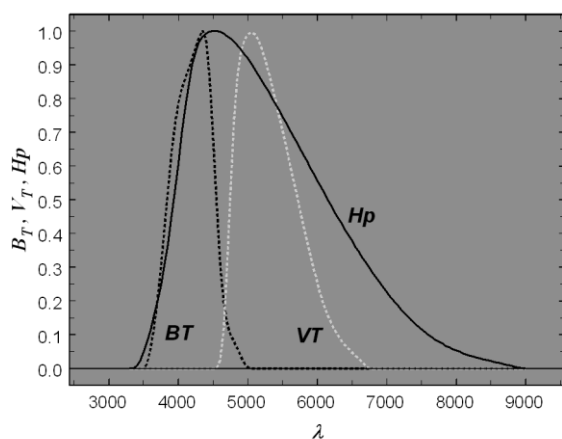


Рис. 3.1. Кривые реакции фотометрических полос детекторов в космических экспериментах Hipparcos и Tycho.

собственные движения, параллаксы и звездные величины в одной фотометрической полосе (собственно эксперимент Hipparcos) и, дополнительно, хотя и с меньшей точностью, координаты и двухцветная фотометрия для двух с половиной миллионов звезд (эксперимент Tycho).

Кривая реакции главного

детектора *Hipparcos* — это широкая полоса, охватывающая положения полос B и V разных систем. Звездные величины, полученные в этой полосе, обозначаются H_r . Кроме главного детектора излучение воспринималось двумя вспомогательными фотометрами, в которых были реализованы две полосы, напоминающие B и V системы UBV . Величины в этих полосах получили обозначение B_T и V_T и вошли в каталог *Tycho*. Кривые реакции полос H_r , B_T и V_T показаны на рис. 3.1, а средние величины и полуширины полос приведены в табл. 3.1. Каждый объект в обзорах *Hipparcos* и *Tycho* измерялся за время эксперимента в среднем 110 раз.

Таблица 3.1.

Средние длины волн и полуширины фотометрических полос детекторов космических экспериментов *Hipparcos* и *Tycho*.

Полоса	$\lambda_0, \text{\AA}$	$\Delta\lambda, \text{\AA}$
B_T	4200	800
V_T	5400	900
H_r	5200	2500

Величины H_r были получены с весьма высокой точностью. Заявленные авторами *Hipparcos* ошибки определения величины H_r [Турон, 1999] представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2.

Заявленная точность фотометрии в лучах H_r .

H_r	3^m	5^m	7^m	9^m	10^m	11^m	12^m
стандартное отклонение	0,003	0,005	0,008	0,015	0,022	0,033	0,049
стандартная ошибка среднего	0,0004	0,0006	0,0009	0,0019	0,0028	0,0044	0,0072

В Табл. 3.3 приведены заявленные авторами ошибки измерения средних значений величин V_T .

Таблица 3.3.
Заявленная точность фотометрии в лучах V_T .

V_T	$<6^m$	$6^m..7^m$	$7^m..8^m$	$8^m..9^m$
стандартная ошибка среднего	0,003	0,005	0,008	0,012
Все звезды	0,06			

Отметим, что большинство фотометрических каталогов, выполненных как в широкополосных, так и в среднеполосных системах, в частности, все каталоги Джонсона, каталоги величин в вильнюсской, жевской и вашингтонской системах, каталог величин в системе Стремгrena и т.п. характеризовались внутренней среднеквадратичной ошибкой звездной величины около $0^m,02$. На этом фоне точность величин H_r , достигнутая в эксперименте Hipparcos, явилась крупным шагом вперед.

Единственным каталогом, сравнимым по точности с Hipparcos был наш Тянь-Шаньский каталог (см. раздел 1.7, табл. 1.3a, 1.3b). Поэтому, естественно, возникло желание сравнить величины общих звезд, входящих в оба этих каталога.

3.2. Перевод величин из одной фотометрической системы в другую.

На примере каталога величин H_r и Тянь-Шаньского каталога покажем способ сравнения каталогов, выполненных в разных фотометрических системах.

Чтобы получить оценку внешней точности какого-либо фотометрического каталога нужно иметь по крайней мере еще один каталог, причем внутренняя точность этих каталогов должна быть примерно одинаковой. Для сравнения величин в двух каталогах необходимо, прежде всего, перевести величины первого каталога в фотометриче-

скую систему второго. Если общих звезд в этих каталогах мало, то для такого перевода необходимо иметь представление о распределении энергии в спектрах звезд, величины которых следует переводить, и хорошо знать кривые реакции обеих систем. Тогда перевод осуществляется по второй основной формуле гетерохромной фотометрии (см. Приложение Б8.2). В тех же случаях, когда в сравниваемых каталогах есть много общих звезд разных спектральных типов, а фотометрические измерения выполнены в многоцветной системе с высокой точностью, становится возможным построить эмпирическую формулу перевода.

На рисунке 3.1 показана зависимость разности $(H_p - V)$ от показателя цвета $(B - V)$. (Здесь и далее, если не указано иное, используются W , B , V и R из Тянь-Шаньского каталога).

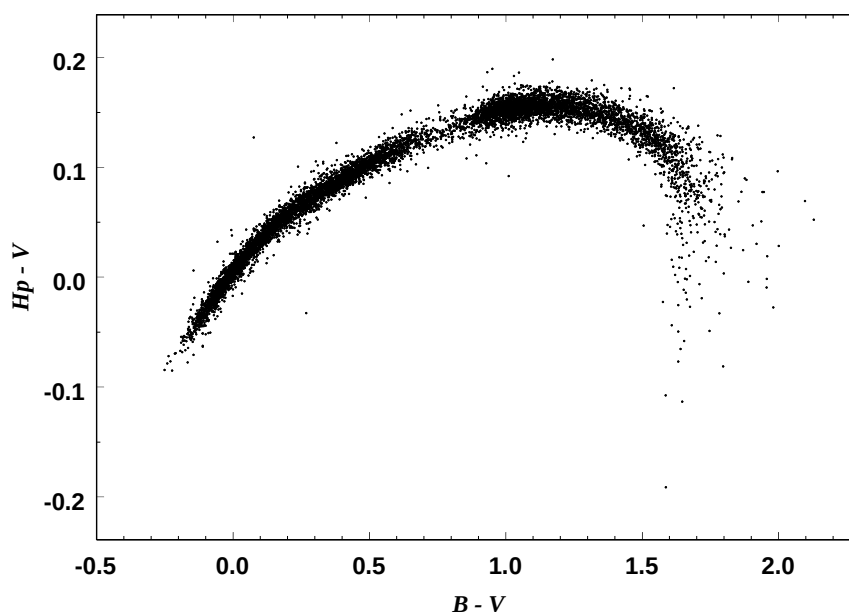


Рисунок. 3.1. Зависимость разности $H_p - V$ от показателя цвета $(B - V)$.

Ширина полосы рассеяния точек на рис. 3.1 в основном не превышает $0^m,025$, так что систематические различия между каталогами нужно ожидать на уровне нескольких тысячных долей звездной величины. На

первый взгляд это очень малая величина. Однако подчеркнем, что речь идет о систематической ошибке, величина которой не убывает с увеличением числа наблюдений.

Если применять несколько показателей цвета, то, разумеется, модель трансформации звездных величин будет более точной. На первом этапе исследований [Захаров, Миронов, Крутяков, 2000; Крутяков, Миронов, Захаров, 2000] мы принимали модель уравнения перевода величин W , B , V и R в величины H_p , B_T и V_T в форме полинома первой или второй степени от величины V плюс полный кубический полином от трех показателей цвета $(W - B)$, $(B - V)$ и $(V - R)$. Например, для аппроксимации разности $(H_p - V)$ модель имела вид

$$(H_p - V) = \text{const} + a_0 V + f(W - B, B - V, V - R), \quad (3.1)$$

где

$$\begin{aligned} f(W - B, B - V, V - R) = & \\ & = a_1 (W - B)^3 + a_2 (B - V)^3 + a_3 (V - R)^3 + \\ & + a_4 (W - B)^2 (B - V) + a_5 (W - B)^2 (V - R) + \\ & + a_6 (W - B) (B - V)^2 + a_7 (B - V)^2 (V - R) + \\ & + a_8 (W - B) (V - R)^2 + a_9 (B - V) (V - R)^2 + \\ & + a_{10} (W - B) (B - V) (V - R) + \\ & + a_{11} (W - B)^2 + a_{12} (B - V)^2 + a_{13} (V - R)^2 + \\ & + a_{14} (W - B) (B - V) + a_{15} (W - B) (V - R) + \\ & + a_{16} (B - V) (V - R) + \\ & + a_{17} (W - B) + a_{18} (B - V) + a_{19} (V - R). \end{aligned}$$

Система уравнений (3.1) содержит 21 неизвестный коэффициент.

После исключения известных переменных и двойных звезд мы оставляли в рассмотрении выборку объемом от 7000 до 9000 объектов. Далее решалась система (3.1) и определялись коэффициенты полинома.

Решение системы уравнений производилось с помощью вычислительного ресурса, включенного в графо-вычислительный пакет AXUM, версия 5 (продукт MathSoft. Inc), в котором реализован метод Левенберга-Маркгардта (см. монографию Гилла, Мюррея и Райта, [1985]). Программа, встроенная в этот пакет, позволяет найти коэффициенты модели и определить их значимость. После каждого очередного цикла решения член с коэффициентом, значимость которого была наименьшей, отбрасывался, и решение производилось снова. Этот процесс продолжался до тех пор, пока все оставшиеся коэффициенты не становились значимыми.

Решением считались наборы коэффициентов, обеспечивающие минимумы функционалов

$$\begin{aligned}\sum \left[(Hp - V)_{\text{obs}} - (Hp - V)_{\text{calc}} \right]^2 &= \min, \\ \sum \left[(V_T - V)_{\text{obs}} - (V_T - V)_{\text{calc}} \right]^2 &= \min, \\ \sum \left[(B_T - V)_{\text{obs}} - (B_T - V)_{\text{calc}} \right]^2 &= \min,\end{aligned}\tag{3.2}$$

где суммирование производится по всем звездам выборки.

В процессе решения системы уравнений (3.1) многие коэффициенты оказывались незначимыми. Отметим, что при аппроксимации разности $(Hp - V)$, в числе первых были удалены члены с коэффициентами при всех порядках величины V . Это свидетельствует о том, что при выводе величин Hp и V авторами обоих каталогов были правильно учтены все нелинейные члены зависимости регистрируемого сигнала от потока излучения.

По результатам вычислений по формулам (3.1) из предварительной выборки были дополнительно удалены звезды, имеющие грубые ошибки в определении звездных величин. Грубыми ошибками считались случаи, когда разность $\Delta_{Hp,V} = (Hp - V)_{\text{obs}} - (Hp - V)_{\text{calc}}$ по модулю превышала $0^m,1$. В большинстве случаев грубые ошибки относились к случа-

ям неправильного отождествления компонентов двойных систем, имеющих одинаковые номера в каталогах HD или Hipparcos. В ряде случаев удавалось восстановить правильное отождествление, и тогда звезда оставалась в списке, если считалось, что можно пренебречь влиянием второго компонента на определение звездной величины.

После того, как были вычислены три разности

$$\begin{aligned}\Delta_{\text{Hp},V} &= (Hp - V)_{\text{obs}} - (Hp - V)_{\text{calc}}, \\ \Delta_{\text{Hp},V_T} &= (Hp - V_T)_{\text{obs}} - (Hp - V_T)_{\text{calc}}, \\ \Delta_{V_T,V} &= (V_T - V)_{\text{obs}} - (V_T - V)_{\text{calc}},\end{aligned}$$

были вычислены дисперсии величин $\Delta_{\text{Hp},V}$, Δ_{Hp,V_T} , и $\Delta_{V_T,V}$. В предположении о независимости случайных величин Hp , V_T и V дисперсия разности равна сумме индивидуальных дисперсий этих величин. Для рассматриваемого случая нами было получено

$$\begin{aligned}\sigma_{\Delta(\text{Hp}-V)}^2 &= \sigma_{\text{Hp}}^2 + \sigma_V^2 = (0,005332)^2, \\ \sigma_{\Delta(\text{Hp}-V_T)}^2 &= \sigma_{\text{Hp}}^2 + \sigma_{V_T}^2 = (0,006716)^2, \\ \sigma_{\Delta(V_T-V)}^2 &= \sigma_{V_T}^2 + \sigma_V^2 = (0,008653)^2.\end{aligned}\tag{3.2}$$

При попытке решить систему уравнений (3.2), относительно значений σ_{Hp}^2 , $\sigma_{V_T}^2$ и σ_V^2 сразу выяснилось, что у нее нет решений, имеющих смысл: значение σ_{Hp}^2 оказалось отрицательным. Это может быть, если некоторые из случайных величин не являются независимыми.

Величины Hp и V были получены по совершенно разным методикам, в разное время, в космосе и на Земле. Поэтому их ошибки наверняка можно считать независимыми. Тогда зависимыми следует считать величины Hp и V_T и вместо второго уравнения в системе (3.2) нужно записать:

$$\sigma_{\Delta(Hp-V_T)}^2 = \sigma_{Hp}^2 + \sigma_{V_T}^2 - 2 \text{cov}\{Hp, V_T\} = (0,006716)^2.$$

Поскольку есть основания считать ошибки космических и наземного каталогов независимыми, ковариации $\text{cov}\{Hp, V\}$ и $\text{cov}\{V_T, V\}$ можно считать равными нулю, и первое и третье уравнения в системе (3.2) оставить в прежнем виде.

Полученную систему из трех уравнений с четырьмя неизвестными, разумеется, решить нельзя. Но можно сделать ряд выводов, рассматривая разные предположения относительно дисперсии величины V Тянь-Шаньского каталога. Результаты таких расчетов показаны в табл. 3.4.

Таблица 3.4.
Дисперсия звездных величин в трех каталогах при разных гипотезах о дисперсии V . В последнем столбце коэффициент линейной корреляции величин Hp и V_T .

σ_V^2	σ_{Hp}^2	$\sigma_{V_T}^2$	$2 \text{cov}\{Hp, V_T\}$	$\rho_{\text{corr}}\{Hp, V_T\}$
$(0,003000)^2$	$(0,004408)^2$	$(0,008116)^2$	$(0,000040082)^2$	0,56
$(0,003500)^2$	$(0,004022)^2$	$(0,007914)^2$	$(0,000025502)^2$	0,50
$(0,004000)^2$	$(0,003526)^2$	$(0,007673)^2$	$(0,000026204)^2$	0,48
$(0,004500)^2$	$(0,002860)^2$	$(0,007391)^2$	$(0,000017699)^2$	0,42
$(0,005000)^2$	$(0,001852)^2$	$(0,007062)^2$	$(0,000016386)^2$	0,33
$(0,005200)^2$	$(0,001179)^2$	$(0,006916)^2$	$(0,000004117)^2$	0,25
$(0,005255)^2$	$(0,000900)^2$	$(0,006874)^2$	$(0,000002958)^2$	0,24
$(0,005332)^2$	$(0,000000)^2$	$(0,006815)^2$	$(0,000001339)^2$	—

Из рассмотрения этой таблицы следует несколько выводов. Во-первых, стандартная ошибка Тянь-Шаньских величин V не может быть больше, чем 0,005332. Реально она должна быть заметно меньше. Во-вторых, стандартная ошибка величин V_T из каталога Tycho не может быть меньше, чем 0,006815, что значительно превышает величину внутренней случайной ошибки, приводимой авторами Tycho для звезд седьмой величины (см. табл. 3.3). И, в-третьих, между величинами Hp и V_T существует заметная корреляция, что, по всей вероятности, свидетельствует о наличии общих источников систематических ошибок для двух космических катало-

гов. У авторов Тянь-Шаньского каталога есть основания полагать, что стандартная ошибка средних величин V в этом каталоге не превышает $0^m,004$ (а наиболее вероятно, что она равна $0^m,002-0^m,003$). Тогда из табл. 3.4 следует, что фотометрические ошибки средних величин в каталоге Hipparcos заключены в этих же пределах. То есть, как в отношении индивидуальных оценок блеска, так и отношении средних каталог Hipparcos (космический) и Тянь-Шаньский каталог (наземный) имеют примерно одинаковую внешнюю точность.

3.3. Систематические ошибки фотометрии, зависящие от небесных координат.

В ходе вычислений выяснилось, что для всех трех каталогов сумма квадратов остающихся отклонений существенно превышает сумму квадратов внутренних ошибок каталогов. Использование полиномов более высоких степеней не приводило к уменьшению дисперсии остатков. Мы сочли эти факты указанием на то, что в измерениях присутствуют систематические ошибки, не зависящие от звездной величины и показателей цвета, и предположили, что кроме них в уравнение связи фотометрических систем следует включить члены, зависящие от небесных координат. В самом деле, звездные величины в каталогах могут иметь ошибки, связанные с эффектами методического и аппаратного происхождения, зависящими от небесных координат. Поэтому на втором этапе расчетов [Миронов, Захаров, 2002; Захаров, Миронов, Крутяков, 2004] в модель уравнения перевода W , B , V и R в величины H_p , B_T и V_T был добавлен полный кубический полином от синусов и косинусов экваториальных координат. Мы определили также две обратные функции, аппроксимирующие величины B и V величинами H_p , B_T и V_T . Для этих функций в качестве мо-

дели принимались полиномы 5-й степени по показателям цвета ($H_p - V_T$) и ($B_T - V_T$).

Если обозначить часть полинома, зависящую от звездной величины и показателей цвета через f , а часть, зависящую от координат, через g , то наши уравнения примут вид

$$\begin{aligned}(H_p - V)_{\text{calc}} &= f_{H_p}(W, B, V, R) + g_{\text{WBVR}}^{H_p-V}(\alpha, \delta), \\ (V_T - V)_{\text{calc}} &= f_V(W, B, V, R) + g_{\text{WBVR}}^{V_T-V}(\alpha, \delta), \\ (B_T - V)_{\text{calc}} &= f_B(W, B, V, R) + g_{\text{WBVR}}^{B_T-B}(\alpha, \delta),\end{aligned}\tag{3.3}$$

После отбрасывания грубых ошибок были заново определены внутренние точности во всех рассматриваемых каталогах и окончательно решены уравнения вида (3.3). В таблице В4 в Приложении «В» приведены коэффициенты уравнения, аппроксимирующего разность ($H_p - V$) величинами W, B, V и R, α и δ .

Стандартные отклонения измерений от величин, вычисленных по формулам (3.3) с коэффициентами из таблицы В4 равны

$$\begin{aligned}\sigma[(H_p - V)_{\text{obs}} - (H_p - V)_{\text{calc}}] &= 0^{\text{m}},00482, \\ \sigma[(V_T - V)_{\text{obs}} - (V_T - V)_{\text{calc}}] &= 0^{\text{m}},00444, \\ \sigma[(B_T - V)_{\text{obs}} - (B_T - V)_{\text{calc}}] &= 0^{\text{m}},00888.\end{aligned}\tag{3.4}$$

Остаточные уклонения $(H_p - V)_{\text{obs}} - (H_p - V)_{\text{calc}}$ не показывают зависимости от показателей цвета. Это иллюстрирует рисунок 3.2.

В противоположность этому существует слабая зависимость величин $\Delta_{V_T, V} = (V_T - V)_{\text{obs}} - (V_T - V)_{\text{calc}}$ и $\Delta_{B_T, V} = (B_T - V)_{\text{obs}} - (B_T - V)_{\text{calc}}$ от величины V , что указывает на наличие небольшой нелинейности величин B_T и V_T порядка $0^{\text{m}},001$ на одну звездную величину.

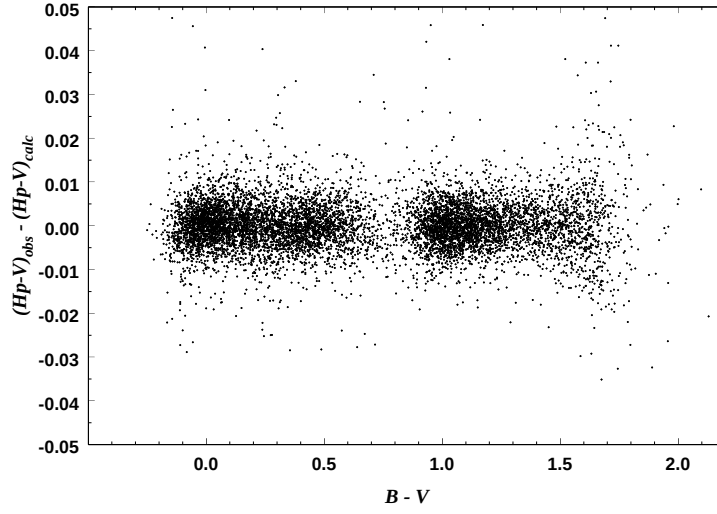


Рисунок 3.2. Зависимость остаточных уклонений $(Hp - V)_{\text{obs}} - (Hp - V)_{\text{calc}}$ от показателя цвета $B - V$.

Интересно, также, что была обнаружена малая, но значимая корреляция между отклонениями индивидуальных одновременных измерений величин V_T и B_T от своих средних. Коэффициент корреляции равен $\rho_{B_T, V_T} \cong 0.1$. Это свидетельствует о том, что результаты измерений величин V_T и B_T подвергались одинаковому влиянию некоторой возмущающей причины, которая либо имела аппаратный характер, либо возникла в процессе обработки данных.

В заключение данного раздела сделаем замечание, относительно величины V_J , помещенной в каталоге Hipparcos. По замыслу авторов этого каталога величина V_J является переводом величин H_p в систему V Джонсона. Перевод осуществлялся по формулам, приведенным в документации к каталогу Hipparcos, а необходимые сведения о показателях цвета брались из исходного каталога Hipparcos Input Catalogue или из каталога Tycho. Опубликованная величина V_J в самом деле близка к величинам V Джонсона, однако содержит систематическую ошибку, зави-

сящую от показателей цвета. Это показано на рис. 3.3, где разность $V - V_J$ (значения V выбирались из Тянь-Шаньского каталога WBVR-величин) сопоставлена с показателем цвета $(B - V)$. На рисунке хорошо виден волнистый тренд, который в первом приближении может быть аппроксимирован полиномом по степеням показателей цвета $(W - B)$, $(B - V)$ и $(V - R)$.

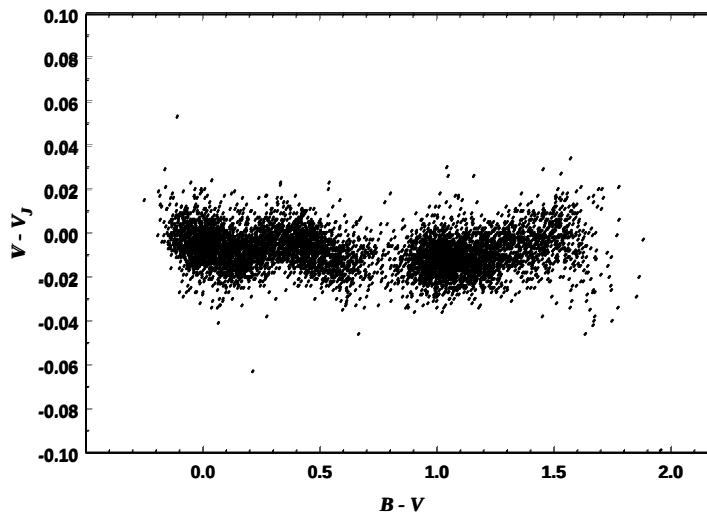


Рисунок 3.3. Зависимость разности величин $V - V_J$ от показателя цвета $(B - V)$. Хорошо видно влияние систематической ошибки, имеющей «волнистый» характер.

На рис. 3.4 и 3.5 показано поведение функций $g_{\text{WBVR}}^{\text{Hp-V}}(\alpha, \delta)$ и $g_{\text{WBVR}}^{V_T-V}(\alpha, \delta)$ в зависимости от экваториальных и эклиптических координат. Напомним, что эти функции являются координатно-зависимыми частями общих функций трансформации звездных величин из фотометрической системы WBVR в системы Hp и V_T .

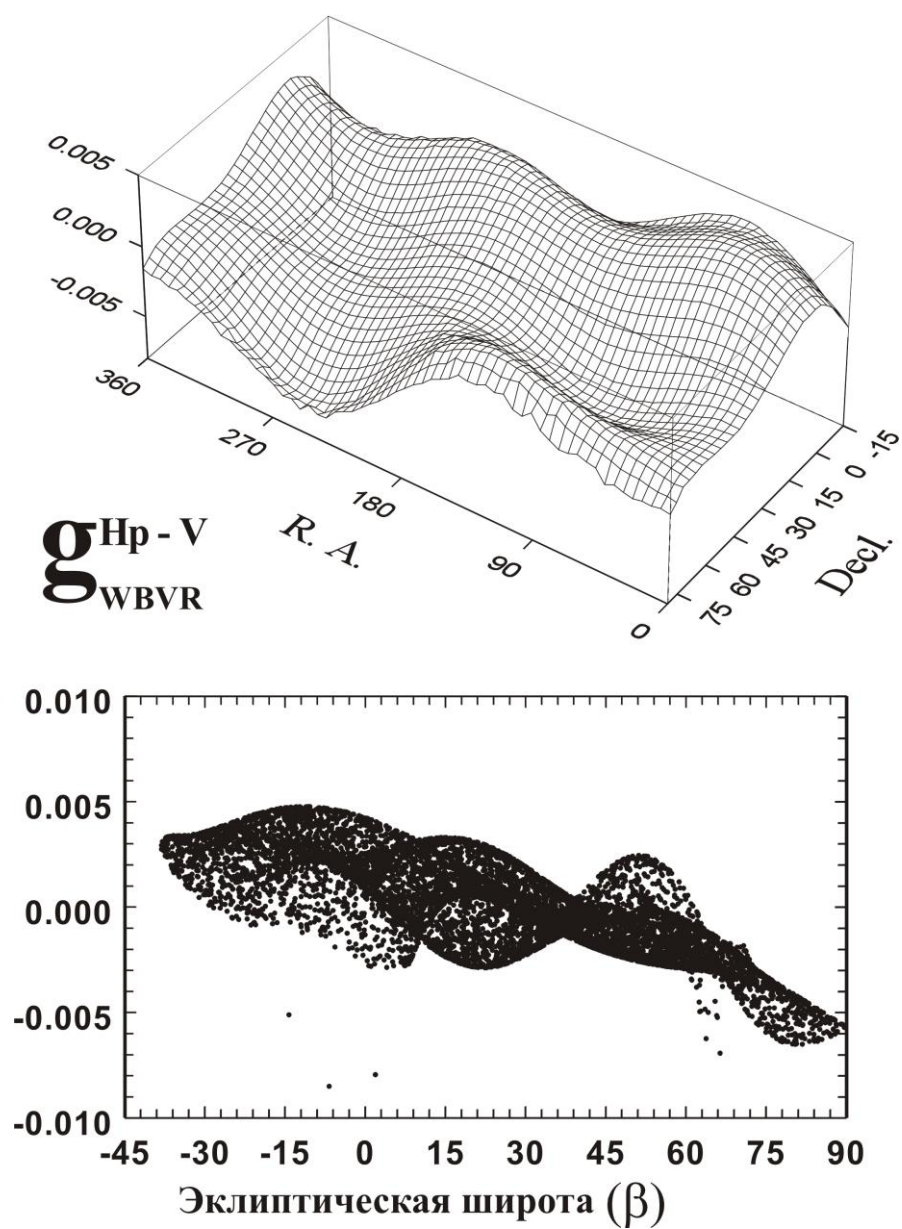


Рисунок. 3.4. Зависящая от координат часть $g_{WBVR}^{H_p - V}(\alpha, \delta)$ функции перевода величин WBVR-каталога в величину H_p .

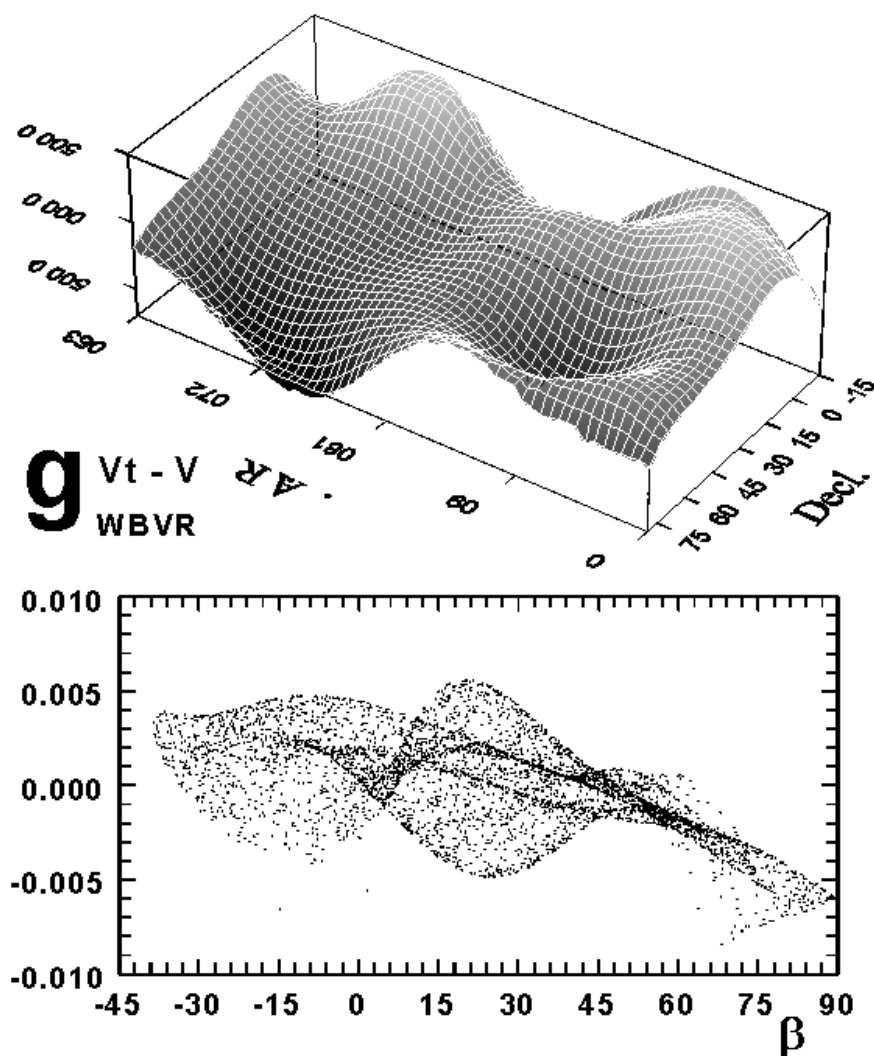


Рисунок. 3.5. Зависящая от координат часть $g_{WBVR}^{V_t-V}(\alpha, \delta)$ функции перевода величин WBVR-каталога в величину V_t .

На рисунках ясно выделяются три особенности.

- минимум при $\alpha = 90^\circ$, $\delta = +45^\circ$;
- двойная волна при $0 < \alpha < 360^\circ$, $\delta \approx 0^\circ$ и
- резкий обрыв при $\alpha = 270^\circ$, $\delta = +67^\circ$.

Максимальная амплитуда этих особенностей составляет $\pm 0^m,005$.

это в 5 раз превышает внутреннюю ошибку величин H_p в звездах 7 ве-

личины, и в 1,5 раза — внутреннюю ошибку величин V из Тянь-Шаньского каталога $WBVR$ -величин.

Особенность при $\alpha = 90^\circ = 6^h$, $\delta = +45^\circ$ скорее всего является систематической ошибкой, принадлежащей Тянь-Шаньскому каталогу. Эта зона проходит через зенит Тянь-Шаньской обсерватории в осенние и зимние месяцы. Именно тогда, в период с августа по февраль, в Заилийском Алатау наблюдается максимум ясной ночной погоды с очень высокой и устойчивой прозрачностью атмосферы. В это время звезды с прямыми восхождениями от 22^h до 24^h и, далее, от 0^h до 10^h можно измерять близко к моменту их верхней кульминации. Координата $\alpha = 90^\circ = 6^h$ приходится примерно на середину этого интервала. Программные звезды наблюдались преимущественно вблизи меридиана, а звезды со склонением, близким к широте обсерватории, — вблизи зенита, следовательно, в наилучших, а не в средних условиях. Это могло послужить причиной возникновения систематической ошибки.

Вторая особенность — двойная волна вблизи небесного экватора и на более низких склонениях. Такая систематическая ошибка, вероятно, также принадлежит каталогу $WBVR$ -величин. Эти звезды наблюдались при достаточно больших воздушных массах, и в конечные результаты могла войти ошибка не вполне правильного учета атмосферной экстинкции, разная в разное время года.

Наконец, третья особенность — это резкий обрыв функций $g(\alpha, \delta)$ около $\alpha = 270^\circ$, $\delta = +67^\circ$. Она относится к области около северного полюса эклиптики. Поведение функции $g(\alpha, \delta)$ еще лучше видно, если построить соответствующую зависимость от эклиптической широты β , как показано на нижних панелях рис. 3.4 и 3.5. Полюс эклиптики ни в какой степени не был особой точкой при наземных наблюдениях в Тянь-Шаньской обсерватории. При создании наземного каталога $WBVR$ -величин не было причин, которые могли бы вызвать систематическую

ошибку, имеющую особенность в эклиптических координатах. Напротив, процедура сканирования неба, применявшаяся на спутнике Hipparcos, была связана с эклиптическими координатами и соответствующая систематическая ошибка могла войти в звездные величины, получаемые в экспериментах Hipparcos и Tycho. На верхней панели рис. 3.6 показана зависимость количества наблюдений звезд в каталоге Hipparcos от эклиптической широты β . Звезды в области эклиптики наблюдались минимальное число раз: от 50 до 100. В зоне эклиптических широт $40^\circ < \beta < 60^\circ$ количество наблюдений звезд резко возрастает, достигая в среднем числа 250. В полярных областях число наблюдений снова относительно убывает и становится равным примерно 120. Ясно видно, что линия, проведенная по широте около 46° , делит точки на графике на две группы. Эти группы возникли как следствие закона сканирования. На нижней панели рис. 3.6 показана средняя юлианская дата наблюдений каждой звезды в зависимости от ее эклиптической широты. Видно, что объекты, близкие к полюсу эклиптики, наблюдались в иных условиях, чем остальные звезды. Такое неоднородное распределение наблюдений по времени могло стать источником найденной систематической ошибки.

Не следует думать, что найденные систематические ошибки малы и пренебрежимы. Будущие космические обзоры, такие как GAIA, имеют целью получить координаты и параллаксы звезд с точностью порядка 10–100 угловых микросекунд. Это требует, чтобы сопутствующая фотометрия была выполнена с очень высокой точностью, как в случайном, так и в систематическом отношении.

Например, необходимо иметь в виду, что такие инструментальные эффекты, как остаточные внеосевые абберрации зависят от длины волны. Наличие этих абберраций является общим свойством оптических систем, даже чисто зеркальных. Такие абберрации ответственны за смещение по-

ложения максимума интенсивности светового пятна, создаваемого звездой на светочувствительной поверхности. Чтобы учесть этот эффект с точностью порядка десятков угловых микросекунд нужно знать показатели цвета каждой звезды с погрешностью менее $0^m,01$.

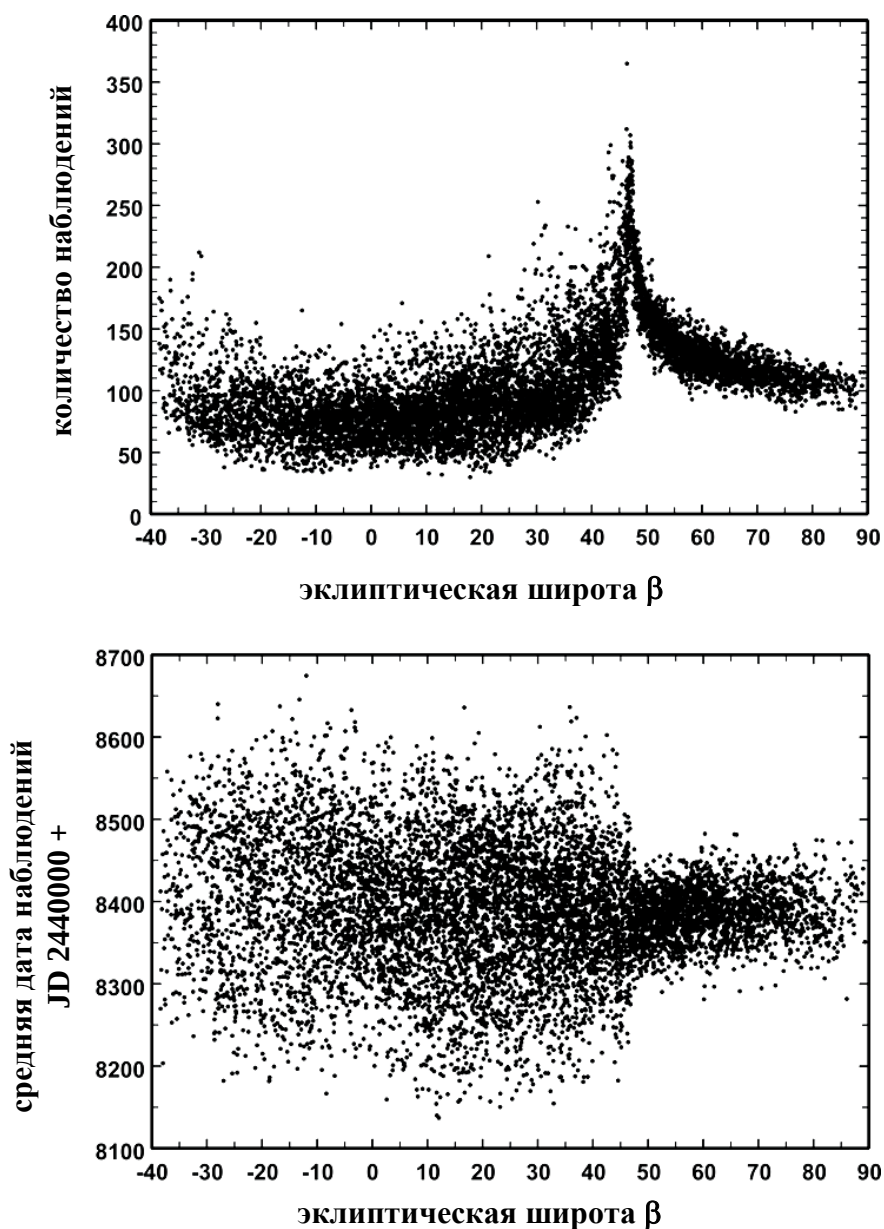


Рисунок 3.6. Свойства каталога Hipparcos, связанные с небесными координатами. Верхняя панель: количество наблюдений звезды в зависимости от эклиптической широты. Нижняя панель: средняя дата наблюдений звезды против эклиптической широты.

3.4. Подбор кандидатов в состав системы фотометрических стандартов

В результате нашей работы [Крутяков, Миронов, Захаров, 2000; Миронов, Захаров, 2002; Захаров, Миронов, Крутяков, 2004] был сделан первый шаг к созданию обширной системы фотометрических стандартов в области неба от северного полюса до склонения, равного минус 15° . Все звезды нашей выборки можно считать вероятными кандидатами на роль фотометрических стандартов. На рис. 3.7 показано распределение по небесной сфере наших кандидатов в стандарты.

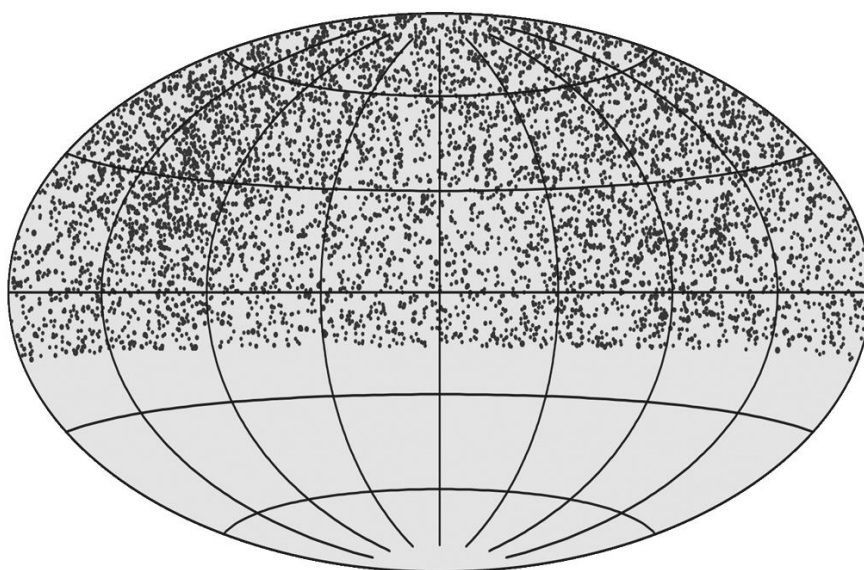


Рис. 3.7. Распределение по небесной сфере «наших» кандидатов в стандарты.

Поскольку эти звезды допускают перевод из одной фотометрической системы в другую с высокой точностью, это говорит о том, что распределение энергии в их спектрах не содержит особенностей, препятствующих этой трансформации. Очевидно, что величины этих звезд также уверенно можно переводить и в другие фотометрические системы

После учета найденных систематических ошибок среднеквадратическая ошибка величин V для этих стандартов не должна превышать $0^m,002$.

3.5. Предвычисление звездных величин в системе типичного фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью

3.5.1. Постановка задачи.

Существует широкий класс астрономических задач, когда наблюдения небесных объектов ведется в единственной фотометрической полосе, кривая реакции которой определяется, в основном, спектральной чувствительностью приемника излучения. В общем случае для каждого приемника, характеризуемого своей кривой реакции, требуется составить специальный каталог опорных звезд, в котором звездные величины приведены в фотометрическую систему применяемого приемника. При составлении специальных каталогов должна быть решена задача вычисления величин звезд в заранее заданной спектральной полосе. Одним из важнейших случаев является ситуация, когда требуется проводить фотометрические измерения искусственных небесных тел.

Если для опорной звезды известна спектральная плотность энергетического потока излучения в подходящем спектральном диапазоне, то такая задача не представляет сложности. В действительности же распределение энергии в спектре известно только для 2–3 тысяч ярких звезд. Этого явно недостаточно для составления специальных каталогов.

В последние годы при разговоре о составлении специального каталога звездных величин в широкополосной фотометрической системе, соответствующей спектральной чувствительности некоторого приемника излучения, обычно речь идет о кривой реакции одной из разновидно-

стей приемников на основе кремниевых матриц приборов с зарядовой связью. Разумеется, прямым способом решения этой задачи является проведение астрономических наблюдений необходимых звезд с этим приемником. Однако это трудный и долгий способ, а в некоторых случаях, когда, например, нужно провести наблюдения вне атмосферы Земли, он вообще неосуществим практически. Следовательно, требуется произвести математический расчет звездных величин в системе заданного приемника на основе данных о распределении энергии в спектрах звезд и о звездных величинах в различных фотометрических полосах, содержащихся в имеющихся каталогах фотометрических характеристик звезд. Отметим, что поскольку спектральная чувствительность кремниевого приемника простирается в ближнюю инфракрасную область спектра, для такого расчета желательно иметь каталоги, в которых были бы приведены звездные величины в фотометрических полосах R и I

3.5.2. Расчет звездных величин в фотометрической системе кремниевой матрицы ПЗС

Опишем методику расчета величин звезд в системе типового широкополосного приемника на конкретном примере [Захаров, Колесниченко, Миронов и др., 2008]. Пусть требуется получить звездные величины и показатели цвета для некоторого списка звезд в фотометрической системе, определяемой кривой реакции обозначенной нами R_M и показанной на рисунке 3.8. Эта кривая соответствует типичной кремниевой матрице ПЗС с прямой засветкой. Будем считать, что непосредственных измерений в полосе R_M , как и данных о распределении энергии в спектрах звезд нашего списка не существует. Однако имеются данные

о звездных величинах каждой из этих звезд в одном или нескольких каталогах, перечисленных в таблице 3.5.

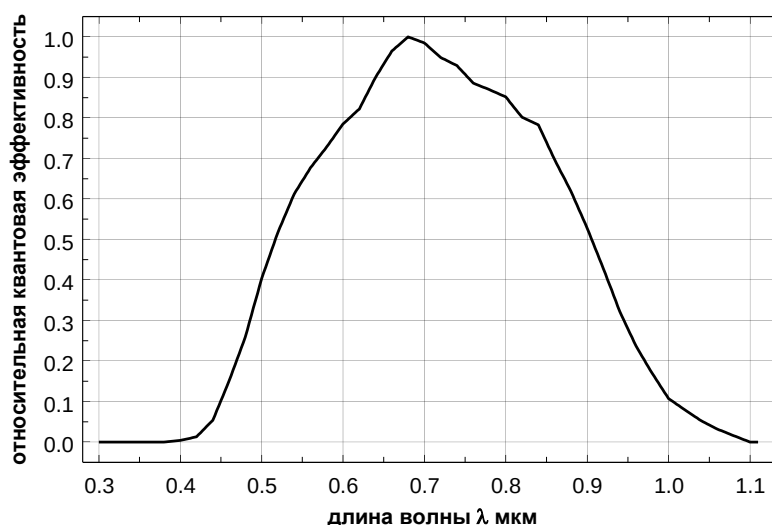


Рис. 3.5. Кривая реакции типичной матрицы приборов с зарядовой связью, работающей в режиме с прямой засветкой

Таблица 3.5. Используемые каталоги

Название каталога и ссылка	Спектральные полосы или интервалы длин волн
Пулковский спектрофотометрический каталог (ПСК). Алексеева и др., 1996	320 – 1080 нм
Next Generation Spectral Library (NGSL). Грегг и др., 2005	295 – 1020,5 нм
Hipparcos, Tycho-1, Tycho-2. ESA 1977	H_p, B_T, V_T
Тянь-Шаньский WBVR каталог ГАИШ. Корнилов и др., 1991, [6]	W, B, V, R
Двухмикронный каталог 2MASS, Кутри и др., 2003	J, H, K
13-цветная фотометрия Джонсон и Митчелл, 1975 Шустер 1976	“33”, “35”, “37”, “40”, “45”, “52”, “58”, “63”, “72”, “80”, “86”, “99”, “110”
VRI фотометрия южных звезд Кузинс, 1980a, 1980b	V, R, I

Для всех звезд, входящих в Пулковский спектрофотометрический каталог (ПСК) [Алексеева и др., 1996] и каталог Next Generation Spectral Library (NGSL) [Грегг и др., 2005], по формуле (Б8.1) были вычислены звездные величины в фотометрических полосах “40”, “45”, “52”, “58”,

“63”, “72”, “80”, “86” и “99” Аризонской системы [Джонсон и Митчелл, 1975; Шустер 1976], и W , B , V , R системы Тянь-Шаньского каталога [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991]. Таким же образом были вычислены величины M , в полосе R_M . Для определения нуля-пункта использовалось распределение энергии в спектре Веги, которой во всех фотометрических полосах была приписана звездная величина, равная ее величине в полосе V , т.е. $V_{\text{Вега}} = +0^{\text{m}},028$. Для того чтобы приблизить модельные звездные величины к наблюдаемым, при интегрировании были использованы как непосредственно наблюдаемые спектральные плотности энергетической освещенности (СПЭО) звезд на верхней границе земной атмосферы, так и покраснённые в соответствии с законом межзвездного покраснения для случайных значений количества межзвездного вещества X . Распределение случайной величины X соответствовало положительной ветви нормального закона с центром $X_0 = 0,001$ и стандартным отклонением 0,2.

В результате этих вычислений появилась возможность найти уравнения связи между величиной M и величинами из Тянь-Шаньского каталога [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991] и каталогов Джонсона и Митчелла [1975] и Шустера [1976], содержащие звездные величины в среднеполосной Аризонской фотометрической системе. Кроме того, были привлечены два каталога Кузинса [1980a, 1980b] содержащие звездные величины в широкополосной системе VRI .

Построение полиномов производилось так же, как было описано в разделе 3.2. То есть сначала в качестве модельного полинома принималась формула полного куба от всех независимых показателей цвета и искалось решение методом Левенберга-Маркгардта (см. монографию Гилла, Мюррея и Райта, [1985]). После каждого очередного цикла решения член с коэффициентом, значимость которого была наименьшей, отбрасывался, и

решение производилось снова. Этот процесс продолжался до тех пор, пока все оставшиеся коэффициенты не становились значимыми.

В результате были получены формулы (3.5) и (3.6) для Тянь-Шаньского каталога и для Аризонского каталога, соответственно.

$$M-V = a_M + b_M(V-R) + c_M(V-R)^2 + f_M(W-B) + g_M(W-B)^2 + k_M(B-V); \quad (3.5)$$

$$a_M = -0,008466; \quad b_M = -0,564208; \quad c_M = -0,200755; \quad f_M = -0,012227;$$

$$g_M = 0,000129; \quad k_M = 0,014983; \quad \sigma_M = 0,013.$$

$$M-m_{80} = a_M + b_M(m_{52-80}) + c_M(m_{52-80})^2 + d_M(m_{52-80})^3 + e_M(m_{52-80})^4 + \quad (3.6)$$

$$+ f_M(m_{40-52}) + g_M(m_{45-52}) + h_M(m_{52-58}) + k_M(m_{52-63});$$

$$a_M = -0,006922; \quad b_M = 0,660533; \quad c_M = -0,105767; \quad d_M = 0,017736;$$

$$e_M = -0,002623; \quad f_M = -0,031265; \quad g_M = -0,048694;$$

$$h_M = -0,178177; \quad k_M = -0,048835; \quad \sigma_M = 0,010.$$

После коэффициентов полинома везде приведено среднеквадратичное отклонение σ_M разности в левой части уравнений и значений полинома.

По формулам (3.5) и (3.6) были вычислены величины M для 13586 звезд Тянь-Шаньского каталога WBVR-величин, для 1380 звезд из каталога Джонсона-Митчелла и 600 звезд из каталогов Шустера. Из числа 13586 звезд Тянь-Шаньского каталога и 1980 звезд двух каталогов в Аризонской системе 1176 звезд перекрываются с каталогами Кузинса, выполненными в системе *VRI*. По этим общим звездам были выведены два уравнения связи (3.7a) и (3.7b):

$$I-M = a_M + b_M(V-R) + c_M(V-I) + d_M(V-R)^2 + e_M(V-I)^2 + \quad (3.7a)$$

$$+ f_M(V-R)(V-I) + g_M(V-R)^3 + h_M(V-I)^3 + k_L(V-R)^2(V-I) + m_L(V-R)(V-I)^2;$$

$$a_M = 0,008995; \quad b_M = 0,194800; \quad c_M = -0,693607; \quad d_M = 5,715883;$$

$$e_M = 1,123864; \quad f_M = -4,949730; \quad g_M = -16,060051; \quad h_M = 1,066961;$$

$$k_M = 19,578116; \quad m_M = -7,887788; \quad \sigma_M = 0,032;$$

и

$$\begin{aligned}
 I - M &= b_0 + b_1(V-I) + b_2(V-I)^2 + b_3(V-I)^3 + b_4(V-I)^4 + b_5(V-I)^5; & (3.7b) \\
 b_0 &= 0,005982; \quad b_1 = -0,589130; \quad b_2 = 0,169026; \quad b_3 = -0,072776; \\
 b_4 &= 0,020774; \quad b_5 = -0,002008; & \sigma_M = 0,006.
 \end{aligned}$$

По формулам (3.7a) и (3.7b) была вычислена величина M для 4449 звезд, имеющих фотометрию в полосах Кузинса. Эти величины были сопоставлены с величинами H_p , B_T и V_T из каталогов Hipparcos и Tycho [ESA 1997] и величинами J , H , K из каталога 2MASS [Кутри и др., 2003].

Как правило, фотометрические данные для конкретной звезды списка содержатся не во всех каталогах, перечисленных в таблице 3.5, а только в части их, или только в каком-нибудь одном. Поэтому нужно иметь несколько вариантов формул для расчета величин M в зависимости от имеющихся исходных данных. Более того, различные комбинации этих исходных данных дают возможность сделать несколько оценок звездной величины в системе заданного приемника. Для различных комбинаций звездных величин, содержащихся в каталогах Hipparcos, Tycho и 2MASS были получены пять вариантов полиномов связи:

$$\begin{aligned}
 H_p - M &= a_M + c_M(H_p - K) + e_M(H_p - K)^2 + f_M(H_p - J)(H_p - K) + & (3.8) \\
 &+ g_M(H_p - J)^3 + k_M(H_p - J)^2(H_p - K) + m_M(H_p - J)(H_p - K)^2; \\
 a_M &= 0,020928; \quad c_M = 0,260251; \quad e_M = -0,046874; \quad f_M = 0,063221; \\
 g_M &= 0,120737; \quad k_M = -0,180916; \quad m_M = 0,069066; & \sigma_M = 0,059.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_p - M &= a_M + c_M(V_T - K) + g_M(V_T - J)^3 + h_M(V_T - K)^3 + & (3.9) \\
 &+ k_M(V_T - J)^2(V_T - K) + m_M(V_T - J)(V_T - K)^2; \\
 a_M &= 0,023981; \quad c_M = 0,271802; \quad g_M = 0,218452; \quad h_M = -0,106527; \\
 k_M &= -0,500604; \quad m_M = 0,394637; & \sigma_M = 0,061.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
V_T-M &= a_M + c_M(V_T-K) + e_M(V_T-K)^2 + f_M(V_T-J)(V_T-K) + \\
&\quad + g_M(V_T-J)^3 + h_M(V_T-K)^3 + m_M(V_T-J)(V_T-K)^2; \\
a_M &= 0,014273; \quad c_M = 0,213074; \quad e_M = -0,081844; \quad f_M = 0,134022; \\
g_M &= 0,070899; \quad h_M = 0,069892; \quad m_M = -0,133016; \quad \sigma_M = 0,066.
\end{aligned} \tag{3.10}$$

$$\begin{aligned}
Hp-M &= a_M + c_M(Hp-K) + d_M(B_T-V_T) + f_M(Hp-K)^2 + \\
&\quad + h_M(Hp-J)(Hp-K) + i_M(Hp-J)(B_T-V_T) + j_M(Hp-K)(B_T-V_T) + \\
&\quad + l_M(Hp-K)^3 + m_M(B_T-V_T)^3 + n_M(Hp-J)^2(Hp-K) + \\
&\quad + q_M(Hp-J)(Hp-K)^2 + r_M(Hp-K)^2(B_T-V_T) + t_M(Hp-K)(B_T-V_T)^2; \\
a_M &= 0,022901; \quad c_M = 0,149818; \quad d_M = 0,293373; \quad f_M = -0,166878; \\
h_M &= 0,245424; \quad i_M = -0,360658; \quad j_M = 0,206721; \quad l_M = 0,097634; \\
m_M &= 0,354421; \quad n_M = 0,217305; \quad q_M = -0,332274; \quad r_M = 0,219401; \\
t_M &= -0,490655; \quad \sigma_M = 0,055.
\end{aligned} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
V_T-M &= a_M + b_M(V_T-J) + d_M(B_T-V_T) + e_M(V_T-J)^2 + \\
&\quad + i_M(V_T-J)(B_T-V_T) + k_M(V_T-J)^3 + l_M(V_T-K)^3 + m_M(B_T-V_T)^3 + \\
&\quad + n_M(V_T-J)^2(V_T-K) + p_M(V_T-J)^2(B_T-V_T) + \\
&\quad + q_M(V_T-J)(V_T-K)^2 + r_M(V_T-K)^2(B_T-V_T) + s_M(V_T-J)(B_T-V_T)^2 + \\
&\quad + u_M(V_T-J)(V_T-K)(B_T-V_T)^2; \\
a_M &= 0,024109; \quad b_M = 0,140972; \quad d_M = 0,423305; \quad e_M = 0,081748; \\
i_M &= -0,178412; \quad k_M = -0,707426; \quad l_M = 0,092368; \quad m_M = 0,226876; \\
n_M &= 1,161300; \quad p_M = 1,184797; \quad q_M = -0,621184; \quad r_M = 0,554993; \\
s_M &= -0,398521; \quad u_M = -1,449957; \quad \sigma_M = 0,056.
\end{aligned} \tag{3.12}$$

Все рассмотренные каталоги, кроме 2MASS, не содержат звезд слабее 12-й величины. Поэтому в тех случаях, когда необходимо оценить величины более слабых объектов, приходится пользоваться одним двух-

микронным каталогом. В этом случае нет возможности воспользоваться спектрофотометрическими каталогами, полученными в результате прямых наблюдений звезд. Мы воспользовались атласом средних распределений энергии в звездах различных спектральных типов [Пиклс, 1998].

Зависимость между вычисленными показателями цвета ($M - J$) и ($J - K$) показана на рис. 3.6.

В результате подбора полиномов мы остановились на том, что зависимость нужно представлять двумя функциями: отдельно для $(J-K) \leq 1,05$ и для $(J-K) > 1,05$, а именно:

$$M - J = -0,255991 + 3,698858 (J-K) - 1,211117(J-K)^2;$$

при $(J-K) \leq 1,05$; $\sigma_M = 0,35189$,

и

$$M - J = 29,163013 - 53,236168 (J-K) + 26,327277(J-K)^2;$$

при $(J-K) > 1,05$; $\sigma_M = 0,21637$.

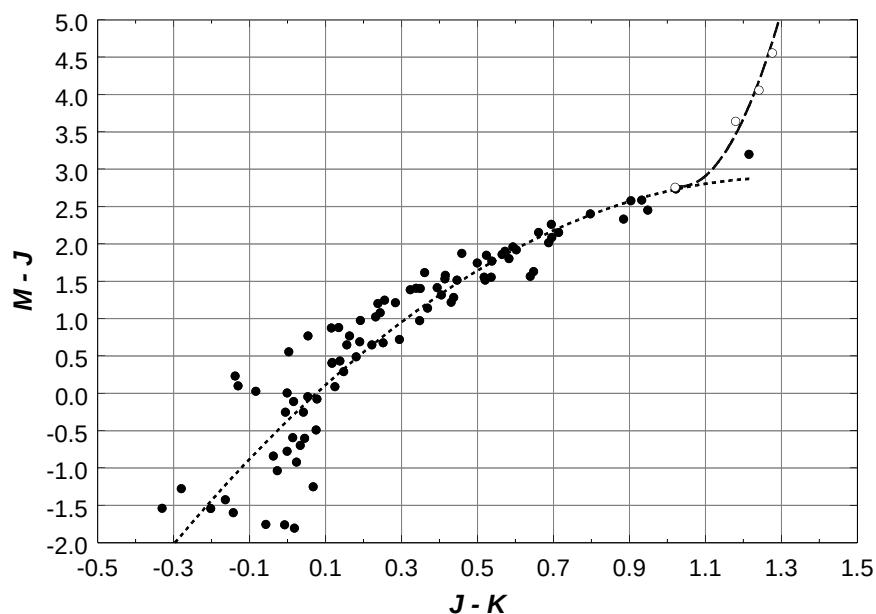


Рисунок 3.6. Связь между показателями цвета ($M - J$) и ($J - K$).

Приведенные формулы позволяют оценивать величины звезд, входящих в каталоги, перечисленные в табл. 3.5, в фотометрической системе типичной кремниевой матрицы ПЗС.

Выводы по Главе 3.

Сравнение величин H_p , B_T и V_T в каталогах Hipparcos и Tycho с величинами $H_{p\text{calc}}$, вычисленными из величины V и показателей цвета $(W - B)$, $(B - V)$ и $(V - R)$ из Тянь-Шаньского каталога, а также сравнение Тянь-Шаньских величин B и V с величинами B_{calc} и V_{calc} , вычисленными из величин H_p и показателей цвета $(H_p - V_T)$, $(H_p - B_T)$ и $(B_T - V_T)$ показали, что погрешности одного измерения величин H_p и V_{WBVR} , найденные по звездам с отсутствием микропеременности и не имеющим пекулярностей в распределениях энергии в спектре примерно одинаковы и оцениваются значением около $0^{\text{m}},002$.

Было показано, что после исключения цветовых членов в остающихся разностях имеется небольшая, но значимая зависимость от небесных координат.

Звезды, показавшие наименьшие различия между наблюдаемыми и вычисленными величинами $H_p - V_{\text{WBVR}}$, могут рассматриваться как наиболее вероятные кандидаты в стандарты на северном небе. К этому вопросу мы вернемся далее в главе 4.

Разработана методика предвычисления звездных величин в фотометрической системе наперед заданного приемника. Методика проиллюстрирована примером предвычисления звездных величин для типичного кремниевого ПЗС.

Глава 4.

Обнаружение переменных звезд при помощи многоцветных фотометрических систем

4.1. Методы открытия переменных звезд при многоканальных наблюдениях.

4.1.1. О перспективах открытия переменных звезд.

До последнего времени переменные звезды открывались, как правило, с помощью блинк-компаратора в ходе просмотра большого количества фотографических пластинок. Некоторые переменные были открыты случайно, когда оказывалось, что для некоторой звезды сделано несколько фотоэлектрических измерений.

Общий Каталог Переменных Звезд (ОКПЗ) в его современном состоянии содержит информацию о примерно сорока восьми тысячах галактических переменных звезд. Среди них только около 9200 имеют величину в максимуме ярче, чем 10.0. Около 32 % из этих ярких переменных были включены в ОКПЗ по результатам анализа данных проекта Hipparcos. В ближайшие годы ожидается реализация новых космических проектов, в том числе такого грандиозного проекта как GAIA [ESA 2000]. В план экспериментов, предполагаемых для проведения на российском сегменте Международной Космической Станции, включен российский проект "Лири-Б" [ЛИРА, 1999], разрабатываемый в ГАИШ МГУ. В его ходе предполагается получить десятицветный фотометрический обзор звезд до 15–16 величины с погрешностями не более 1 про-

цента (подробнее см. главу 5). Новые проекты предусматривают получение астрометрических и фотометрических данных о сотнях миллионов объектов. В числе этих объектов, несомненно, окажутся миллионы (или даже десятки миллионов) переменных звезд. Таким образом, мы стоим на пороге новой эпохи исследований переменных и применения результатов этих исследований для изучения строения и развития звездных систем.

Совершенно очевидно, что традиционные методы обнаружения переменных и установления типа переменности окажутся бессильными перед лицом такого огромного объема информации. Никакой коллектив астрономов физически не сможет, как сейчас, просмотреть глазами все кривые блеска. Уже сейчас настало время разрабатывать способы автоматизированного анализа данных.

У проблемы обнаружения переменных есть и иной аспект. Процесс обнаружения переменных звезд, как правило, не носит систематического характера. Вследствие этого, у нас нет основы для статистического исследования распределения звезд различных типов в Галактике. Ни для какой области неба нельзя утверждать, что *все* переменные в этой области уже открыты. Более того, нельзя сказать, какая *доля* переменных, ярче некоторой величины, уже открыта. В частности, анализ численных экспериментов и фотометрических данных каталогов Hipparcos и Tycho должен подготовить нас к обработке результатов новых космических астрометрических и фотометрических обзоров.

4.1.2. Z-статистика, применявшаяся при обработке данных эксперимента Hipparcos.

Методика автоматического открытия переменных звезд уже была применена при обработке результатов обзора Hipparcos. Закон сканирования небесной сферы спутником Hipparcos был таким, что за трехлет-

ний период измерений каждая звезда проходила через поле зрения и, следовательно, могла быть измерена от 30 до 300 раз (см. выше рисунок 3.6 в главе 3). Среднее количество измерений одной звезды — 110.

Во время прохождения можно было оценить не только величину сигнала, но и, как и в случае наблюдений для Тянь-Шаньского каталога, получить оценку его среднеквадратичной ошибки, сделанную во время накопления. Это можно было сделать, поскольку изображение звезды каждый раз проходило по решетке, состоящей из 2688 щелей, от каждой из которых регистрировался сигнал. В Каталоге Hipparcos для каждого индивидуального прохождения с номером j звезды с номером i приведены звездная величина Hr_{ij} и ее среднеквадратичная ошибка σ_{ij} , оцененная во время накопления.

Для обнаружения переменных звезд авторы Hipparcos использовали следующий статистический параметр.

$$\chi_i^2 = \sum_{j=1}^{N_i} \frac{(Hr_{ij} - \overline{Hr_i})^2}{\sigma_{ij}^2} \quad (4.1)$$

Здесь i — номер звезды, j — номер измерения, N_i — полное число измерений звезды, Hr_{ij} — индивидуальная оценка звездной величины в j -м измерении, и $\overline{Hr_i}$ — медианная величина i -й звезды по всему ряду измерений. (Заметим, что в каталоге Hipparcos в качестве оценки величины $\overline{Hr_i}$ используется не среднее арифметическое, а медиана). Параметр χ_i^2 имеет χ^2 -распределение с $\nu_i = N_i - 1$ степенями свободы.

Далее, следуя рекомендациям Кендалла и Стьюарта [1977] авторы Hipparcos использовали преобразование Уилсона–Гильферта (Wilson–Hilferty), с помощью которого вычисляется нормализованная (т.е. приведенная к нормальному распределению) статистика Z по формуле

$$Z_i = \left(\frac{9\nu}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\sqrt[3]{\frac{\chi_i^2}{\nu}} + \frac{2}{9\nu} - 1 \right]. \quad (4.2)$$

Статистический параметр Z имеет асимптотически нормальное распределение с нулевым средним и единичной дисперсией. Параметр $Z(\chi_i^2)$ являлся основным индикатором переменности при анализе результатов измерений Hipparcos.

4.1.3. Метод Уэлша-Стетсона.

Существует естественный путь решения проблемы автоматизированного обнаружения переменных. В современной астрофотометрии практически всегда применяются многоцветные фотометрические системы. Для этого используются многоканальные приемники, и измерение светового излучения во всех каналах производится одновременно или квазиодновременно. Подобная ситуация практически никогда не реализовывалась в классических случаях поиска переменных по фотографическим пластинкам. Очевидно, что если мы измеряем переменный поток излучения, то должна существовать корреляция между уровнями сигнала в разных каналах.

По-видимому, Уэлш и Стетсон [1993] были первыми, кто опубликовал предложение использовать корреляционные соображения для обнаружения переменных звезд.

Способ, предложенный ими, заключается в следующем.

Пусть имеется два ряда квазиодновременных фотометрических измерений исследуемой звезды с номером i , полученные в двух каналах регистрации (1) и (2). В результате имеется два ряда звездных величин $m_{ij}^{(1)}$ и $m_{ij}^{(2)}$ по N измерений в каждом канале ($j = 1, 2, \dots, N$). Пусть, кро-

ме того, для всех измерений известны оценки их среднеквадратичных ошибок $\sigma_{ij}^{(1)}$ и $\sigma_{ij}^{(2)}$ (также как и в случае вычисления параметра Z !).

Далее применяется следующий алгоритм.

Сначала для каждого ряда измерений вычисляются взвешенные средние:

$$\begin{aligned}\overline{m}^{(1)} &= \sum_{j=1}^N \frac{m_{ij}^{(1)}}{(\sigma_{ij}^{(1)})^2} \bigg/ \sum_{j=1}^N \frac{1}{(\sigma_{ij}^{(1)})^2}, \\ \overline{m}^{(2)} &= \sum_{j=1}^N \frac{m_{ij}^{(2)}}{(\sigma_{ij}^{(2)})^2} \bigg/ \sum_{j=1}^N \frac{1}{(\sigma_{ij}^{(2)})^2},\end{aligned}\quad (4.3)$$

Затем строятся нормированные остаточные отклонения

$$\delta m_{ij}^{(1)} = \frac{m_{ij}^{(1)} - \overline{m}_i^{(1)}}{\sigma_{ij}^{(1)}}, \quad \delta m_{ij}^{(2)} = \frac{m_{ij}^{(2)} - \overline{m}_i^{(2)}}{\sigma_{ij}^{(2)}}, \quad (4.4)$$

и, наконец, вычисляется основной статистический параметр, характеризующий степень переменности (обозначим его через WS).

$$WS = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N (\delta m_{ij}^{(1)} \delta m_{ij}^{(2)})} \quad (4.5)$$

Уэлш и Стетсон использовали этот способ для поиска переменных типа RR Лют по CCD-снимкам шаровых скоплений.

Статистические параметры Z и WS обладают по крайней мере одним серьезным недостатком: чтобы их вычислить его необходимо а priori знать дисперсию σ_{ij}^2 . Эта дисперсия должна быть определена из данных, полученных в ходе самого измерения, по звездам, которые считаются непременными. При применении CCD-матриц в качестве приемников излучения, особенно в тех случаях, когда CCD работает в режиме с задержкой накопления, (ВЗН или TDI — time delay and integration), величину дисперсии сигнала во время накопления оценить нельзя. В частности, в проекте GAIA эта величина, по-видимому, определяться не будет. Кроме

того, σ_{ij}^2 — это только нижняя оценка полной дисперсии, не учитывающая вариаций, происходящих за интервалы времени, превышающие время накопления. Следовательно, нужен индикатор переменности, который бы не требовал никакой предварительной информации. Такой способ был предложен, независимо от Уэлша и Стетсона, группой исследователей ГАИШ с участием диссертанта [Миронов, Захаров, Николаев, 2003].

4.2. Метод *MZ*

4.2.1. Формулы метода.

Пусть имеется многоцветная фотометрическая система, состоящая из N_b полос, и излучение от звезды с номером i измеряется одновременно во всех этих полосах. Пусть в каждой из этих полос произведено, N_j измерений и получено N_b последовательностей звездных величин

$$m_{ij}^{(1)}, m_{ij}^{(2)}, \dots, m_{ij}^{(k)}, \dots, m_{ij}^{(l)}, \dots, m_{ij}^{(N_{B-1})}, m_{ij}^{(N_B)}; \quad (j = 1, 2, \dots, N_i)$$

Для любой пары таких последовательностей с номерами k и l можно вычислить коэффициент линейной корреляции (по Пирсону) по известным формулам:

$$\rho_{kl} = \frac{\text{cov}\{m_k, m_l\}}{\sigma_k \sigma_l}, \quad (4.6)$$

где

$$\begin{aligned} \text{cov}\{m_k, m_l\} &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (m_{jk} - \overline{m_k})(m_{jl} - \overline{m_l}) = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N m_{jk} m_{jl} - \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N m_{jk} \right) \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N m_{jl} \right), \\ \sigma_k^2 &= \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} (m_{jk} - \overline{m_k})^2, \quad \sigma_l^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_i} (m_{jl} - \overline{m_l})^2. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Так как звездные величины различных звезд обычно оказываются измеренными неодинаковое число раз, то следует использовать не непосредственно вычисленные коэффициенты корреляции, а отношения их к собственным ошибкам.

Оценка ошибки коэффициента корреляции производится по известной формуле (см., например, учебник Б.М. Щиголева, 1963, «Математическая обработка наблюдений»)

$$\sigma_{\rho} = \frac{1 - \rho^2}{\sqrt{N_i - 2}}. \quad (4.8)$$

Для поиска переменности i -й звезды, измеренной в каналах k и l , мы предлагаем использовать статистику MZ . (Мы назвали ее **M**ulti-channel **Z**, в отличие от «одноканального» параметра Z , использовавшегося авторами Hipparcos).

$$MZ_{kl} = \frac{\rho_{kl}}{\sigma_{\rho}}. \quad (4.9)$$

В случае N_b каналов, можно составить $n_p = N_b(N_b - 1)/2$ таких пар и, затем, для каждой звезды построить вектор MZ_{ikl} с n_p компонентами. Из компонентов этого вектора можно вычислить для каждой звезды обобщенную статистику

$$MZ_i = \frac{1}{\sqrt{n_p}} \sum_{k=1}^{N_b} \sum_{l=k+1}^{N_b} MZ_{kl}, \quad (4.10)$$

которая отражает скоррелированность совокупности всех каналов. Легко видеть, что обобщенный параметр MZ является проекцией n_p -мерного вектора MZ_{ikl} на диагональ n_p -мерного куба, проходящую через начало координат. Будем называть эту диагональ «главной диагональю». Для случая трех каналов это иллюстрируется на рис. 4.1.

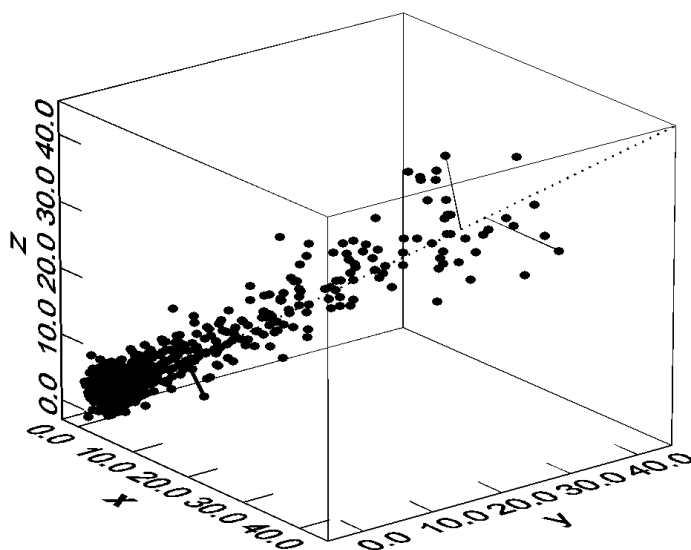


Рисунок 4.1. Многомерный индикатор переменности MZ . Точки, относящиеся к непременным звездам, концентрируются у начала координат. Для переменной звезды ее многомерная точка сдвигается в направлении главной диагонали.

4.2.2. Проверка работоспособности метода.

Если рассмотреть только непременные звезды и предполагать, что нет корреляции между сигналами в различных каналах, то точки, соответствующие концам векторов MZ (MZ -точки) будут иметь практически нормальное распределение с нулевым средним и единичной дисперсией независимо от уровня сигнала, его дисперсии и от числа каналов. Для переменных звезд MZ -точки и центр их распределения будут сдвигаться вдоль главной диагонали в положительном направлении. Поэтому, в соответствии со свойствами нормального распределения, если MZ_i больше, чем $+1,96$, то звезда не является постоянной с вероятностью около 0,975; если $MZ_i > 2,58$ — с вероятностью около 0,995, при $MZ_i > 3,00$ — с вероятностью 0,997 и при $MZ_i > 3,29$ — с вероятностью более 0,9995.

Рассмотрим в качестве иллюстрации рис. 4.2. На этом рисунке показаны результаты численного эксперимента. Рассматривалась модель сис-

темы с 8-ю каналами. Стандартная ошибка сигнала от постоянной звезды $\sigma_{\text{const}} = SE$ во всех каналах принималась равной $0^{\text{m}},1$.

Кривая (1) относится к модели постоянной звезды. Другие кривые моделируют переменные звезды либо с синусоидальной кривой блеска, либо с кривой блеска, подобной классическим цефеидам. Амплитуда переменности A_{var} изменялась от $0^{\text{m}},03$ до $0^{\text{m}},15$.

Видно, что для синусоидальной кривой блеска при отношении амплитуды к шуму $A_{\text{var}}/SE = 0,03 / 0,1 \approx 0,3$ (т.е. когда шум примерно в 3 раза больше амплитуды переменности) мы в состоянии обнаружить переменную с вероятностью около 0,90, а при отношении $A_{\text{var}} / SE \approx 0,6$ — с вероятностью почти равной единице.

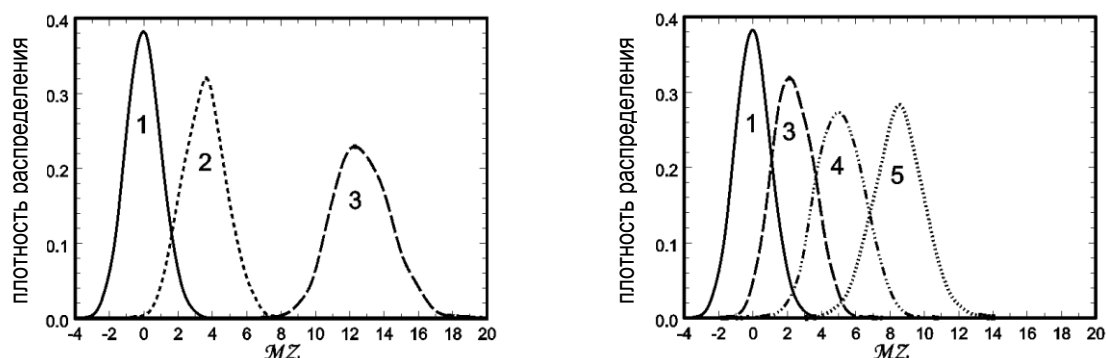


Рисунок 4.2. Распределение модельных величин статистического параметра MZ . Слева: переменные с синусоидальной переменностью блеска; справа: переменные с кривой блеска типа классических цефеид.

(1) — неперемежные звезды; (2) — $A_{\text{var}}/SE = 0,3$; (3) — $A_{\text{var}}/SE = 0,6$; (4) — $A_{\text{var}}/SE = 0,9$; (5) — $A_{\text{var}}/SE = 1,2$.

Для кривых блеска, подобных кривым звезд типа δ Сер переменные можно обнаружить при отношении $A_{\text{var}} / SE \approx 0,6$ с вероятностью около 0,6, а если это отношение равно 1,2 или более, то с вероятностью более чем 0,99.

Кроме численного эксперимента мы применили рассматриваемый метод к данным, содержащимся в каталогах Hipparcos и Tycho, в таблицах "Epoch Photometry Annex", список «А», и попытались заново «от-

крыть» известные переменные различных типов. Рассматривались три фотометрических канала: H_r , B_T и V_T . Результаты приведены в табл. 4.1.

Заметим, что индивидуальные измерения в полосах V_T и B_T имеют значительные ошибки ($\approx 0^m,1$), что сильно затрудняет поиск переменных. Несмотря на это, результаты, показанные в табл. 4.1, представляются вполне удовлетворительными. Мы считаем предлагаемый MZ -метод весьма пригодным для обнаружения переменных и оценки долей открытых и пропущенных объектов и рекомендуем его для использования.

Таблица 4.1. Доля переменных различных типов в каталогах Hipparcos и Tycho, переоткрытых корреляционным методом.

Тип пере- менности по ОКПЗ	Полное число переменных в выборке	Переоткрыто с вероятностью		
		0.975 (%)	0.995 (%)	0.9995 (%)
ACV	205	66.8	59.0	49.2
BCEP	79	83.6	74.7	69.7
DCEP	189	98.4	98.4	96.3
DSCTC	130	56.9	49.2	42.3
EA	316	86.1	83.5	78.8
EB	105	97.1	97.1	96.2
EW	74	99.9	98.7	95.6
GCAS	92	95.6	93.5	93.5
M	129	97.7	97.7	97.7
RRAB	56	96.4	96.4	94.6
RRC	19	94.7	89.5	89.5
SRA	53	98.1	96.2	96.2
SRB	312	97.4	97.1	96.5
Все типы	2867	88.3	85.0	80.8

Рассмотрим случай, когда имеется процесс помехи, возмущающий измерения в двух каналах так, что звездные величины даже ярчайших непременных звезд оказываются статистически связанными с коэффициентом корреляции ρ .

Пусть σ_m^2 – дисперсия отсчетов, связанная с квантовыми флуктуациями светового потока, а σ_x^2 — дисперсия отсчетов, вызываемая возмущающим процессом (примем, что она одинакова в обоих каналах). Тогда

$$MZ_{\text{perturb}} = \frac{\rho(1+\alpha)\sqrt{N-2}}{(1+\alpha)^2 - \rho^2}; \text{ где } \alpha = \frac{\sigma_m^2}{\sigma_x^2} \quad (4.11)$$

Коррелированная помеха выглядит так же, как и переменность. Она сдвигает MZ от нуля. Поэтому, при наличии априорной корреляции между сигналами в разных каналах, для обнаружения переменности вычисленное значение параметра MZ нужно сравнивать с исправленным MZ_0 , которое равно

$$MZ_0 = MZ_i - MZ_{\text{perturb}},$$

где MZ_{perturb} определено по заведомо непременным звездам или вычислено теоретически.

4.3. Система WBVR-стандартов на северном небе.

Анализ переменности

4.3.1. Исходный материал.

Список кандидатов в стандарты, описанный в главе 3, был проконтролирован на переменность методом MZ . Понятно, что поскольку список кандидатов в стандарты строился на основе разностей $Hr_{\text{obs}} - Hr_{\text{calc}}$, в нем не могло быть переменных звезд со значительными амплитудами. Чтобы иметь возможность сравнить работу MZ -метода с непременными и малоамплитудными переменными звездами, было решено взять за основу первоначальный список объемом 8766 объектов, в котором еще не был произведен отсев известных переменных. При вычислениях по формулам (3.3) с коэффициентами, приведенными в таблице В4 в при-

ложении «В» оказалось, что для 8766 звезд разность наблюдаемой величины $(Hp-V)_{\text{obs}}$ и вычисленного по полиному значения $(Hp-V)_{\text{calc}}$: $\Delta(Hp-V) = (Hp-V)_{\text{obs}} - (Hp-V)_{\text{calc}}$ не превышает $\pm 0^{\text{m}},02$. Гистограмма распределения этих разностей показана на рис. 4.3. Стандартное отклонение равно $0^{\text{m}},005$.

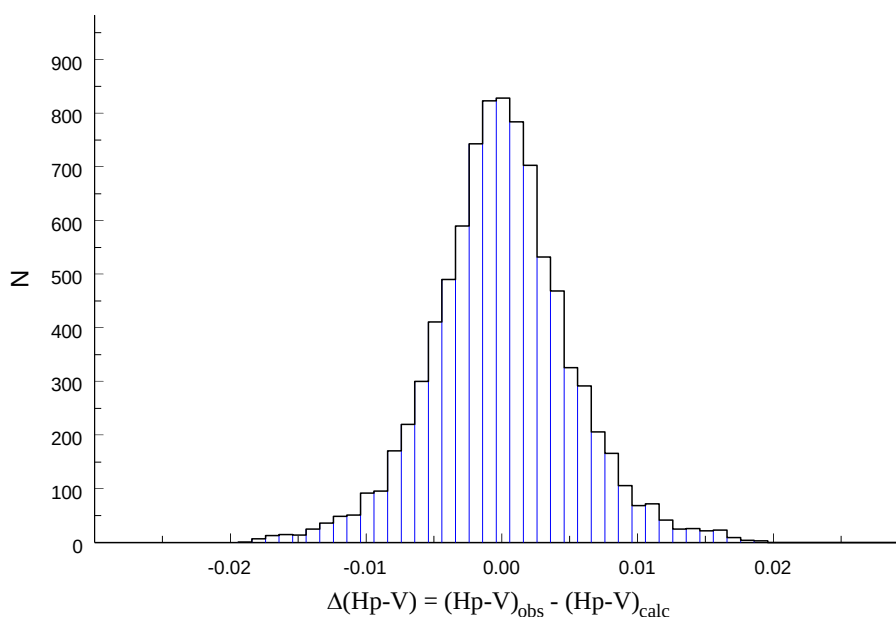


Рисунок 4.3. Гистограмма распределения разностей $\Delta(Hp-V) = (Hp-V)_{\text{obs}} - (Hp-V)_{\text{calc}}$ для звезд списка кандидатов в стандарты

Очевидно, что распределения энергии в спектрах этих звезд таковы, что позволяют достаточно точно вычислить величины в одном каталоге (Hipparcos) по величинам другого каталога. Это свойство позволило отнести звезды рассматриваемой выборки, как кандидатов в список фотометрических стандартов на северном небе. Поскольку наблюдения в двух каталогах производились в разное время, по совершенно разным методикам и в разных местах (в космосе и на Земле), то близкое совпадение вычисленных и наблюдаемых величин свидетельствует о том, что эти звезды являются переменными или, по крайней мере, имеют малую амплитуду переменности. Тем не менее, чтобы быть полноценными стандартами звезды должны быть тщательно исследованы на перемен-

ность. Такую возможность предоставляют наблюдения, полученные по программе Hipparcos и содержащиеся в списках Hipparcos Epoch Photometry Annex и Tycho Epoch Photometry Annex (списки “А” и “В”), доступные через ресурс **VizieR**. При расчетах учитывались значения флагов качества измерений. Ненадежные измерения отбрасывались [Крусанова, Миронов, Захаров, 2013].

4.3.2. Статистика MZ и учет скоррелированности каналов.

Итак, всего с $|\Delta(Hp - V)| < 0,02$ было отобрано 8766 звезд, из них для 109 в Tycho Epoch Photometry Annex не оказалось сведений об индивидуальных измерениях в каналах B_T или V_T . Для всех остальных 8657 звезд по формуле (4.10) была вычислена статистика MZ . Эти звезды мы будем называть «звездами нашей выборки». Далее были построены гистограммы распределений значений MZ для всех трех пар каналов: Hp и B_T , Hp и V_T , B_T и V_T . (см. рисунок 4.4).

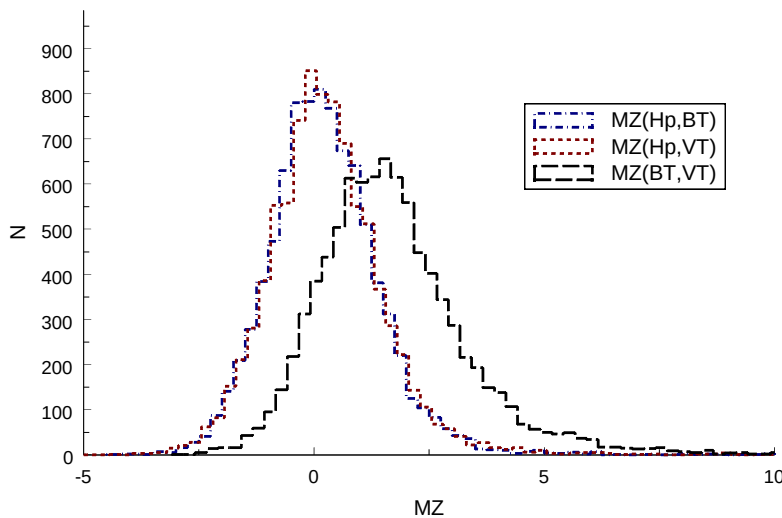


Рисунок 4.4. Гистограммы параметра MZ , иллюстрирующие сдвиг моды распределения, вызванный скоррелированностью каналов.

Большинство звезд нашей выборки не являются переменными, тем не менее, моды распределений не совпали с нулем, как это должно быть для независимых случайных величин. Для пары H_r и B_T , мода распределения была принята равной 0.1485, для пары H_r и V_T — 0.1780 и для пары B_T и V_T — 1.512. Из этого следует, что все каналы являются скоррелированными. Этот вывод, основанный на иных соображениях, уже был получен нами ранее [Захаров, Миронов, Крутяков, 2000; Крутяков, Миронов, Захаров, 2000] и обсуждался в разделе 3.2. Корреляция для пар каналов H_r и B_T , H_r и V_T невелика, но для пары B_T и V_T она достаточно сильная. Наличие корреляции сдвигает параметр MZ от нуля, даже когда истинной переменности нет. Прежде чем вычислять обобщенную статистику MZ по формуле (4.10), необходимо учесть влияние взаимной корреляции и вычесть из полученных MZ_{H_r, B_T} , MZ_{H_r, V_T} и MZ_{B_T, V_T} соответствующие значения мод распределений, относящиеся к непеременным звездам. Исправленные частные значения мы будем обозначать MZO_{H_r, B_T} , MZO_{H_r, V_T} , MZO_{B_T, V_T} и обобщенную — MZO

4.3.3. Звезды, имеющие обозначения как переменные, в каталогах GCVS, NSV и AAVSO

Анализ статистики MZ для звезд, обозначенных как переменные, позволяет оценить эффективность MZ -метода для обнаружения малоамплитудных звезд на основе данных Hipparcos и Tycho.

Рассмотрим сначала звезды, имеющие обозначения в GCVS. В нашей выборке объемом 8636 звезд содержится 181 такая звезда.

В полях 49 и 50 каталога Hipparcos приведены, соответственно, 5-процентный и 95-процентный квантили т.е. $H_p(0,05)$ и $H_p(0,95)$. Они

обеспечивают оценку величин в максимуме и минимуме блеска, обнаруженных в течение периода наблюдений.

Мы сопоставили размахи переменности блеска

$Ampl(Hp) = (Hp_{\min} - Hp_{\max})$ со значениями параметра $MZ0$. Результаты для 181 звезды, входящей в GCVS представлены на рис. 4.5, 4.7 и 4.9.

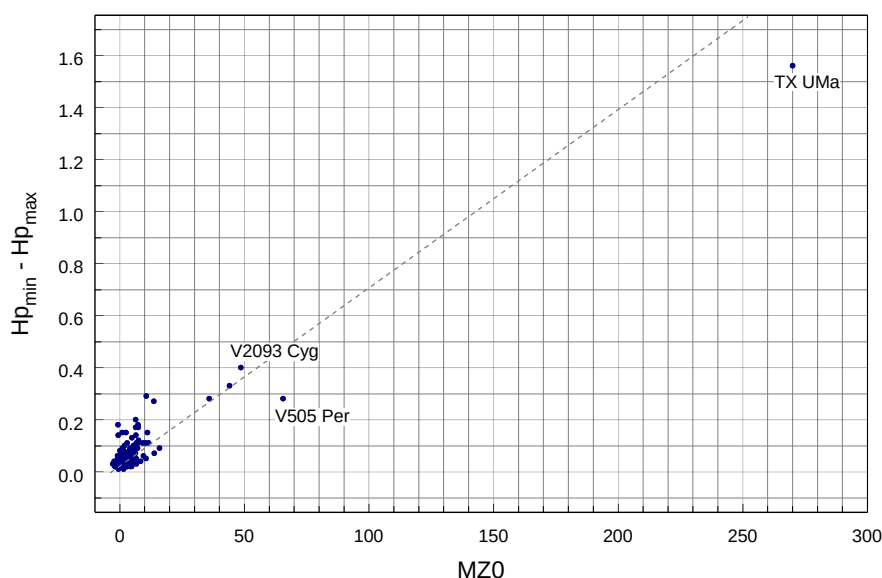


Рисунок 4.5. Связь параметра $MZ0$ и разности $Ampl(Hp) = Hp_{\min} - Hp_{\max}$ для звезд GCSV. Отмечены три звезды с наибольшими значениями $MZ0$.]

На рис. 4.5 видно, что бóльшая часть точек сгруппирована в области, где $MZ0$ не превосходит 10, а разность $Hp_{\min} - Hp_{\max}$ не более $0^m,1$. Наибольшие значения $MZ0$ оказались у звезд TX UMa, V505 Per и V2093 Cyg. TX UMa — затменная система типа EA/SD. Она имеет амплитуду $1^m,74$ в лучах V и период $3^d,06$. Понятно, что такая звезда была наблюдаена Hipparcos в разных фазах и легко обнаружилась методом MZ . Затменная V505 Per имеет тип EA/DM и амплитуду $0^m,59$. Hipparcos пронаблюдал 4 затмения, что позволило методу MZ уверенно обнаружить переменность. Звезда V2093 Cyg — имеет тип LB и амплитуду $0^m,4$. На рис. 4.6 для примера показана кривая блеска V2093 Cyg. Хорошо видны синхронные изменения блеска в трех каналах. Значение $MZ0$, которое примерно равно 50, более чем надежно свидетельствует о ее переменности.

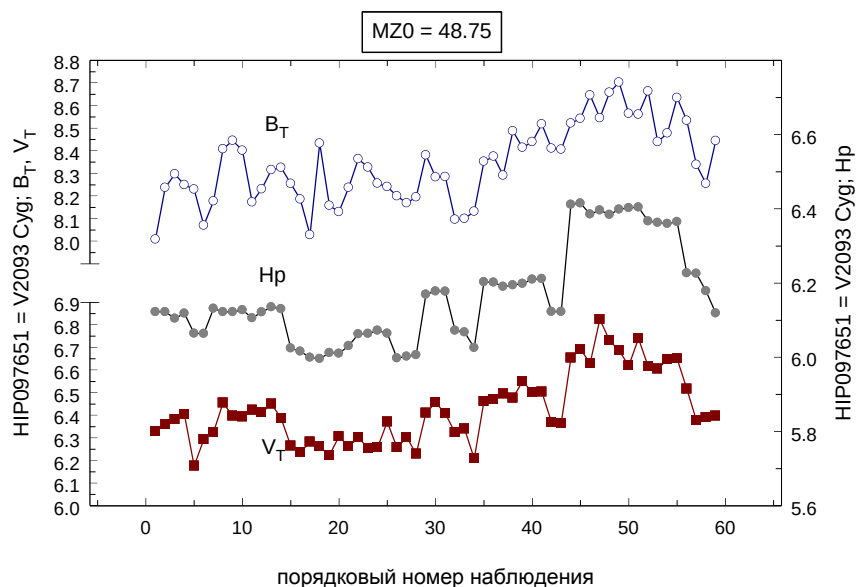


Рисунок 4.6. Кривые блеска переменной V2093 Cyg в полосах H_r , B_T и V_T . На этом и последующих рисунках, показывающих кривые блеска, величины в полосах B_T и V_T показаны на левой вертикальной оси, а в полосе H_r — на правой.

На рис. 4.7 показана более подробно область $MZ0 < 70$ и обозначены переменные в интервале $10 \leq MZ0 \leq 70$. Рисунок убеждает нас в том, что обнаружение методом MZ таких переменных как OW Hya, AF Ari, IO UMa и MP Del — затменных, имеющих амплитуду более $0^m,25$ не составляет трудностей.

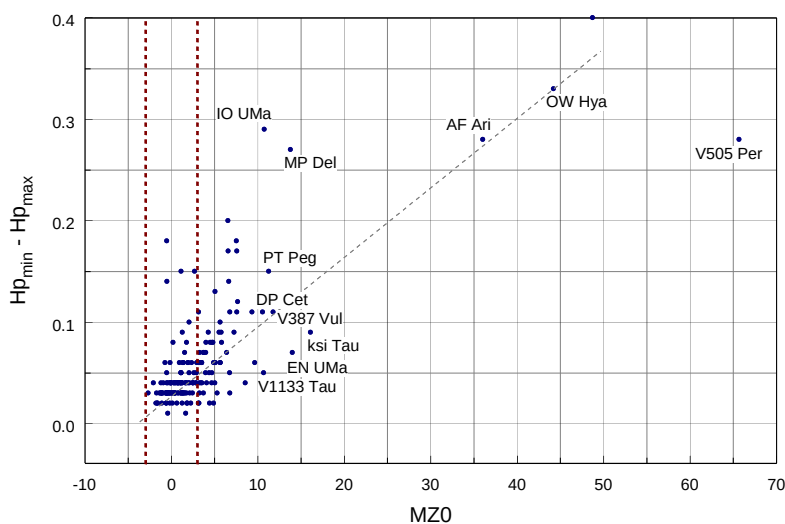


Рисунок 4.7. То же, что на рисунке 4.5 для $MZ0 < 70$. Отмечены переменные в интервале $10 \leq MZ \leq 70$.

Более интересным является факт обнаружения EN UMa (DSCTC с амплитудой $0^m,05$) и V1133 Tau (LPB с амплитудой $0^m,04$). Это подтверждает вывод о том, что метод способен обнаруживать переменность с амплитудой менее чем среднеквадратическая ошибка звездной величины в большинстве каналов. Кривая блеска EN UMa показана на рис. 4.8.

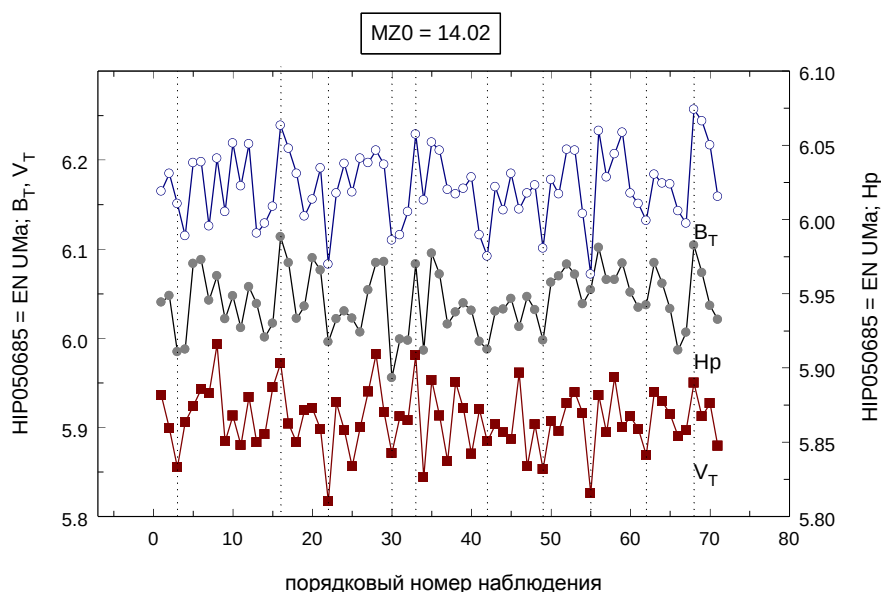


Рисунок.4.8. Блеск EN UMa в каналах H_p , B_T и V_T в зависимости от порядкового номера наблюдения. Вертикальными штриховыми линиями показаны основные скоррелированные изменения блеска, обеспечившие высокое значение параметра MZ .

На рис. 4.9 наиболее подробно показан участок, представляющий область наименьших значений $MZ0$. Из этого рисунка следует, что если $MZ0 > 3$, то, как и следует из теории, следует ожидать эту звезду переменной. В интервале $3 < MZ0 < 10$ находится 54 звезды. В области $MZ0 < 3$ в основном расположились переменные, имеющие $0^m,005 < (H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}}) < 0^m,08$, обнаружить которые не удалось, прежде всего, из-за больших ошибок в каналах B_T и V_T .

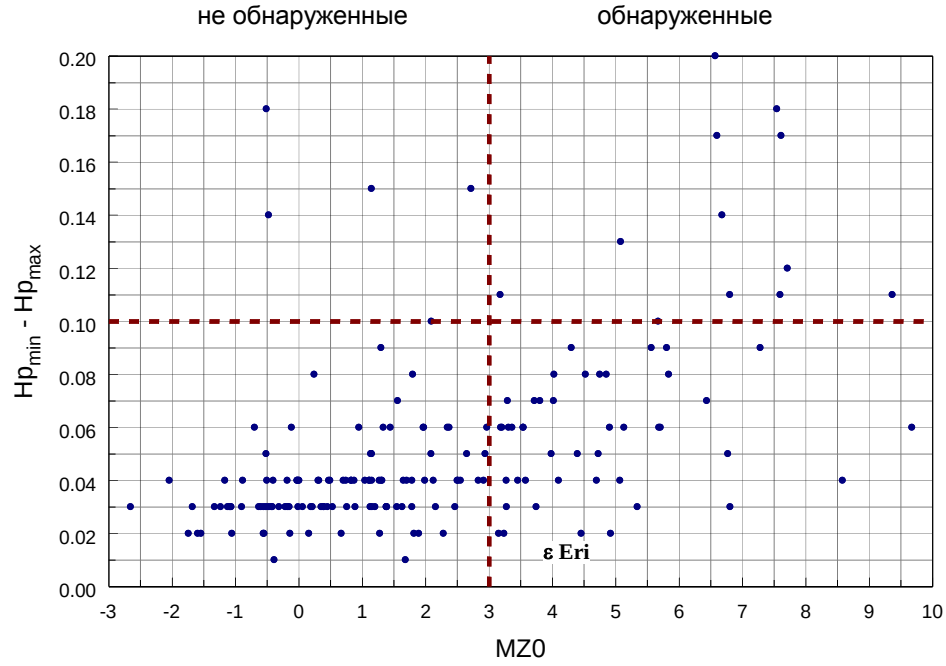


Рисунок 4.9. То же, что на рисунке 4.5 для интервала $-3 \leq MZ \leq 10$

На рис. 4.10 показана кривая блеска ϵ Eri. Звезда имеет тип переменности ВУ. Несмотря на малое количество наблюдений (всего 9 надежных одновременных измерений в H_p , B_T и V_T) налицо заметная корреляция.

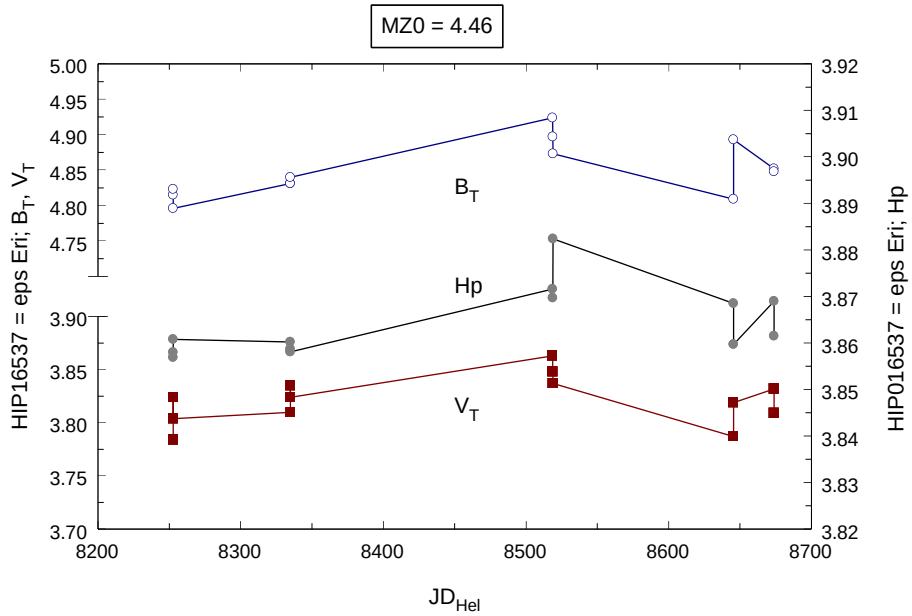


Рисунок 4.10. Кривые блеска HIP016537 = ϵ Eri в полосах H_p , B_T и V_T .

Итак, на основе данных индивидуальных одновременных измерений в полосах H_p , B_T и V_T в эксперименте Hipparcos из 174 звезд, обозначенных в GCVS и имеющих величину $(H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}})$ менее $0^m,10$, методом MZ было обнаружено 43 (25%) на уровне $MZ0 = 3$ и 59 (34%) на уровне $MZ0 = 2$.

Рассмотрим теперь звезды нашей выборки, входящие в каталог NSV. Таких звезд 504 и они лежат в области значений $(H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}})$ менее $0^m,1$. Положение их на диаграмме « MZ , $(H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}})$ » показано на рис. 4.11. Значения $MZ0$ распределились следующим образом:

$MZ0$	количество звезд
$-3,2 < MZ0 < 0$	164
$0 < MZ0 < 1$	112
$1 < MZ0 < 2$	106
$2 < MZ0 < 3$	62
$3 < MZ0 < 4$	28
$4 < MZ0 < 5$	20
$5 < MZ0 < 8,03$	13
Всего	504

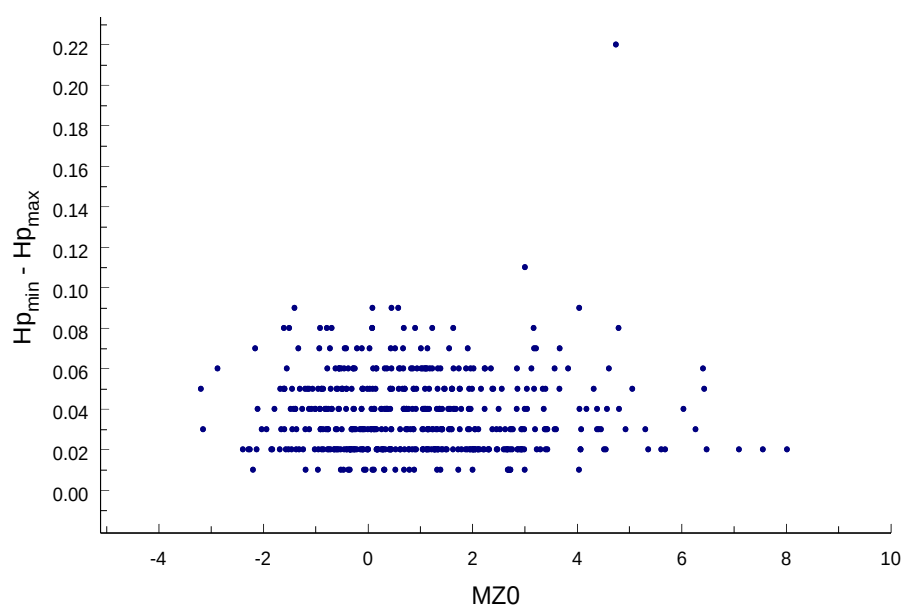


Рис.4.11. Положение звезд, имеющих обозначение в NSV, на диаграмме « $MZ0$, $(H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}})$ ».

Из рассматриваемых звезд для 123 (24.4%) $MZ0 > 2$, для 61 (12%) $MZ0 > 3$, для 33 $MZ0 > 4$ и для 13 $MZ0 > 5$. Среди этих звезд многие должны быть переменными. Для примера на рис. 4.12 показана зависимость величин B_T , V_T , H_r от порядкового номера наблюдения для NSV 24420 = HIP 89981, а на рис. 4.13 — такая же зависимость для NSV 24923 = HIP 97757.

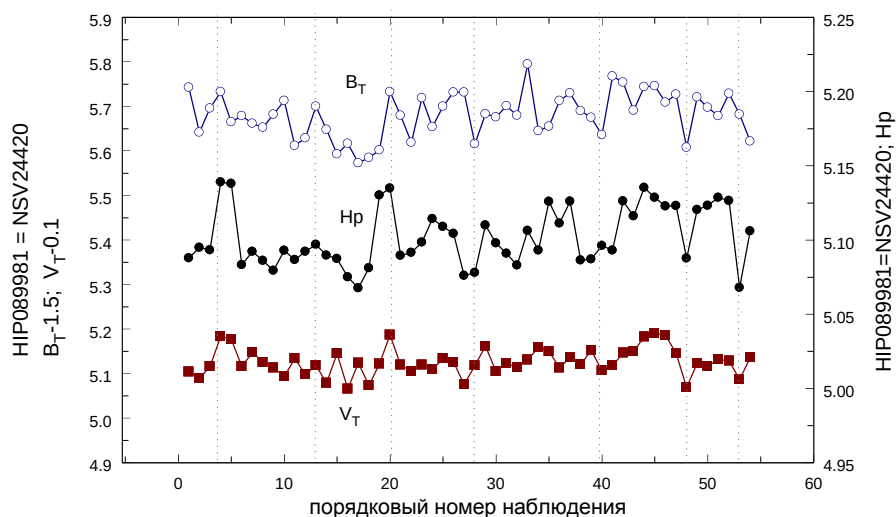


Рисунок 4.12. Одновременно полученные значения звездных величин B_T , V_T , H_r для NSV 24420 = HIP 89981 в зависимости от порядкового номера наблюдения. Величина $MZ0 = 8,022$. Вертикальными штриховыми линиями показаны основные скоррелированные детали на кривых блеска. С большой вероятностью звезда является переменной.

На обоих графиках хорошо видны неоднократные одновременные отклонения блеска от своих средних значений.]

В число 504 NSV звезд входят 467, имеющих номер AAVSO; при этом 47 звезд NSV не входят в список AAVSO. Это NSV:

02990, 05426, 09915, 13336, 15165, 15478, 15594, **15755**, 15816, **16228**, **16351**, 16353, 16390, 16738, 16744, 17418, 17882, 18090, 19580, 19751, 19940, **20099**, 20109, 20215, 20429, 20619, 20902, 20927, 23672, 23850, 24040, **24405**, 24406, **24626**, 24669, 24848, **24872**, **24881**, 24891, **24943**, 25003, **25772**, 25781, 25891, **25922**, 25999, 26115.

В приведенном списке полужирным шрифтом выделены номера звезд с $MZ0 > 2$.

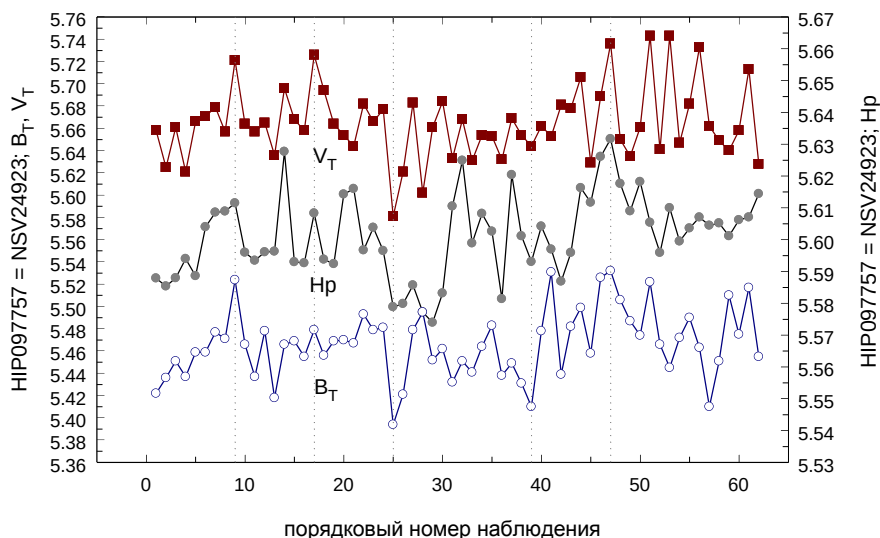


Рисунок. 4.13. Одновременно полученные значения звездных величин B_T , V_T , H_r для NSV 24923 = HIP 97757 в зависимости от порядкового номера наблюдения. Величина $MZ0 = 6,44$. Вертикальными штриховыми линиями показаны некоторые скоррелированные детали на кривых блеска. Для наглядности графики сдвинуты по оси ординат на $0^m,04$, для полосы B_T вниз, а для полосы V_T вверх. С большой вероятностью звезда является переменной.

Рассмотрим теперь кратко звезды, содержащиеся в списке AAVSO. Среди 8636 звезд нашей выборки номера AAVSO (Variable Star indeX, VSX) имеют 792 звезды. Из них 632 имеют также обозначения GCVS или NSV (173 и 459, соответственно). 160 AAVSO звезд не содержатся ни в GCVS, ни в NSV, хотя 140 из них, по данным AAVSO, являются периодическими переменными, для которых известен период.

Из числа 181 звезды, обозначенных в GCVS, 8 звезд не входят в список AAVSO. Перечень этих звезд и соответствующие им величины $MZ0$ даны в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Звезды GCVS, не входящие в список AAVSO.

звезда	MV Dra	V0668 Lyr	V0831 Her	EZ UMa	FX UMa	V0917 Ori	V0449 Aur	DP Cet
<i>MZ0</i>	-0.695	-0.512	0.894	1.304	4.704	0.244	5.673	10.596
$(H_{p_{\min}} - H_{p_{\max}})$	$0^m.06$	$0^m.05$	$0^m.03$	$0^m.04$	$0^m.04$	$0^m.08$	$0^m.10$	$0^m.11$

Из таблицы следует, что критерий *MZ* подтверждает переменность только для FX UMa, V0449 Aur и DP Cet, однако следует помнить, что для таких малоамплитудных звезд на материале Hipparcos методом *MZ* обнаруживается только около 20% переменных.

4.3.4. Анализ признаков переменности по каталогу Hipparcos

Вначале процитируем описание характеристик переменности (буквенный флаг в поле H52), как оно дано в документации к каталогу Hipparcos (перевод мой, А.М.).

«‘C’: «постоянные звезды», или, более точно, звезды не обнаруженные как переменные. В этот тип включены звезды, использованные как фотометрические стандарты. Из этой категории исключены звезды, отмеченные как переменные в Исходном каталоге Hipparcos (The Hipparcos Input Catalogue). Но предположение о том, что звезды в строках, отмеченных символом ‘C’ непостоянные, следует применять с осторожностью: они могут оказаться переменными на уровне ниже, чем порог обнаружения в каталоге Hipparcos, или они могли показывать переменность в прошлом (например, Ве звезды или долгопериодические затменные двойные);

‘D’: ‘переменность, вызванная двойственностью’, этот флаг назначался тогда, когда имелось различие в звездных величинах, определенных по полному фотонному сигналу (‘dc’) и по разности полного сигнала и фона (‘ac’) и в соответствии с угловым расстоянием и разностью звездных величин двойной или кратной системы. Если флаг ‘D’ установлен, не обязательно, чтобы звезда была физической переменной и не

обязательно, чтобы она выглядела как переменная в полосе H_r (шкала 'dc');

'M': 'возможная микропеременная', с амплитудой менее $0^m,03$ (звезды, классифицированные с высокой степенью вероятности как микропеременные, отмечены флагом 'U');

'P': 'периодическая переменная'. Этот флаг может быть установлен и тогда, когда флаг 'D' также является подходящим;

'R': 'исправленный показатель цвета'. Когда установлен флаг 'R' это означает, что показатель цвета $V-I$ вызывает ложную линейную зависимость величины H_r от времени, не имея на это физических причин. Если это обнаружилось в ходе обработки и анализа данных, это может быть принято во внимание при классификации по типам переменности, т.е. либо это ложная переменность, либо нет;

'U': 'неклассифицированная (unsolved) переменная'. Звезды классифицируются как 'unsolved', если они не попадают в другие категории переменности, — в этот класс также включены неправильные или полуправильные переменные и звезды, заподозренные в переменности с амплитудами более $0^m,03$;

□ : 'пробел' указывает на то, что эта звезда не может быть классифицирована ни как переменная, ни как постоянная, ни с какой степенью уверенности (из-за того, что в фотометрических измерениях присутствуют один или более выбросов).»

Из числа 181 звезды нашей выборки, которые входят в GCVS, имеют типы переменности по Hipparcos:

' ' (blanc)	39
'M' (possibly micro-variable)	13
'P' (periodic variable)	49
'U' (unsolved variable)	58
'C' (constant)	22

Переменных типов ‘D’ и ‘R’ в составе рассматриваемых звезд нет.

К типу ‘C’ отнесены звезды:

V1728 Aql, AY Ari, δ^1 CMi, KZ Cam, AV Cap, HT Cet, EP Cnc, KX Cnc, KU Com, LW Com, LS Com, V1679 Cyg, LU Del, V0377 Gem, V0831 Her, V0401 Hya, HR Lib, V2711 Oph, V2742 Oph, V1260 Ori, V0400 Peg, BU Psc, sig Ser, PV UMa, FI UMa, EV Vir.

Все эти звезды имеют $MZ0 < 1,28$, следовательно, метод MZ , строго говоря, не дает возможности подтвердить переменность по результатам фотометрии Hipparcos и Tycho для этих звезд.

Из 49 звезд типа ‘P’ 33 имеют $MZ0 > 2$, в том числе 29 имеют $MZ0 > 3$. Таким образом, переменность большинства звезд типа ‘P’ подтверждается методом MZ .

Из 58 звезд типа ‘U’ 34 имеют $MZ0 > 3$ и их переменность не подлежит сомнению. Максимальное значение $MZ0$ для этих звезд у V2093 Cyg равно 48,75.

Из 13 звезд типа ‘M’ три с большой вероятностью являются переменными; это ϵ Eri, π Vir и ψ^2 Aqr. Для них $4,46 < MZ0 < 6,81$. Остальные имеют $MZ0 < 3$.

39 звезд типа “blanc” имеют значения $MZ0$ в диапазоне от минус 2,65 до +2,88. Вероятно, большинство звезд типа “blanc” в действительности не являются переменными.

4.3.5. Отбор звезд, которые с наибольшей вероятностью не являются переменными

Нами было принято, что, несмотря на значение $MZ0$, все звезды, входящие в GCVS, NSV, в списки AAVSO, или имеющие типы переменности по Hipparcos ‘U’, ‘P’, и ‘M’, а также звезды, для которых не

удалось вычислить параметр MZO , нужно исключить из числа кандидатов в стандарты. Итого на данном этапе было оставлено 7249 звезд.

Дальнейшее рассмотрение показало, что неоднократно встречаются звезды, для которых только одно значение, либо $MZO_{\text{Hr,BT}}$, либо $MZO_{\text{Hr,VT}}$, либо $MZO_{\text{BT,VT}}$ существенно превышает 3, в то время как два других не выходят за пределы двух, или даже могут быть отрицательными. Наиболее часто за пределы 3 выходит $MZO_{\text{BT,VT}}$, тогда как $MZO_{\text{Hr,BT}}$ и $MZO_{\text{Hr,VT}}$ не подтверждают синхронного изменения блеска звезды. Пример таких выбросов, вызванных не переменностью звезды, а другими причинами, показан на рисунке 4.14. Эти случаи требуют дополнительного рассмотрения.

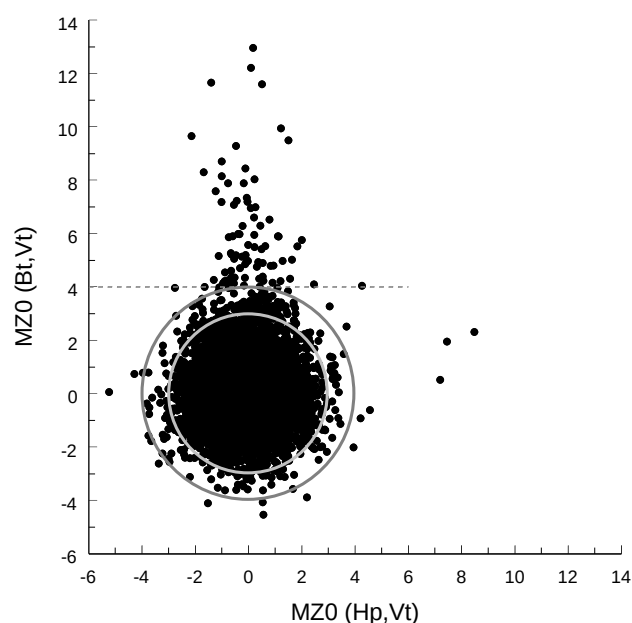


Рисунок.4.14. Пример зависимости $MZO_{\text{BT,VT}}$ от $MZO_{\text{Hr,VT}}$. Две окружности на фоне черных точек соответствуют значениям $MZO = 3$ и $MZO = 4$. Группа точек, расположившихся вдоль оси ординат при $MZO_{\text{BT,VT}} > 4$, отражают не переменность звезд, а аппаратные особенности каналов B_T и V_T .

В результате нами было принято решение исключить из числа 7249 кандидатов в стандарты все звезды, для которых $MZO > 2$ и те, для которых хотя бы один из параметров $MZO_{\text{Hr,BT}}$, $MZO_{\text{Hr,VT}}$ или $MZO_{\text{BT,VT}}$ более трех. После этого в списке кандидатов было оставлено 6484

звезды. Этот список доступен в электронном виде в статье Крусановой, Миронова и Захарова [2013] в журнале *Peremennye Zvezdy* (Variable Stars) на сайте www.astronet.ru/db/varstars. Краткий фрагмент этого списка приведен для примера в таблице 4.2. Мы рекомендуем использовать эти звезды в качестве стандартов при различных астрофотометрических измерениях.

Таблица 4.2. Фрагмент списка надежных кандидатов в стандарты в фотометрической системе *WBVR*. В десяти колонках таблицы приведены, соответственно, номер HIP, номер HD, прямое восхождение и склонение, RA(J2000) и (DE(J2000)) так как они даны в каталоге *Hipparcos*, спектральный тип, принятый в каталоге *Hipparcos*, звездная величина *V* и показатели цвета *W – B*, *B – V*, и *V – R* согласно Тянь-Шаньскому каталогу *WBVR*-величин и значение параметра *MZ0*.

HIP	HD	RA(J2000)	DE(J2000)	Sp_HIP	V	W-B	B-V	V-R	MZ0
14	224726	00 ^h 00 ^m 11 ^s .59	-00°21'37".5	K0	7 ^m .256	1 ^m .169	1 ^m .228	0 ^m .872	0.583
19	224721	00 00 12.80	+38 18 14.7	G5	6.535	0.519	0.987	0.703	-0.138
42	224771	00 00 30.09	+25 50 41.2	F2	8.211	-0.040	0.381	0.382	-0.837
58	224792	00 00 41.70	+62 10 33.6	G0	7.063	-0.161	0.520	0.427	1.802
106	224870	00 01 19.24	+49 58 53.7	G7II-III	6.235	0.535	0.995	0.715	-1.633
119	224894	00 01 33.65	+44 40 31.6	K0	6.827	0.760	1.077	0.768	-0.559
121	224895	00 01 35.15	+28 25 25.6	K2III	6.842	1.007	1.233	0.871	1.100
128	224890	00 01 39.30	+73 36 42.8	Am...	6.517	0.094	0.186	0.141	-0.643
136	224907	00 01 42.87	+24 15 11.5	K2III-IV	6.619	0.927	1.186	0.862	0.962
137	224906	00 01 43.85	+42 22 01.7	B9IIIp Mn	6.254	-0.414	-0.033	0.009	-0.452
179	224974	00 02 16.53	-13 24 27.1	G0V	6.919	-0.081	0.531	0.450	1.482
186	224995	00 02 24.17	+08 57 24.6	A6V	6.336	0.148	0.176	0.144	0.058
187	224997	00 02 24.51	-06 03 33.1	G0	9.008	-0.126	0.465	0.419	1.906
217	225019	00 02 41.86	+82 58 23.6	A0	7.317	0.195	0.100	0.109	-1.002
254	225068	00 03 08.32	+42 44 52.5	A2	6.742	0.071	0.035	0.059	-0.221
258	225073	00 03 13.28	+17 33 08.6	K0	6.596	0.937	1.142	0.783	-0.853
379	225216	00 04 41.84	+67 09 59.0	K1III	5.701	0.754	1.073	0.765	-0.581
394	225239	00 04 53.21	+34 39 34.4	G2V	6.111	-0.098	0.640	0.541	-1.362
410	225292	00 05 01.13	+27 40 29.3	G8II	6.487	0.524	0.964	0.725	-0.612
417	6	00 05 03.80	-00 30 10.5	G9III:	6.311	0.876	1.119	0.772	-1.445
432	17	00 05 13.00	+35 34 16.0	A2	6.889	0.103	0.152	0.091	0.774
440	14	00 05 19.86	+68 53 03.9	B9	7.074	-0.046	-0.012	-0.026	-0.312
448	43	00 05 22.25	+03 36 22.0	G5	6.912	0.857	1.126	0.778	0.075

Выводы по главе 4

Синхронные (или квазисинхронные) наблюдения в нескольких каналах дают мощный метод обнаружения звездной переменности.

Кроме каталогов Hipparcos Epoch Photometry Annex и Tycho Epoch Photometry Annex в настоящее время не существует опубликованных данных об индивидуальных одновременных измерениях звездных величин обширных списков звезд. Использование данных, полученных в эксперименте Hipparcos, затруднено наличием больших ошибок индивидуальных измерений в каналах B_T и V_T , а также наличием сильной корреляции в этих каналах. Но даже такие наблюдения позволили отобрать более шести тысяч звезд, которые с высокой вероятностью не являются переменными. К сожалению, результаты индивидуальных наблюдений, полученные при создании таких каталогов, как 2MASS или SDSS, недоступны. Кроме того, результаты наземных наблюдений всегда искажены наличием корреляции между каналами из-за временных вариаций атмосферной экстинкции.

Есть надежда, что данные, которые будут получены в ходе выполнения планируемых космических экспериментов Gaia и «Лира-Б», дадут возможность обнаруживать и исследовать большое количество новых переменных звезд и получить репрезентативные выборки переменных различных типов в разных областях Галактики. Это даст возможность получить новые данные о строении и развитии Млечного Пути. Сведения о проекте «Лира-Б» содержатся в главах 5 и 6.

Глава 5.

Астрофотометрический проект «Ли́ра-Б»: цели и принципы реализации

5.1. Необходимость космического фотометрического обзора

Создание каталогов звезд и других небесных объектов, — классическая задача астрономии. Из этих каталогов астрономы черпают основную информацию при статистических исследованиях и выбирают объекты для детального изучения.

Первые действительно большие каталоги были созданы в последние десятилетия XX в. путем сканирования и оцифровки фотопластинок Паломарского обзора неба [Абелль, 1959; Рейд и др., 1991, Гал и др., 2004] и некоторых других фотографических обзоров. Так были созданы каталоги “Guide Star Catalog”(GSC) и USNO. Ранние версии каталога GSC [Ласкер, 1990а; Ласкер, 1990b; Рассел, 1990; Дженкнер, 1990; Моррисон, 2001] содержат около 19 млн. объектов, из которых примерно 15 млн. классифицированы как звезды ярче 16^m . В версиях GSC 1.1 и GSC 1.2 фотографические звездные величины приведены в одной спектральной полосе. В последней версии GSC 2.3.2 [Ласкер и др., 2008] содержится более 950 млн. объектов примерно до 22^m , не менее половины из которых — звезды; фотографические звездные величины приведены в четырех спектральных полосах, две из которых являются вариациями “синей” полосы, а остальные две лежат в красной и ближней инфракрасной областях. Приведенные в каталогах GSC величины звезд, более ярких, чем примерно 12^m , для которых изображения на фотографе-

ских пластинках передержаны, заимствованы из каталога Tycho-2 [Хёг и др., 2000] либо из каталогов фотоэлектрических величин B и V Джонсона.

Каталоги USNO A2 и USNO B1 [Моне и др., 2003] содержат примерно 500 млн. и один миллиард объектов, соответственно. Фотографические звездные величины в USNO-A2.0 приведены в двух (синей и красной), а в USNO-B1.0 – в пяти (две синих, две красных и одна инфракрасная) спектральных полосах.

Точность звездных величин в каталогах GSC и USNO невысока. В пределах одной и той же фотопластинки случайные ошибки составляют $0^m,1$ – $0^m,2$. Гораздо бóльшие систематические ошибки существуют между оценками величин на разных пластинках; они могут достигать $0^m,5$ и более, но именно они определяют погрешность каталога в целом.

Позднее были созданы каталоги сравнимого с GSC и USNO объема, полученные путем непосредственного измерения световых потоков звезд с помощью фотоэлектрических приемников: “Two Micron All Sky Survey” (2MASS) [Скрутский и др., 2006] и SDSS [Адельман-МакКарти и др., 2007]. Это многоцветные каталоги с глубоким пределом (см. таблицу 5.1). Однако при их создании не были предусмотрены процедуры, необходимые для достижения высокой фотометрической точности (например, для точного учета атмосферного поглощения света), в результате чего, при приемлемых случайных ошибках измерений их систематические погрешности слишком велики для использования данных в качестве стандартов при точной фотометрии [Миронов, 2008]. Самыми точными фотометрическими каталогами на сегодняшний день являются каталог в полосе Hipparcos [ESA, 1997] и Тянь-Шаньский каталог WBVR-величин ГАИШ МГУ [Корнилов, Волков, Захаров, 1991]. В первый из этих каталогов входят около 118 тыс. звезд на всем небе, фотометрия которых проведена в одной полосе H_p , примерно до 12^m . Около 75% звезд этого каталога ярче $9^m,5$ имеют погрешность величины H_p , не превышающую $0^m,003$. Во втором каталоге, который был описан в главе 1, содержится около 13 600 звезд на северном небе ($\delta > -15^\circ$), звездные величины

которых измерены в четырех полосах до $V = 7^m,2$. Внутренняя погрешность этих каталогов порядка $0^m,001$ – $0^m,003$, а взаимная погрешность каталогов, определенная по неперемнным звездам, не превышает $0^m,003$ [Захаров, Миронов, Крутяков, 2000; Крутяков, Миронов, Захаров, 2000; Миронов, Захаров, 2002]. Подробно этот вопрос уже был рассмотрен в главе 3.

Таблица 5.1. Характеристики наиболее известных фотометрических каталогов звезд

Каталог	Звездные величины	Спектральные полосы	Число объектов	Погрешность	Покрытие неба
Hipparcos	0–9	1(H_p)	~118тыс.	$0^m,001$	100%
Tycho-2	0–12	2(B_T, V_T)	2.5 млн.	$0^m,01$	100%.
Тянь-Шань	0–7.2	4(W, B, V, R)	~13 тыс.	$0^m,002$	$\delta > -15^\circ$
GSC 1.2	0–16	1(P_{mag})	15 млн.	$>0^m,1$	100%
GSC 2.3	12–22	4(R, B, V, I)	950 млн.	$>0^m,1$	100%
USNO-A2.0	10–21	5($B1, R1, B2, R2, I$)	500 млн.	$>0^m,1$	100%
USNO-B1.0	10–21	5($B1, R1, B2, R2, I$)	1 млрд.	$>0^m,1$	100%
2MASS	5–16	3(J, H, K)	470 млн.	$0^m,04$	100%
SDSS(DR8)	16–22.5	5(u, g, r, i, z)	260 млн.	$0^m,04$	14500 кв.град

Желательное свойство современного фотометрического каталога: широкий охват спектрального диапазона. В последнее время проведены, проводятся и планируются обзоры неба в УФ и ИК-диапазонах [Скрутский и др., 2006; Мартин и др., 2005; Уамстекер, 1999; Эпштейн и др., 1994; Райт и др., 2010]. Парадоксальность существующей ситуации заключается в том, что при этом нет одновременных измерений в разных участках оптического диапазона, а это не позволяет связать эти обзоры друг с другом, а также уверенно получить показатели цвета переменных и уникальных объектов.

Перечислим, каким условиям должен удовлетворять современный фотометрический каталог:

- большое число фотометрических полос (4–5 в видимом диапазоне, желателен также охват ИК-и УФ-диапазонов);
- умеренная (16^m – 17^m) или большая ($>20^m$) предельная звездная величина;

- 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);
- обзор всей небесной сферы.

Несколько основные существующие каталоги удовлетворяют этим условиям, показано в таблице 5.1. Как видно из этой таблицы, современных высокоточных многоцветных фотоэлектрических каталогов звезд, удовлетворяющих всем необходимым условиям, нет.

Согласно результатам, полученным Корниловым [Корнилов 2011a, 2011b], статистические погрешности для ярких звезд, вызываемые флуктуациями атмосферы, убывают значительно медленнее, чем остальные виды погрешностей. Таким образом, время, необходимое для проведения глубокого и точного фотометрического обзора с поверхности Земли, становится неприемлемо большим. Это указывает на необходимость проведения обзора из космоса.

Наземные наблюдения также не позволяют проводить измерения в ультрафиолетовом и в части инфракрасного диапазонов.

Обзор неба, который будет проведен в рамках космического эксперимента “Ли́ра-Б” [Захаров, Миронов, Прохоров и др., 2013], решает эти задачи, а каталог, создание которого ожидается после завершения эксперимента, будет удовлетворять всем перечисленным выше требованиям.

5.2. Цели космического эксперимента “Ли́ра-Б”

Целью эксперимента является проведение высокоточного многоцветного фотометрического обзора всех объектов от 3^m до 16^m на небесной сфере. В ходе эксперимента (длительностью от трех до пяти лет) предполагается произвести многократные фотометрические измерения объектов в 10 спек-

тральных полосах в спектральном интервале примерно от 200 до 1000 нм. По результатам обзора должны быть созданы следующие каталоги:

- каталог непеременных звезд ярче 12^m с погрешностью не хуже 0,1%–0,2% ($0^m,001$ – $0^m,002$); при этом будут приняты специальные меры, чтобы измерить с высокой точностью наиболее яркие звезды – до 3^m , в том числе в полосах *B* и *V*;
- каталог непеременных звезд ярче 16^m ; в полосах *B* и *V* должна быть достигнута погрешность не хуже 1% ($0^m,01$);
- каталог переменных звезд ярче 16^m ;
- многоцветный фотометрический каталог астероидов ярче 14^m ;
- каталог положений звезд с погрешностью порядка 100–200 мсек дуги для ярких звезд и 1 мсек дуги для остальных;
- многоцветный каталог протяженных объектов с высокой поверхностной яркостью;
- атлас фона неба во всех спектральных полосах обзора.

Наибольшее число звезд, которые будут регистрироваться в ходе обзора, являются красными. Максимум их излучения приходится на длинноволновую часть видимого и ближний инфракрасный диапазоны спектра. Данные инфракрасного обзора 2MASS [Скрутский и др., 2006] говорят, что в эксперименте “Ли́ра-Б” будет зарегистрировано не менее 100 млн. звезд. Более подробная оценка, будет дана в главе 6.

Под высокой точностью обзора подразумевается, что в тех полосах, в которых сигнал от звезды максимален, все непременные 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 $0^m,01$ – $0^m,02$. Будут приняты специальные меры, чтобы с высокой точностью измерить блеск ярких звезд от 3^m включительно.

Важнейшими особенностями обзора “Ли́ра-Б” являются:

- квазиодновременное (на интервале 15–20 с) проведение многоцветных фотометрических измерений объектов в широком спектральном диапазоне;
- высокая однородность фотометрических измерений, которая обеспечивается тем, что повторные измерения объектов происходят через интервалы времени, много меньшие, чем характерные времена изменения параметров аппаратуры;
- применение специальных мер для точного измерения блеска звезд от 3^m до 16^m – 17^m , чтобы преодолеть ограничения, связанные с шириной динамического диапазона фотоприемника (см. подраздел 5.4.6).

Из данных этого эксперимента можно будет получить много сведений, важных для различных направлений астрономии. Наиболее очевидные направления использования этих данных рассмотрены ниже в разделе 5.3.

Еще одна существенная особенность космического эксперимента “Ли́ра-Б” состоит в том, что он будет проводиться на борту Международной космической станции (МКС) [Лартер и Гонфалоне, 1996]. Причины, по которым в качестве места размещения комплекса научной аппаратуры эксперимента “Ли́ра-Б” была выбрана МКС, будут описаны ниже в разделе 5.5. Ограничения, налагаемые размещением научной аппаратуры на борту МКС, определяют многие характеристики эксперимента и технические решения, используемые в комплексе его научной аппаратуры.

5.3. Научные задачи космического эксперимента “Ли́ра-Б”

Научные результаты, которые можно ожидать при обработке данных, полученных в эксперименте “Ли́ра-Б”, очень разнообразны. Их серьезное рассмотрение далеко выходит за рамки этой главы. Ниже приведено краткое перечисление основных, наиболее очевидных направлений исследований. Обращаем внимание, что временная структура научных данных, получаемых

в ходе эксперимента, которая описана ниже в разделе 5.6, оказывает существенное влияние на возможности исследования свойств космических объектов.

5.3.1. Создание высокоточного многоцветного фотометрического каталога звезд и близкие вопросы

Каталог, получение которого ожидается в рамках эксперимента “Ли́ра-Б”, должен решить задачу увязки звездных величин звезд различных спектральных классов в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм.

Как уже отмечалось, в ходе эксперимента “Ли́ра-Б” все небесные объекты до 12^m будут измерены с погрешностью менее $0^m,001$. При этом будут приняты специальные меры для измерения с такими же погрешностями ярчайших звезд до 3^m включительно. Существенно большее количество более слабых объектов (примерно до 16^m) будут измерены с погрешностью порядка $0^m,01$. С фотометрической точки зрения ценность таких измерений не очень велика, однако, поскольку измерения будут сопровождаться определением координат объектов с точностью лучше $0,1''$, этот массив данных образует многоцветный цифровой атлас небесных объектов — основу для проведения впоследствии различных астрономических исследований.

Многократные измерения звезд позволят с большой достоверностью разработать однородную систему фотометрических стандартов до 12^m – 14^m с погрешностями $0^m,001$ – $0^m,002$ по всему небу в широком спектральном диапазоне. Средняя плотность стандартов составит не менее 25 на квадратный градус. В настоящее время необходимость построения такой системы не вызывает сомнений в связи с широким использованием для многоцветной фотометрии ПЗС-приемников: результаты этих измерений невозможно привязывать к существующим сегодня существенно более ярким фотометрическим стандартам. Такая система стандартов также позволит проводить фотометрическую калибровку различных ультрафиолетовых и инфракрасных фотометрических систем и производить учет систематических ошибок, связанных с

временной нестабильностью кривых реакций [Миронов, Захаров, Прохоров, 2008].

На основе каталога стандартов и многоцветного цифрового атласа неба можно будет разрабатывать методики широкопольной и субпиксельной наземной фотометрии умеренной точности ($0^m,01$ – $0^m,05$). Такие методики могут применяться для массовых систематических наблюдений объектов разных типов (переменных звезд, астероидов, ИСЗ и др.) на широкопольных инструментах.

Изображения всех объектов, сигнал от которых в панхроматической полосе превышает заданную пороговую величину, а также изображения протяженных объектов из входного каталога таких объектов, фиксируются во всех фотометрических полосах и передаются в блок управления в гермоотсеке МКС. Эти фрагменты покрывают примерно 1% небесной сферы. Однако сигналы, регистрируемые между яркими объектами, также представляют интерес. Их уровень низок, и попиксельная регистрация привела бы к их уходу под уровень шума считывания. Эти сигналы будут суммироваться без считывания для получения оценки фона неразрешенных источников. По таким записям возможна как оценка уровня фона или построение его карты, так и поиск источников, лежащих ниже порога основного систематического обзора. Одной из решаемых задач будет построение многоцветной карты зодиакального света и противосияния, а также определение локализации и физических свойств пылинок, которые порождают это рассеянное излучение.

Кривые реакции аппаратуры, установленной на МКС, будут подвержены изменениям из-за загрязнения компонентами микроатмосферы, воздействия космических лучей и старения материалов. Однако большое количество измерений непериодических звезд в эксперименте “Лири-Б”, а также регулярное проведение специальных калибровочных процедур, позволит выявить изменения кривых реакции и уменьшить систематическую ошибку данных.

Для уверенного обнаружения и последующего исключения систематических ошибок крайне важно проведение специально спланированных коор-

динированных наземных измерений. Целесообразно также рассмотреть возможность возвращения матричных ПЗС со светофильтрами на Землю по окончании эксперимента “Ли́ра-Б” для последующих метрологических и материаловедческих исследований. Это позволит существенно повысить надежность фотометрических измерений небесных объектов, получаемых в ходе эксперимента.

5.3.2. Фотометрическое исследование поверхностей малых тел Солнечной системы

На открытие большого числа новых астероидов и комет в эксперименте “Ли́ра-Б” рассчитывать не приходится, так как апертура телескопа слишком мала для обнаружения слабых объектов, а поле зрения телескопа заметно уже, чем у инструментов, используемых в программах поиска астероидов и комет. В эксперименте “Ли́ра-Б” будут регистрироваться только достаточно яркие объекты из главного пояса астероидов или еще более близкие объекты. Орбиты подавляющего большинства из них сегодня уже известны. С другой стороны, за время эксперимента любой доступный наблюдениям астероид попадет в поле зрения телескопа в среднем 100 раз. При погрешности одиночного измерения координат от $0,01''$ до $0,1''$ это позволит существенно уточнить параметры их орбит. Следует, однако, обратить внимание на временную структуру наблюдений (см. раздел 5.6), и возможно, потребуется специальная адаптация алгоритмов определения и уточнения орбит.

Наиболее интересными данными об астероидах, по-видимому, станет их многоцветная фотометрия, которая позволит судить о физических свойствах поверхности объектов и уточнить их классификацию. Повторные наблюдения астероидов через короткие интервалы времени (см. раздел 5.6), возможно, позволят сделать выводы об их осевом вращении.

5.3.3. Изучение Галактики

Появление каталога высокоточных измерений потоков от звезд в нескольких спектральных полосах открывает широкие перспективы для звездной астрономии и астрофизики, что особенно важно в связи с перспективой получения в ближайшие годы точных координат и параллаксов для большого количества объектов [Перриман, 2005]. Вкупе с высокой точностью фотометрических измерений это позволит изучить тонкие статистические закономерности строения Галактики, распределения поглощающей материи и определить для миллионов звезд их физические характеристики (светимость, особенности химического состава, ускорение свободного падения на поверхности, скорости вращения и т.п.). По этим данным можно будет уточнить эволюционные треки звезд, их особенности и многое другое. Постановка и перечисление задач, которые можно решать на таком статистическом материале, выходит за пределы настоящей работы.

5.3.4. Многоцветная поверхностная фотометрия протяженных объектов

Типичная поверхностная яркость протяженных объектов для галактик и туманностей составляет $18^m/\text{кв. сек. дуги}$ и ниже. Эти величины близки к порогу регистрации в эксперименте “Ли́ра-Б” (см. главу 6). Для регистрации таких объектов будет применяться процедура бинирования – объединения сигнала от нескольких пикселей, которая приводит к снижению шумов. Области и режимы регистрации изображений протяженных объектов будут содержаться в специальном входном каталоге таких объектов.

Области на небесной сфере, в которых расположены протяженные объекты, наблюдаются во всех спектральных полосах каждый раз, когда объект попадает в полосу сканирования. При этом сканирование объектов производится с разных направлений и с произвольными сдвигами пикселей относительно их ранее полученных изображений. Количество наблюдений протяженных объектов такое же, как и звезд: в среднем 100 раз за 5 лет проведения

эксперимента. По всем полученным сканам строится единая многоцветная фотометрическая карта их поверхности.

5.3.5. Определение расстояний до звезд по межзвездному поглощению в ультрафиолетовой части спектра

Ультрафиолетовые полосы фотометрической системы “Ли́ра-Б” выбраны таким образом, чтобы средняя из них (218 нм) попадала на полосу межзвездного поглощения, а две другие (195 и 270 нм) лежали, соответственно, на более коротких и более длинных волнах. Измерение в этих полосах, или хотя бы в двух длинноволновых, позволяют оценить межзвездное поглощение. Сравнив эту величину с трехмерной картой межзвездного поглощения, основанной на пространственном распределении межзвездного водорода [Калберла и Керп, 2009], мы можем получить сравнительно точную оценку расстояния до звезды.

Поток ультрафиолетового излучения, достаточный для подобных измерений, испускают звезды спектральных классов А и более ранних, т.е. таким методом будут оценены расстояния до нескольких миллионов звезд.

5.3.6. Открытие и изучение переменных звезд

За год эксперимента каждый объект будет измерен в среднем 20 раз. Вблизи полюсов мира число измерений растет и достигает до 1000 раз в год (последнее число зависит от метода сканирования приполярных областей). Подобные наблюдения позволяют открывать новые переменные звезды (это будут так называемые «звезды, заподозренные в переменности» в том смысле, как это понимается в Общем каталоге переменных звезд [ОКПЗ, Самусь и др., 2011]), и исследовать их с умеренным качеством (для приполярных областей число наблюдений и, соответственно, качество исследования переменных будет выше). Отметим, что в настоящее время коллектив проекта ОКПЗ пересматривает критерии включения новых переменных звезд в ката-

лог [Самусь, электронный ресурс; N. N. Samus, The draft classification for new GCVS versions, <http://www.sai.msu.su/gcvs/future/classif.htm>.].

Если хотя бы 1% звезд — переменные, то эксперимент «Ли́ра-Б» позволит обнаружить более одного миллиона кандидатов в переменные звезды, что существенно превышает число переменных звезд, известных сегодня. По состоянию на июнь 2013 года ОКПЗ включает в себя 47968 звезд (в том числе 1710, имеющих величину в максимуме менее 7,3), Новый каталог звезд, заподозренных в переменности (New Suspected variables, NSV) вместе с дополнением к нему (NSVS) — 26017 звезд (в том числе 1908 с величиной в максимуме менее 7,3), и, наконец, список Американской Ассоциации наблюдателей переменных звезд (AAVSO) по состоянию на 2013 год — 282033 переменных и заподозренных в переменности звезд (в том числе 1125 с величиной в максимуме менее 7,3) [Уотсон, 2006; URL: <http://www.aavso.org>]. Статистическая обработка переменных звезд, открытых по данным КЭ «Ли́ра-Б», позволит найти и (или) уточнить следующие их характеристики:

- распределение переменных по типам;
- пространственное распределение переменных разных типов и их связь со строением Галактики;
- статистические параллаксы для разных типов переменных и распределение их пространственной плотности в Галактике.

Вероятно также открытие новых типов переменных и уточнение существующей сегодня их классификации.

5.3.7. Обнаружение неразрешенных двойных звезд по многополосной фотометрии.

Один из способов обнаружения двойственности звезды — выделение в спектре двух компонентов, соответствующих звездам с различной температурой поверхности.

Если температуры компонентов различаются незначительно и отсутствуют затмения, то отличить такую двойную звезду от одиночной по фото-

метрическим данным практически невозможно. Легко распознать системы, в которых горячая звезда имеет меньшие размеры, чем более холодная. В этом случае в виновской области спектра холодной звезды будет наблюдаться пик излучения от горячей звезды, превышающий уровень излучения холодной звезды, даже если светимость горячей ниже.

Обнаружение двойственности в обратной ситуации — когда более холодная звезда одновременно имеет и меньшие размеры,— практически невозможно. Весьма сложным является и случай, когда звезды различаются по температурам, но почти одинаковы по размерам. В этом случае на всех длинах волн излучение холодной звезды слабее, чем горячей, но в рэлей-джинсовской области спектра горячей звезды можно заметить искажения, вызываемые присутствием холодного компонента. Эта ситуация очень интересна с астрофизической точки зрения, поскольку таким образом проявляют себя двойные белые карлики, образовавшиеся в широких звездных системах.

Прецизионная многоцветная фотометрия для решения описанной задачи служит вполне адекватной заменой спектрофотометрии [Малков, Мионов, Сичевский, 2011]. У получаемого в результате многоцветной фотометрии «квазиспектра» очень низкое разрешение, зато малая погрешность измерений в каждой точке.

5.3.8. Внегалактическая астрономия

Внегалактическая астрономия в эксперименте “Ли́ра-Б” представлена наблюдениями галактик. В ходе обзора могут регистрироваться диски или балджи галактик как протяженные объекты, а их выделенные звездообразные ядра — как точечные.

Процедура наблюдения протяженных частей галактик не отличается от описанной в подразделе 5.3.4. Типичная центральная яркость балджа спиральной галактики средней светимости составляет около $18^m/\text{кв. сек. дуги}$. Поверхностная яркость дисков галактик ниже: она не превышает $21^m/\text{кв. сек. дуги}$. Обе величины даны для полосы *B*. Поскольку порог регистрации обзо-

ра «Ли́ра-Б» в полосе *B* составляет $20^m,3$ (см. главу 6), то галактики с балджами будут регистрироваться, а не обладающие ими — нет. Учитывая, что поверхностная яркость объекта не зависит от расстояния, мы сможем регистрировать все галактики, угловые размеры балджа которых превышают 2–3 пикс., т.е. $1,5''$ – $2''$. Средний эффективный радиус типичного балджа около 0,8 кпк [Грехем и Уорли, 2008]; таким образом, размер балджа будет превышать $1,5''$ – $2''$ у галактик ближе 80 Мпк. Поскольку балджами обладает примерно 40% галактик, то ожидаемое число галактик, которые в эксперименте «Ли́ра-Б» будут регистрироваться как протяженные объекты, составляет несколько десятков тысяч.

Независимо от «тел» галактик будут регистрироваться их компактные звездообразные ядра. Порог их обнаружения такой же, как у звезд: 16^m и 17^m в полосах *V* и *B*, соответственно. Наблюдения с космического телескопа им. Хаббла показали, что типичная абсолютная звездная величина в полосе *B* звездообразных ядер спиральных галактик лежит в интервале от минус 14-й до минус 10-й, а для карликовых эллиптических галактик этот интервал составляет от минус 13-й до минус 11-й [Паудель и др., 2011]. Соответственно, звездообразное ядро с таким блеском может быть зарегистрировано в карликовых галактиках на расстоянии не более 10 Мпк, а в спиральных галактиках средней светимости — до 16 Мпк от нас, что соответствует расстоянию до скопления *Virgo*. Статистика данных с космического телескопа им. Хаббла показывает, что выделенными ядрами обладают около 75% спиральных галактик поздних типов [Бокер и др., 2002] и порядка 55% дисковых галактик в полном диапазоне морфологических типов [Скарлата и др., 2004]. Применяя эти данные к каталогу галактик «локальной Вселенной» [Караченцев и др., 2004], можно ожидать, что в обзоре «Ли́ра-Б» будет зарегистрировано порядка 100 звездообразных галактических ядер.

5.3.9. Астрометрия

Диаметры изображений точечных источников, создаваемые телескопом «Ли́ра-Б», составляют примерно 1,5 – 2,0 пикселя по всей фокальной плоскости. Это значение близко к оптимальному для определения координат точечных источников. Погрешность положения фотоцентра такого изображения зависит, в первую очередь, от отношения сигнала к шуму в нем. Для ярких звезд фотоцентр можно определить с точностью до 0,01 пикселя и выше. Однако вибрации МКС создают помехи высокоточной астрометрии и снижают ожидаемую точность измерений координат звезд. Оценки показывают, что, несмотря на это обстоятельство, погрешность астрометрических измерений будет порядка 1 мсек. дуги для всех звезд, регистрируемых в обзоре, а погрешность определения координат для звезд ярче 12^m не будет превышать 100 мсек. дуги. Для слабых звезд это сравнимо с результатами Hipparcos, а для ярких — немного превосходит эти результаты. Измерения с помощью телескопа «Ли́ра-Б» позволят с ошибкой в 10% определять параллаксы звезд на расстояниях до 1 кпк или несколько дальше.

Отметим, что речь идет об измерении относительных положений объектов. Указанные погрешности измерений будут достигаться для объектов, одновременно регистрирующихся в фокальной плоскости телескопа, т.е. удаленных не более чем на один градус друг от друга. Задачи построения фундаментальной системы координат в проекте «Ли́ра-Б» не ставится.

5.3.10. Gaia и “Ли́ра-Б”

В декабре 2013 г. состоялся успешный запуск большого астрометрического спутника Gaia, разработанного Европейским космическим агентством [Перриман, 2005]. Он измерит координаты звезд в оптическом диапазоне с небывалой доселе точностью: ~25 мсек. дуги для звезд 10^m и 0,3–1,0 мсек. дуги для 20^m . Помимо этого будет проводиться многоцветная «квазифотометрия» измеряемых звезд и определяться их лучевые скорости. Если бы конструкция Gaia осталась в том виде, который был предложен после завер-

шения эскизного проекта [Джорди и Хёг, 2005], то, возможно, эксперимент «Ли́ра-Б» не понадобился бы. В начальном варианте предусматривалось проведение классической многоцветной фотометрии с собственными фотоприемниками для каждой спектральной полосы и т.д. Однако современный проект существенно усечен: фотометрия была заменена на построение спектров сверхнизкого разрешения (34 и 36 бинов для красной и синей областей спектра, соответственно), по которым потом рассчитываются потоки в спектральных полосах [Перриман, 2005].

Точность многоцветной фотометрии, естественно, должна снизиться до типичных наземных значений $0^m,02$ – $0^m,03$.

Объединение астрометрической части каталога Gaia с фотометрическим каталогом «Ли́ра-Б» позволит получить суперкаталог с принципиально новыми характеристиками. Отметим также, что наилучшая точность измерений в обоих экспериментах достигается для одних и тех же звезд — ярче 12^m .

5.4. Принципы проведения эксперимента «Ли́ра-Б»

5.4.1. Метод наблюдения небесной сферы

МКС обращается вокруг Земли с сохранением так называемой «орбитальной ориентации» [Лартер и Гонфалоне, 1996]. В этой ориентации МКС всегда одной стороной (условно «нижней») обращена к Земле. На этой стороне устанавливаются приборы для наблюдения Земли. Противоположная сторона, обращенная в местный зенит, предназначена для приборов наблюдения космического пространства.

При орбитальной ориентации продольная ось станции направлена приблизительно вдоль вектора ее орбитальной скорости. Российский сегмент МКС располагается в «хвосте» станции.

Существуют два возможных метода проведения наблюдений на МКС: (1) режим прямого наведения и (2) сканирующий режим. В режиме прямого наведения работает большинство наземных телескопов и космических обсерваторий. Сканирующий режим использовался в эксперименте Hipparcos [ESA, 1997] и в обзоре SDSS [Адельман-МакКарти, 2007] и предполагается в планируемых экспериментах JMAPS [Дорланд и др., 2009], JASMINE [Гоуда и др., 2003] и Gaia [Перриман, 2005].

На МКС реализовать сканирующие наблюдения гораздо проще, чем режим прямого наведения. Для этого достаточно зафиксировать положение оптической системы телескопа относительно корпуса станции. При обращении МКС вокруг Земли телескоп будет поворачиваться вместе со станцией, а изображения звезд — перемещаться по фокальной плоскости телескопа. Изменять положение телескопа придется редко: примерно раз в месяц (см. подраздел 5.6.1), что повышает надежность конструкции.

В качестве приемников излучения для фотометрии в телескопах чаще всего используются матричные ПЗС [Хоуэлл, 2006] или КМОП-приборы [Белетик и др., 2006] или мозаики из них. При сканирующих наблюдениях фотоприемники должны функционировать в так называемом режиме с временной задержкой и накоплением — ВЗН [Мартинец и Клотц, 1998]. Заметим, что этот режим можно реализовать только для матричных ПЗС, в стандартных матрицах КМОП он невозможен.

В режиме ВЗН пакеты электронов, накапливаемые в ходе экспозиции, перемещаются по матрице с той же скоростью и в том же направлении, в котором перемещаются изображения звезд. Это накладывает требования на ориентацию матричных ПЗС в фокальной плоскости и на точность задания скорости перемещения зарядов. Считывание накопленных зарядов происходит, когда изображение достигает края матричного ПЗС. Получаемый кадр имеет вид полосы, ширина которой равна числу пикселей в строке матричного ПЗС, а длина определяется продолжительностью сеанса наблюдения и скоростью перемещения звезд по фокальной плоскости. ВЗН-режим имеет

целый ряд преимуществ, важных для получения высокоточной фотометрии: усреднение неоднородности чувствительности и термогенерации вдоль столбцов ПЗС, стабильные тепловые и электрические режимы функционирования матрицы. Кроме того, в режиме ВЗН естественным образом возникает так называемый «эффект дрожаний» (dithering mode) [CCD Sensors Technical Note], что приводит к существенному снижению термогенерации электронов. Для проведения многоцветной фотометрии в фокальной плоскости располагается несколько матричных ПЗС, каждая со своим светофильтром. Они реализуют разные спектральные полосы фотометрической системы. В сканирующем режиме изображение объекта последовательно проходит по всем ПЗС, и мы получаем квазиодновременные многоцветные измерения его блеска. Похожая конструкция приемника излучения была использована в телескопах проекта SDSS [Ганн и др., 1998].

5.4.2. Телескоп

Параметры телескопа, используемого в эксперименте “Лира-Б”, определяются целями эксперимента и техническими ограничениями со стороны МКС.

Габариты инструмента определяются способом его доставки и монтажа на МКС. Научная аппаратура на МКС доставляется грузовым космическим кораблем «Прогресс», который выводится на околоземную орбиту и стыкуется со станцией. После этого через внутренние люки транспортные секции научной аппаратуры вносятся внутрь российского сегмента МКС. Затем часть этих блоков выносятся в космическое пространство и монтируются на внешней поверхности станции. Самые сильные ограничения на габариты телескопа накладывают диаметры люков и процесс перемещения транспортных секций из «Прогресса» внутрь МКС. Максимально допустимый диаметр транспортного блока составляет 0,6 м при длине 1,3 м. Таким образом, с учетом толщины корпуса телескопа и транспортной упаковки диаметр главного зеркала не может превышать 0,5 м. За бортом МКС телескоп будет собирать

ся из трех секций: (1) основной секции, содержащей собственно телескоп, фокальную плоскость с приемниками излучения и блоки электроники, (2) бленды с крышкой и (3) устройства позиционирования, с помощью которого телескоп крепится к поверхности МКС и изменяет свою ориентацию. Поскольку сборка и юстировка оптической системы силами экипажа на борту МКС невозможна, то основная секция (собственно телескоп) доставляется на орбиту в собранном виде.

Размер поля зрения телескопа определяется несколькими факторами. Для проведения обзора всего неба нужен инструмент с достаточно широким полем зрения. С другой стороны, по мере увеличения поля зрения становится все труднее удовлетворить требования к аберрациям оптической системы телескопа [Попов, 1988; Максutow, 1979]. Одновременно более сложными и дорогими становятся процессы изготовления и юстировки оптики. Поэтому размер исправленного поля зрения был выбран компромиссным: $2\omega = 2^\circ$. При этом угловой размер основной части фокальной плоскости (по диагонали) составляет $1,5^\circ$, а ширина полосы сканирования $W = 1^\circ$. Оставшаяся часть исправленного поля зрения используется для размещения фотоприемников устройства стабилизации изображения (см. раздел 5.5).

Предельное угловое разрешение телескопа «Ли́ра-Б» должно быть не менее $1''$. Это одно из основных требований технического задания на эксперимент. Тогда при использовании матричных ПЗС с оптимальным в технологическом смысле размером пикселя $12\text{мкм} \times 12\text{мкм}$, мы приходим к минимальному фокусному расстоянию $F \approx 3\text{м}$ и угловому размеру пикселя $0,8''$. При этом для успешного перемещения внутри МКС длина телескопа вместе с фокальной плоскостью (без бленды) не должна превышать $1,3\text{ м}$.

Есть также ряд других требований, которым должен удовлетворять телескоп. Так как в качестве приемника излучения будут использоваться матричные ПЗС, то инструмент должен обладать плоским полем изображения. Далее, диаметр изображения точечного источника по половине интенсивности должен быть порядка $1,5\text{--}2$ пикселей по всей фокальной плоскости.

Это требование вытекает из необходимости точного определения блеска и положения фотоцентров изображений.

Наконец, поскольку телескоп работает в сканирующем режиме, к нему предъявляются достаточно жесткие требования по относительной дисторсии ($<0,1\%$). В противном случае изображения звезд на фокальной плоскости будут отклоняться от столбцов матриц и смазываться.

Всем этим требованиям удовлетворяет широко используемая сегодня оптическая схема Ричи–Кретьена с афокальным линзовым корректором, которая и была выбрана. Более детально характеристики телескопа «Ли́ра-Б» рассмотрены Цукановой и Бахолдиным [2012].

В качестве материала для изготовления зеркал телескопа предполагается использовать карбид кремния. Для такого выбора существуют две причины [Алексеев и др., 1991]. Во-первых, карбид кремния обладает высокой жесткостью, что позволяет изготовить из него тонкие и легкие зеркала и уложиться в конструктивные ограничения по массе. Во-вторых, он обладает очень высокой теплопроводностью, т.е. зеркала из этого материала обладают малыми нелинейными температурными искажениями формы и быстро приходят в состояние теплового равновесия.

5.4.3. Покрытие небесной сферы наблюдениями

В эксперименте «Ли́ра-Б» ориентация телескопа, при которой его оптическая ось лежит в плоскости орбиты МКС, является базовой. В этой ориентации центр поля зрения инструмента описывает большой круг, плоскость которого совпадает с плоскостью орбиты станции. Орбита МКС наклонена к экватору Земли примерно на $51,6^\circ$ (наклонение изменяется со временем не более чем на $0,1^\circ$). Под действием гравитационного поля Земли орбита МКС прецессирует с периодом около 70 дней [Лартер и Гонфалоне, 1996]. Такая скорость прецессии соответствует смещению поля зрения инструмента вдоль экватора на $0,3^\circ$ за виток, т.е. каждый объект попадает в полосу сканирования

телескопа, имеющую ширину 1° , не менее четырех раз подряд на последовательных витках.

Ход сканирования иллюстрируется на рисунке 5.1.

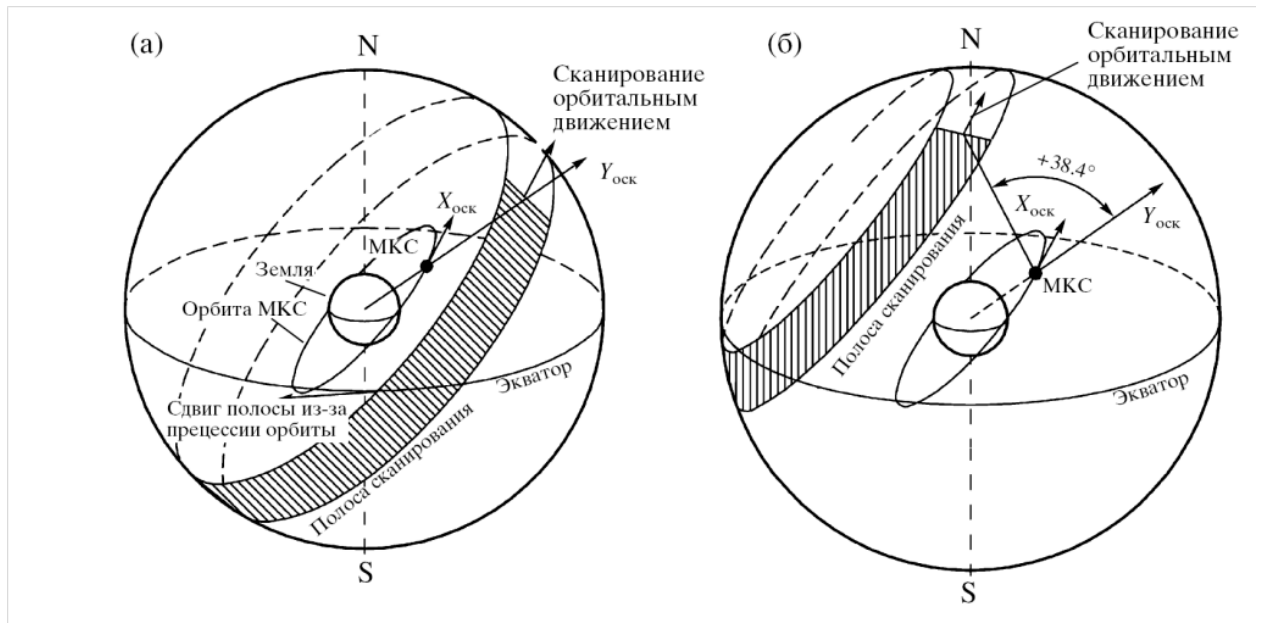


Рис. 5.1. Сканирование неба:

(а) – в основной ориентации инструмента, т.е. когда ось телескопа лежит в плоскости орбиты. (б) – ось телескопа смещена на $38,4^\circ$ к северу, полоса сканирования проходит через северный полюс мира.

Из-за прецессии поле зрения телескопа замечает на небе сферический пояс с координатами $|\delta| < 52,1^\circ$. (Ширина этого пояса равна удвоенному наклонению орбиты МКС ($2 \times 51,6^\circ$) плюс ширина полосы сканирования ($1,0^\circ$).) При этом области вблизи полюсов мира не наблюдаются (рисунок 5.1а). Для того чтобы полоса сканирования проходила через северный полюс мира, необходимо отклонить ось телескопа на $38,4^\circ$ к северу от плоскости орбиты (рисунок 5.1б). Для сканирования южного полюса мира – на такой же угол к югу.

Сочетание этих трех режимов позволяет покрыть наблюдениями все небо. Возможно, для построения более эффективного плана сканирования небесной сферы будет необходимо включать и промежуточные ориентации телескопа. Отметим, что не следует использовать ориентации оси телескопа с большими, чем $38,4^\circ$ отклонениями от плоскости орбиты МКС, так как при

этом резко возрастают проблемы, связанные с кривизной траекторий, по которым в фокальной плоскости движутся изображения звезд.

Наблюдения возможны только в той части орбиты, где отсутствует или слаба засветка рассеянным солнечным излучением. Наилучшей для наблюдения объектов предельной звездной величины является ситуация, когда наблюдения ведутся во время нахождения МКС в тени Земли. На освещенном Солнцем участке орбиты минимальный угол между оптической осью инструмента и направлением на Солнце определяется эффективностью бленды. В настоящее время можно гарантировать ослабление ею рассеянного излучения в 10^6 раз. Это означает, что наблюдения объектов предельной звездной величины можно будет вести в отсутствие прямой засветки входной апертуры телескопа, т.е. когда ось телескопа отстоит от края солнечного диска более чем на 90° . На остальной части витка возможны наблюдения только самых ярких объектов.

5.4.4. Фотоприемные устройства.

В качестве приемника излучения для фотометрии предполагается использовать сборку 11 матричных ПЗС обратной засветки. Устройство этой сборки показано на рисунке 5.2. Каждая матрица состоит из двух независимо управляемых частей размером 2250×300 пикс.

О возможности создания таких матричных ПЗС специально для космического эксперимента «Ли́ра-Б» заявила фирма «e2v technologies Ltd» (Великобритания). Некоторые характеристики этих матриц приведены в таблице 5.2.

На первую ПЗС (нумерация ПЗС ведется в направлении перемещения изображений звезд) наносится широкополосное просветляющее (панхроматическое) покрытие, на остальные – интерференционные светофильтры, реализующие фотометрическую систему «Ли́ра-Б».

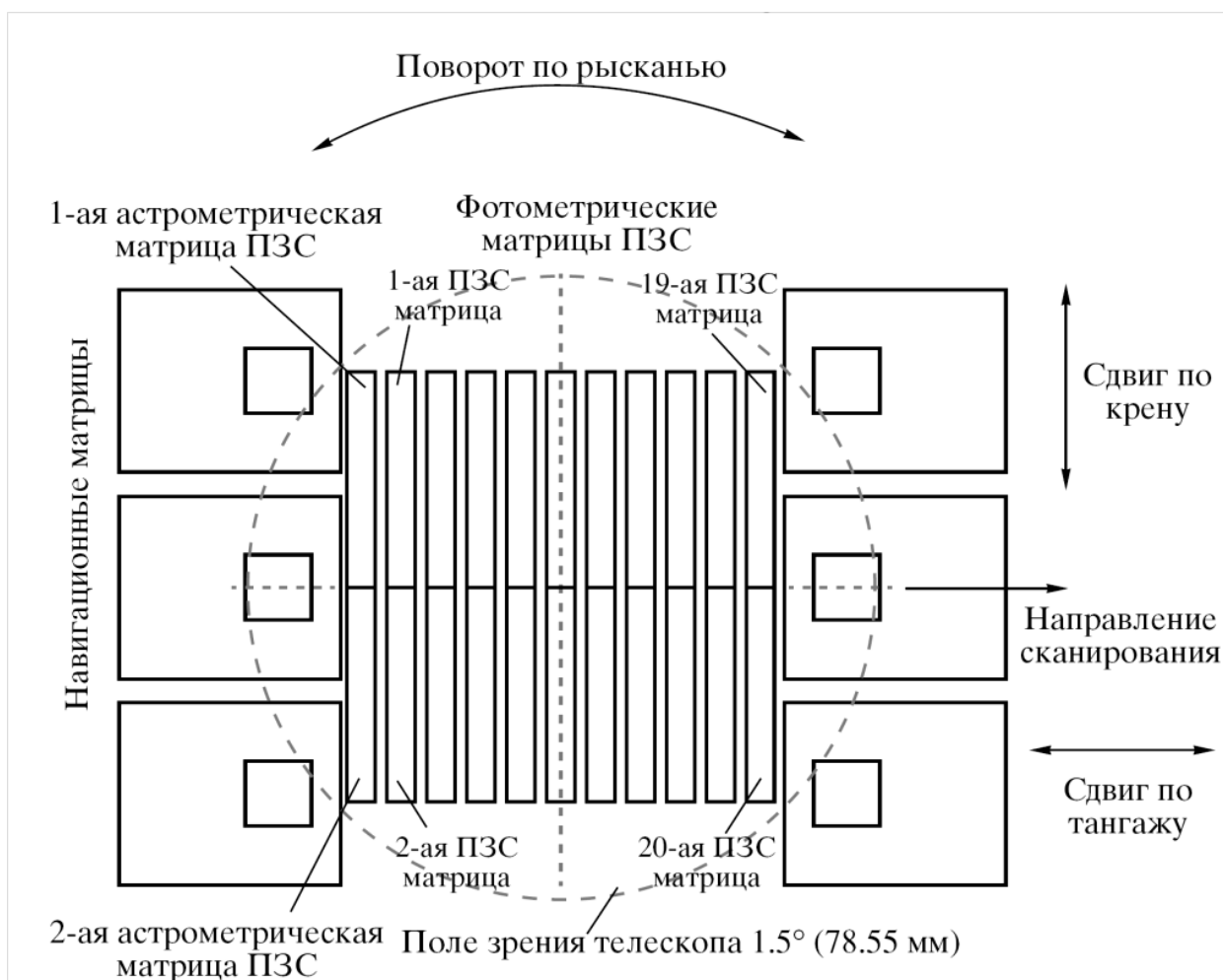


Рис. 5.2. Устройство фокальной плоскости в эксперименте “Ли́ра-Б”.

Таблица 5.2. Характеристики фотометрических ПЗС, предложенных фирмой «e2v»

Размеры матрицы	4500 × 312пикс.*)
Размеры пикселя	12мкм × 12мкм
Емкость пикселя	200 000 эл.
Толщина ПЗС для видимого диапазона	14 мкм
Толщина ПЗС для ИК-диапазона	30 мкм
Максимальная квантовая эффективность панхроматической ПЗС	96%
Шум считывания на частоте 1 МГц	5 эл./пикс.
То же для дифференциального считывания	7 эл./пикс.
Шум термогенерации при T=−30.С	<1эл./пикс. с
*) ПЗС состоит из двух независимо управляемых секций размером 2250 × 312пикс. каждая.	

Подробное описание фотометрической системы “Ли́ра-Б” представлено в главе 6.

5.4.5. Регистрация объектов

В эксперименте «Лира-Б» не используется входной каталог для фотометрии точечных объектов (звезд и компактных галактик). Существует только входной каталог протяженных объектов (туманностей, скоплений и близких галактик), для которых выполняется поверхностная фотометрия, и каталог ярчайших звезд, вызывающих переполнение пикселей ПЗС.

Измерение точечных объектов производится следующим образом.

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. Дополнительно, в список найденных точечных объектов включаются протяженные объекты из соответствующего входного каталога. Для них также вычисляются моменты появления и положения на остальных матрицах.

Для остальных матриц производится полное считывание только для предвычисленных фрагментов. Для точечных источников размер фрагмента берется постоянным, равным 7×7 пикс. (это значение может быть уточнено). Для очень ярких звезд, вызывающих переполнение пикселей изображения, а также для протяженных объектов фрагменты могут быть большего размера и иметь прямоугольную форму. Сигналы в промежутках между границами фрагментов, содержащих изображения объектов, суммируются без считывания по частям строк матричных ПЗС длиной до 100–150 пикс. (т.е. по площадкам размерами до $1 \times (100-150)$ пикс.). Сигнал в интервалах между объектами создается фоном звездного неба и неразрешенными источниками. Его величина составляет единицы квантов на пиксель за время экспозиции. Сум-

мирование без считывания используется для того, чтобы шум считывания вносился в измеряемый сигнал только один раз.

По изображениям в наиболее чувствительных полосах фотометрической системы (V , B и R) можно провести определение мгновенных положений фотоцентров объекта и найти для него сдвиг и смаз за время прохождения по фокальной плоскости. Эта процедура, в частности, позволяет в реальном времени выделять объекты Солнечной системы, перемещающиеся по небесной сфере с достаточно высокой скоростью.

5.4.6. Наблюдение ярчайших звезд

Емкость пикселя ПЗС ограничена, и она зависит, в первую очередь, от его линейного размера [Хоуэлл, 2006]. Для матричных ПЗС производства фирмы «e2v» с пикселем размером $12 \text{ мкм} \times 12 \text{ мкм}$, которые предполагается использовать в эксперименте «Ли́ра-Б», емкость равна 200 000 электронов. При более высоком сигнале накопленные электроны начинают перетекать в потенциальные ямы соседних пикселей вперед и назад по столбцу. Поскольку наиболее яркая часть изображения звезды занимает 2×2 пикс. (см. выше, подраздел 5.4.2), то максимальный накопленный от нее заряд составляет около 800 000 электронов. С учетом шумов приемника значимый сигнал начинается примерно с 200 электронов. Следовательно, одновременно могут измеряться объекты, число накопленных электронов от которых составляет от 200 до 800 000 тысяч. Блеск таких объектов различается не более чем на $9^{\text{м}}$.

Корректная фотометрия более ярких звезд, одновременно с наиболее слабыми, становится невозможной.

Фотометрия ярчайших звезд осуществляется в специальном режиме, в котором необходимо распределить накапливаемый сигнал по большому числу пикселей. Наиболее простой способ это сделать — расфокусировать изображение. Расфокусировка смещает динамический диапазон фотоприемных устройств в сторону больших потоков. В этом режиме слабые звезды, близ-

кие к пределу обзора, не будут видны, зато будут наблюдаться яркие и ярчайшие звезды.

Наблюдения ярчайших звезд можно проводить при более сильной солнечной засветке, т.е. при меньших углах между осью телескопа и Солнцем. Этот режим может устанавливаться в начале и в конце каждого сеанса наблюдений (в начале и в конце каждого скана неба).

5.4.7. Калибровка приемников излучения

Со временем чувствительность ПЗС-матриц, а также кривые пропускания нанесенных на них фильтров, будут изменяться. Основными причинами таких изменений будет воздействие микроатмосферы МКС и энергичных частиц [Стефанов и др., 1999]. Подобные процессы необходимо учитывать для получения стабильных фотометрических результатов, поскольку эксперимент “Лира-Б” будет продолжаться несколько лет.

При наземной подготовке “Лиры” мы планируем проделать следующие шаги для калибровок.

Спектральная квантовая эффективность всех ПЗС с надлежащими светофильтрами будет тщательно измерена. Подчеркнем, что интерференционные фильтры будут нанесены непосредственно на кремниевую поверхность ПЗС с обратной засветкой. Эти измерения будут сделаны путем сравнения отклика ПЗС с откликом калиброванного неселективного пироэлектрического детектора,

Абсолютная спектральная чувствительность ПЗС будет определена сравнением с излучением модели абсолютно черного тела во Всероссийском научно-исследовательском институте оптико-физических измерений, который является хранителем Национальных эталонов спектральной плотности энергетической яркости и энергетической освещенности.

Для определения характеристик фотометрических приборов в полете предусмотрено регулярное проведение калибровочных процедур. Предполагается использование трех различных типов калибровок:

- 1) Калибровка по излучению Солнца. При проведении этой процедуры фотоприемное устройство освещается рассеянным солнечным светом.
- 2) Калибровка по внутренним источникам излучения. Внутри телескопа предполагается установить несколько источников излучения: ультрафиолетовые и широкополосные («белые») светодиоды. Перед одной группой белых светодиодов будет установлен узкополосный акустооптический фильтр [Ксу и Страуд, 1992], который будет пропускать излучение в полосе порядка нескольких нанометров с центральной длиной волны, меняющейся от 400 до 800 нм. Это устройство позволит контролировать кривые спектральной чувствительности ПЗС.
- 3) Сравнение с наземными наблюдениями. Еще одним способом исследования деградации приемников излучения в эксперименте «Ли́ра-Б» является проведение наземных наблюдений звезд с использованием приемников излучения, аналогичных установленным на борту МКС и предварительно прокалиброванных в лабораторных условиях.

5.5. Причины проведения эксперимента на МКС и вызываемые этим проблемы

Выбор МКС в качестве места проведения эксперимента «Ли́ра-Б» имеет свои достоинства и недостатки. Альтернативой этому является создание автономного спутника.

К достоинствам проведения эксперимента на МКС можно отнести следующее:

- наличие технологической и технической инфраструктуры: 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 грузов (с сильными ограничениями по весу);
- монтаж аппаратуры силами экипажа станции;
- возможность (при крайней необходимости) проведения ремонта аппаратуры силами экипажа.

Однако основной причиной выбора в качестве места проведения эксперимента «Лира-Б» МКС 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.

Стандартные средства космической радиосвязи имеют недостаточную скорость передачи информации — порядка нескольких десятков Мбит/с. Помимо этого, для непрерывной передачи информации хотя бы во время сеансов наблюдений космический аппарат должен все время передачи находиться в прямой видимости наземного пункта приема информации. При ограниченном числе приемных антенн такое возможно только на геостационарных (геосинхронных) или высоких эллиптических орбитах.

МКС, также, не обладает каналом связи, позволяющим передать получаемый поток информации. Поэтому для передачи данных на Землю был выбран другой путь: данные с телескопа передаются в блок управления научным экспериментом, установленный внутри гермоотсека МКС. Там они записываются на сменные внешние носители, которые затем доставляются на Землю в составе спускаемого груза (2–3 раза в год). В качестве носителей информации предполагается использовать сборки флэш-памяти. Эти устройства обладают высокой надежностью и одним из наилучших на сегодня отношением объема записываемой информации к массе порядка 10 Тбайт/кг.

Указанный способ позволяет передать весь объем научной информации, получаемой в эксперименте «Ли́ра-Б», но совершенно не обладает оперативностью. К счастью, обзорный характер эксперимента делает оперативное получение информации несущественным для большинства научных задач эксперимента (см. раздел 5.3).

Помимо перечисленных выше достоинств, размещение научной аппаратуры на МКС имеет и ряд недостатков. Одним из наиболее серьезных недостатков 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. Отметим, что именно по этой причине на пилотируемых станциях не велись астрономические наблюдения, требующие секундных точностей угловой стабилизации инструментов.

Такая проблема существует и для эксперимента «Ли́ра-Б», и для ее преодоления разработана специальная система стабилизации изображения, встроенная в телескоп. Следует учесть, что МКС проектировалась для проведения различных экспериментов, в том числе и экспериментов в условиях микрогравитации, поэтому ее вибрации ниже, чем на всех предыдущих пилотируемых станциях, например на «Мире». Компенсация сдвига будет проводиться путем перемещения фокальной плоскости с помощью высокоточного пьезомеханического гексапода — платформы Гью–Стюарта [Стюарт, 1965] являющегося некоторым современным автоматизированным аналогом “кассеты Ричи” [Мартынов, 1977, § 6]. Сигнал ошибки будет формироваться на шести вспомогательных матрицах системы стабилизации изображения (навигационных матрицах), по которым будут проходить изображения звезд, и точки их траекторий будут считываться 10 – 30 раз в секунду. Эти матрицы показаны выше на рисунке 5.2. При отклонении траекторий изображений звезд от расчетных будут вырабатываться соответствующие сигналы управления гексаподом.

5.6. Ожидаемый объем и временная структура данных

5.6.1. Число наблюдений объектов

Для оценки покрытия небесной сферы было проведено моделирование. Для произвольно выбранного годовичного интервала строился план сканирования. Считалось, что наблюдения возможны, когда МКС находится в тени Земли, а вне тени – если угол между осью визирования и краем диска Солнца превышает 90° . Из трех основных ориентаций телескопа (в плоскости орбиты, южная и северная полярные ориентации; см. подраздел 5.4.3) выбиралась та, которая с учетом засветки позволяла вести наиболее длительные сеансы наблюдений. В типичном плане наблюдений положение телескопа изменялось 14 раз за год. Наблюдения велись 193,4 суток (53% наблюдательного времени), из них сканирование в плоскости орбиты шло 52,2 суток, а полярные области наблюдались по 70,6 суток. Среднее число наблюдений отдельного объекта за год равно 22, а объектов вблизи полюсов мира – до 1000. Моделирование не учитывало прекращение наблюдений на время стыковок и внекорабельной деятельности экипажа, что должно уменьшить наблюдательное время примерно на 10%. Под «отдельным» подразумевается одно прохождение объекта по фокальной плоскости, т.е. его измерения в панхроматическом фильтре и в 10 полосах фотометрической системы.

Исходя из этого, среднее число наблюдений отдельного объекта при пятилетней длительности эксперимента составит 100.

5.6.2. Временная структура наблюдений

В наблюдениях объектов в рамках эксперимента «Ли́ра-Б» присутствуют три различные временные шкалы. Самая короткая шкала связана с последовательным прохождением изображения объекта по 11 матричным ПЗС в фокальной плоскости. Интервал между прохождениями по соседним матрицам составляет около одной секунды.

Средняя шкала связана с наблюдениями объекта на последовательных витках орбиты. Интервал между наблюдениями – около 1,5 часа. Объекты наблюдаются на четырех (или более) последовательных витках.

Самая длинная шкала связана с повторным попаданием объекта в полосу сканирования. Эти попадания происходят не строго периодически, так как объект нельзя наблюдать, когда он оказывается близко от Солнца, а в остальное время моменты наблюдений зависят от графика переключений телескопа. Характерный временной масштаб этой шкалы – порядка месяца.

Схематически эти шкалы показаны на рисунке 5.3.

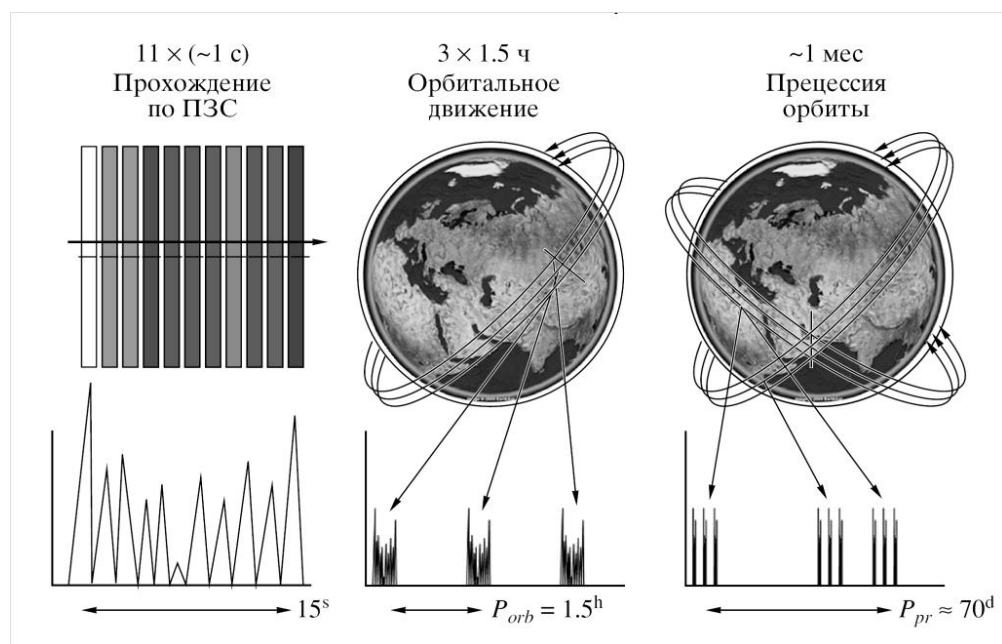


Рис. 5.3.. Временные шкалы, возникающие при проведении наблюдений в КЭ «Ли́ра-Б».

5.7. Реализация проекта

Активная реализация проекта «Ли́ра-Б» была начата в конце 2007 г. В 2008 г. был выполнен аванпроект, а в 2009–2010 гг. – эскизный проект космического эксперимента «Ли́ра-Б». Научным постановщиком эксперимента «Ли́ра-Б» является ГАИШ МГУ, а головным изготовителем комплекса научной аппаратуры эксперимента – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО).

На этих стадиях была показана реализуемость проекта и возможность достижения заложенных в его техническом задании характеристик, основные из которых описаны в начале этой главы.

При выполнении календарного плана, составленного при завершении эскизного проекта, и с учетом прошедшего времени, выполнение эксперимента «Ли́ра-Б» может начаться в 2017 г.

5.8. О названии проекта «Ли́ра-Б»

Проект «Ли́ра-Б» был включен в долгосрочную программу космических исследований в 1999 г. И все эти годы разработчикам проекта постоянно задают вопрос о его названии, чаще всего в двух вариантах: «Почему «Ли́ра» и откуда взялось «Б»?».

С самого начала проект задумывался как фотометрический, а основным опорным объектом всех звездных фотометрических систем является Вега. Однако дать такое название космическому аппарату было уже нельзя: так назывались две межпланетные станции, посланные в 1984–1986 гг. с Земли к комете Галлея [Бламонт и Сагдеев, 1984], хотя название этих межпланетных станций происходит не от имени звезды, а от слов «Венера» и «Галлей».

Вега — ярчайшая звезда (α) созвездия Лиры, а для Международной космической станции в то время использовали наименование “Станция Альфа”. В результате этого совпадения название созвездия и было взято в качестве основного для экспериментов, предложенных ГАИШ.

Эти названия: и «Вега», и «Ли́ра» — были предложены директором ГАИШ А.М. Черепашуком.

Буква «Б» появлялась в названии проекта дважды. Сначала, еще при подготовке заявок, было предложено два проекта. Первым был телескоп со сверхгладкими зеркалами, представляющий собой зеркальный внезатменный коронограф. Кремниевые зеркала, имеющие после суперполировки шерохо-

ватость порядка $1/100$ длины волны, должны были позволить наблюдать слабые галактики вокруг квазаров и планеты (бурые карлики) вблизи звезд. Этот проект был назван «Ли́ра-А».

Второй проект предназначался для фотометрического обзора всего неба и представлял собой упрощенную версию эксперимента, описанного в этой главе. Он получил наименование «Ли́ра-Б».

Вскоре выяснилось, что звездное окружение квазаров и экзопланеты слишком слабы для наблюдений с помощью телескопа с максимальным диаметром 0,5 м при максимальной экспозиции порядка 45 мин, который можно разместить и использовать на борту МКС. В результате этого вариант «Ли́ра-А» был отменен, и остался только фотометрический обзор «Ли́ра-Б», из названия которого убрали букву «Б».

Таким образом, во время включения заявки на этот эксперимент в долгосрочную программу космических исследований проект фигурировал под именем «Ли́ра» без индекса. Однако вскоре после этого выяснилось, что среди аппаратуры, установленной на борту Российского сегмента МКС, уже есть прибор, имеющий название «Ли́ра». Это радиоантенна, установленная на модуле «Звезда» и предназначенная для связи при использовании системы геостационарной ретрансляции «Луч» (Международная космическая станция, средства связи) (рисунок 5.4). Работоспособность этой системы начала восстанавливаться в 2012 г. с запуском КА «Луч-5А».

Согласно нормативным документам, регламентирующим проведение космических экспериментов на борту МКС, все приборы и эксперименты должны быть уникально поименованы, совпадения не допускаются. Поэтому к названию нашего эксперимента была добавлена литера «Б». Так вернулась «Ли́ра-Б».

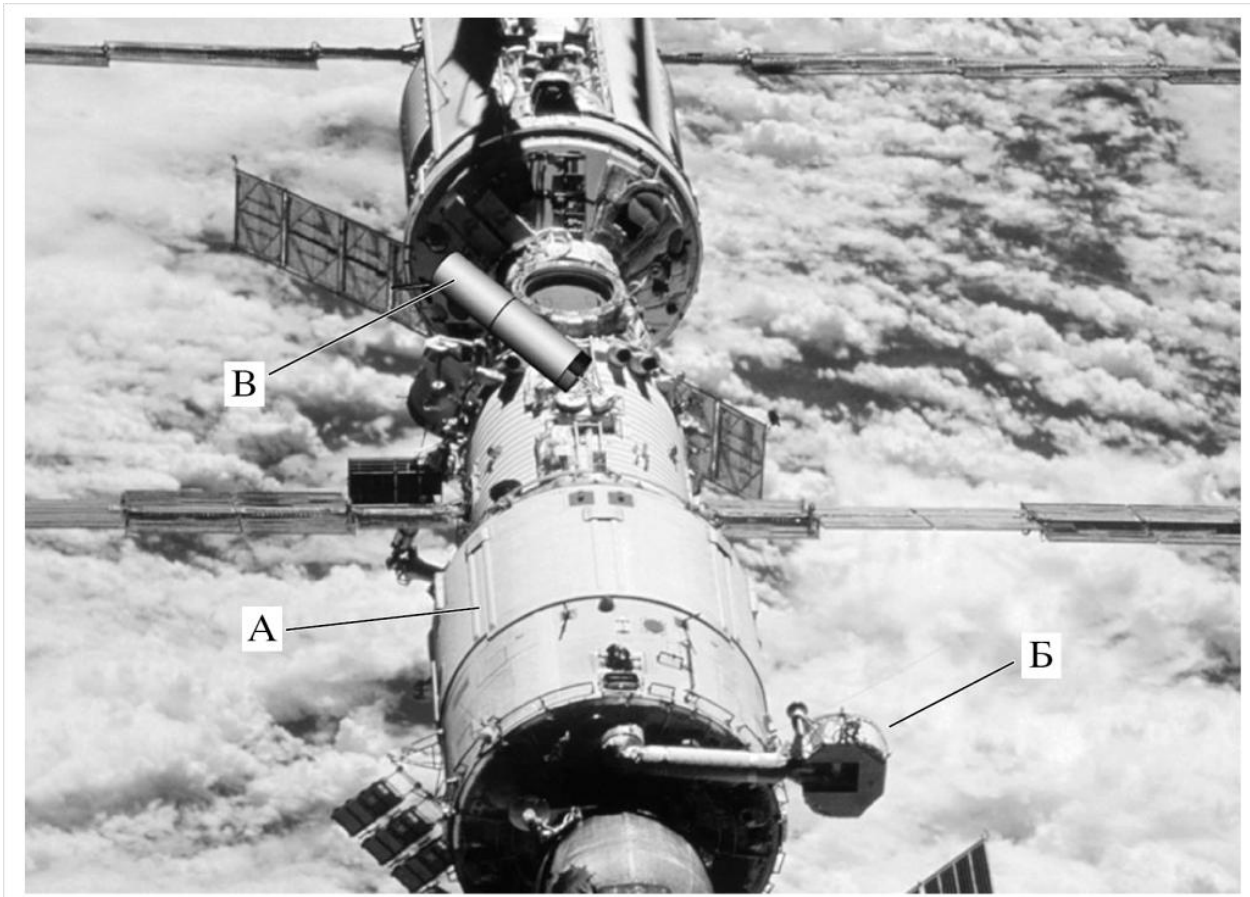


Рис. 5.4. Российский сегмент МКС.

Буквами отмечены: А – служебный модуль “Звезда”, Б – остронаправленная антенна “Лира”, (В) – предполагаемый телескоп “Лира-Б”.

Выводы по главе 5.

Проведенные исследования показывают, что проведение космического эксперимента «Лира-Б» на МКС является реальным и даст большое количество наблюдательного материала для развития целого ряда разделов астрономии. Запланированный многоцветный фотометрический обзор будет высокоточным. На его основе будет создана многомиллионная система фотометрических стандартов.

Глава 6.

Фотометрическая система «Ли́ра-Б» и ожидаемые результаты обзора

6.1. Полосы фотометрической системы «Ли́ра-Б».

Как было описано в предыдущей главе, в фокальной плоскости телескопа «Ли́ра-Б» будут находиться 11 пар матричных ПЗС. Положение полос фотометрической системы «Ли́ра-Б» выбиралось из следующих основных соображений.

Все полосы фотометрической системы «Ли́ра-Б» лежат в области спектральной чувствительности обычных кремниевых матричных ПЗС с обратной засветкой [Миронов, Захаров, Прохоров, 2008; Миронов, Захаров, Прохоров и др., 2010b, Захаров, Миронов, Николаев и др., 2013]. Три первых 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. Четыре полосы с центральными длинами волн 350, 440, 550 и 700 нм практически повторяют полосы *WBVR* Тянь-Шаньского каталога, описанного выше в главе 1. Три фильтра с центральными длинам волн 825, 930 и 1000 нм лежат в ближней инфракрасной области. Одиннадцатая полоса является панхроматической.

Центр фильтра 825 нм (также как и фильтра 700 нм) находится на локальном максимуме в спектрах звезд спектрального класса М. Фильтр 930 нм соответствует атмосферной полосе воды и служит для определения парамет-

ров атмосферы при последующих наземных наблюдениях звезд каталога. Фильтр 1000 нм охватывает наиболее длинноволновую область чувствительности кремниевых ПЗС.

Несмотря на то, что предлагаемая фотометрическая система является широкополосной, она позволяет проводить трехмерную классификацию для многих типов звезд.

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 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 α).

Возможно, что в характеристики фотометрических полос еще будут внесены изменения.

Интерференционные фильтры предполагается наносить непосредственно на поверхность матричных ПЗС. Такая технология была разработана в ФИАН [ТЕСИС], и она 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 пластины и передней поверхности матричного ПЗС порождает многочисленные блики, особенно от ярких звезд. Вышеописанная технология нанесения фильтров позволяет этого избежать. Подробнее о конструкции светофильтров будет сказано в разделе 6.2 и показано на рисунке 6.2.

Таблица 6.1 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
4a	374	50	59	38
5	440	100	73	50
6	550	80	55	37
7	700	80	53	35
7a	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 $\lambda=495\text{нм}$, а максимум чувствительности панхроматического фотоприемника на $\lambda=415\text{нм}$.

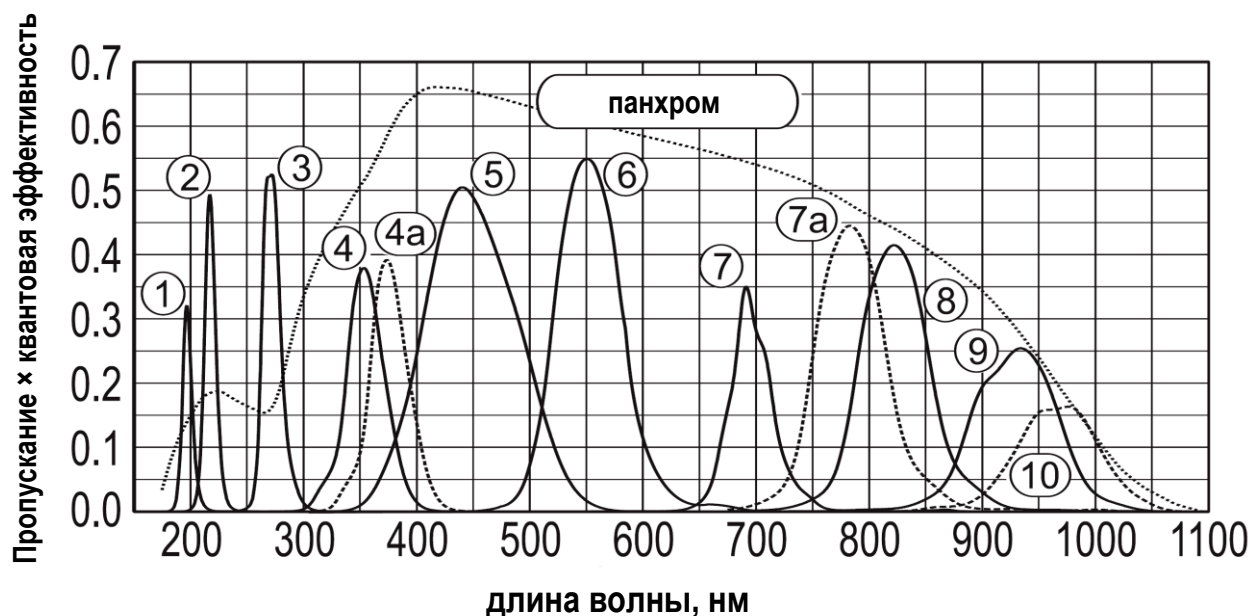


Рис. 6.1. Полосы пропускания фотометрической системы эксперимента «Ли́ра-Б»: Кривые пропускания учитывают пропускание интерференционного фильтра, нанесенного на кремний, и квантовую эффективность ПЗС.

6.2. Техническая реализация полос фотометрической системы «Ли́ра-Б»

При разработке технического задания на расчет кривых чувствительности с помощью интерференционного покрытия, наносимого непосредственно на поверхность матричного ПЗС с обратной засветкой, выдвигался ряд важных требований. Кроме естественных условий на центральную длину волны и ширину полосы пропускания накладывались требования на уровень паразитного пропускания вне рабочей полосы фотоприемников. Особенно важно это было для ультрафиолетовых полос, так как при исследовании холодных звезд спектральных классов К и М мы сталкиваемся с тем фактом, что при измерении ультрафиолетовых потоков от таких звезд наличие даже малого паразитного пропускания коренным образом искажает результаты измерений.

За помощью в расчетах необходимых интерференционных покрытий мы обратились в лабораторию оптических систем ФИАН им. П.Н.Лебедева, где такие расчеты были для нас выполнены в порядке оказания технической помощи. Было установлено, что требуемые характеристики возможно получить, применяя технологию напыления на кремний чередующихся тонких слоев металла и диэлектрика.

В таблице 6.2 приведен в качестве примера результат расчета такой конструкции для светофильтра с центральной длиной волны 195 нм.

Таблица 6.2. Конструкция светофильтра 195 нм. Металл — Al, Диэлектрик — SiO₂.

Номер слоя, нумерация от подложки	Вещество слоя	Толщина слоя, нм
1	металл	0
2	диэлектрик	28,65
3	металл	15,00
4	диэлектрик	40,89
5	металл	30,00
6	диэлектрик	39,04
7	металл	40,00
8	диэлектрик	41,05

На рисунке 6.2 показана полученная кривая пропускания. На верхней панели показан участок зоны основного пропускания, а на нижней — широкий участок, включая ближнюю инфракрасную область. На рисунке отчетливо видно, что в большинстве участков паразитное пропускание фильтра менее 10^{-6} , лишь около 900 нм оно слегка увеличивается до 2×10^{-6} . Для остальных фильтров паразитное пропускание также не превышает 10^{-6} .

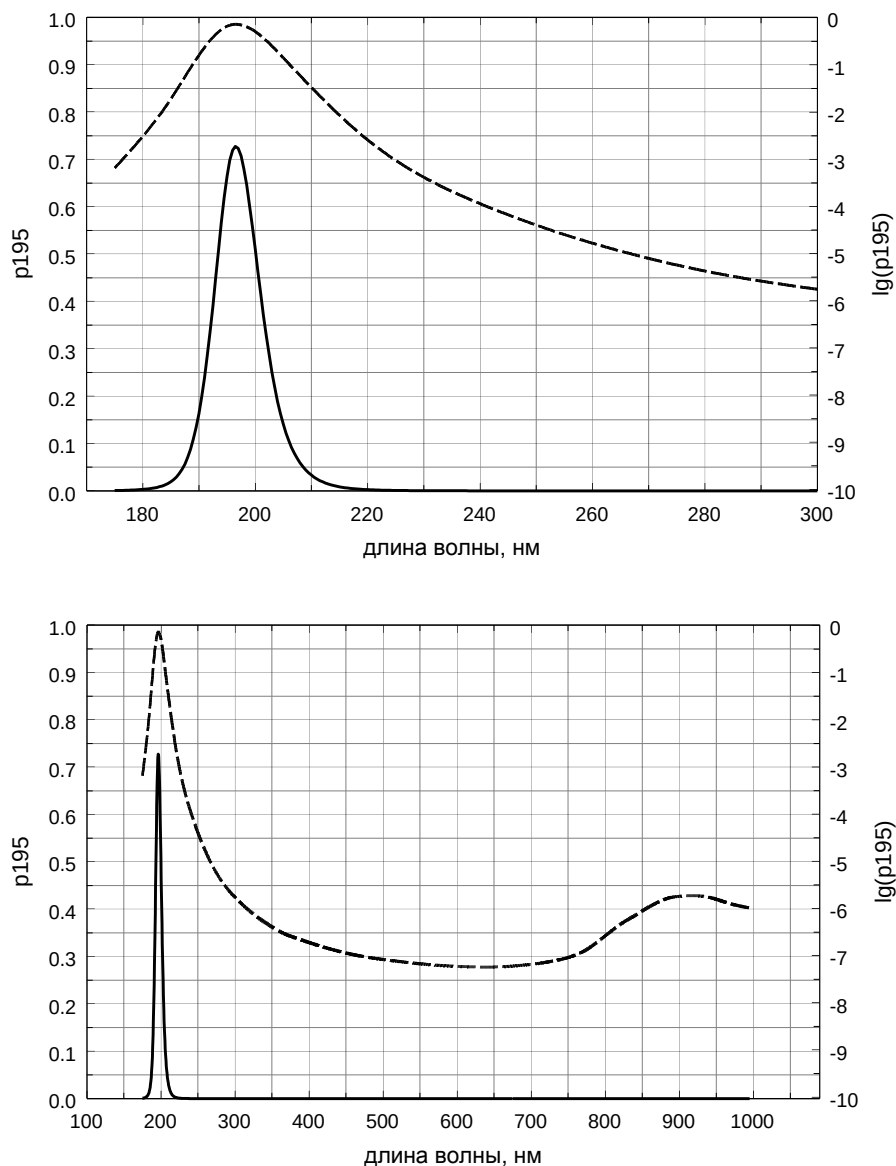


Рис. 6.2. Кривая пропускания фильтра 195 нм. На верхней панели показана рабочая область светофильтра, а на нижней — полная область спектральной чувствительности ПЗС. На левой вертикальной оси отложен коэффициент пропускания (сплошная линия), а на правой — его логарифм (штриховая линия).

6.3. Определение межзвездного поглощения по фотометрии в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б».

По кривым реакции фотометрических полос, предварительно рассчитанных специалистами ФИАН, мы вычислили показатели цвета для нескольких двухцветных диаграмм, используя атласы распределений энергии в спектрах звезд и метод синтетической фотометрии. В качестве исходных данных мы использовали атлас эмпирических средних распределений энергии Пиклса [1988]. В качестве нормального закона межзвездного поглощения была взята кривая из работы Флукса и др. [1994, таблица 6].

На традиционных диаграммах ($U - B$, $B - V$) или ($W - B$, $B - V$) покраснение может быть определено только для спектральных подклассов от O до B3. Только для таких спектров линия нарастающего покраснения не имеет на двухцветной диаграмме множественных пересечений с последовательностями для разных классов светимости. Ситуация осложняется тем, что звезды самых ранних спектральных классов в основном располагаются вблизи областей звездообразования, где существуют особые условия для межзвездного вещества.

6.3.1. Определение покраснения с помощью фотометрии в ультрафиолетовых полосах

На рисунке 6.3 показана двухцветная диаграмма, построенная из ультрафиолетовых величин фотометрической системы «Ли́ра-Б» m_{195} , m_{218} и m_{270} , которым соответствуют показатели цвета $(m_{195} - m_{218})$ и $(m_{218} - m_{270})$ [Амбарцумян, Миронов, Захаров, 2003, Миронов, Захаров, Прохоров и др., 2010b].

Из рисунка следует, что 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!).

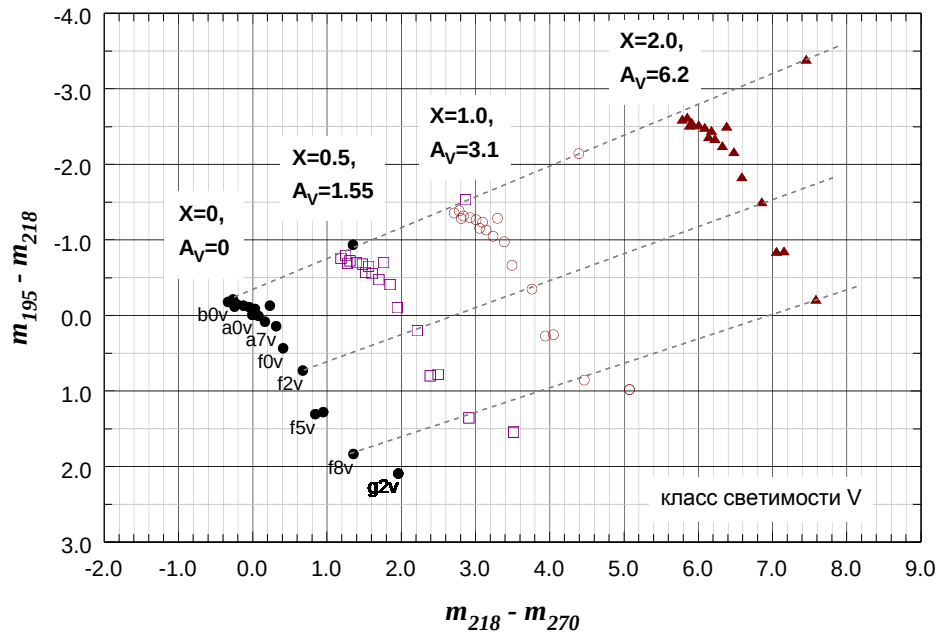


Рис. 6.3. Определение межзвездного поглощения по звездам спектральных классов О – F главной последовательности. Использованы полосы “195”, “218” и “270”.

При всей своей эффективности диаграмма ($m_{195} - m_{218}$, $m_{218} - m_{270}$) обладает тем недостатком, что в полосе “195” проникающая способность системы наименьшая и только сравнительно небольшое количество наиболее ярких звезд будут доступны наблюдению. Проницающая способность в полосе “218” выше, поэтому можно пользоваться диаграммой ($m_{218} - m_{270}$, $m_{270} - m_{350}$). Она представлена на рисунке 6.4. Из рисунка следует, что для звезд в интервале спектров от О до А7 вполне возможно определять поглощение.

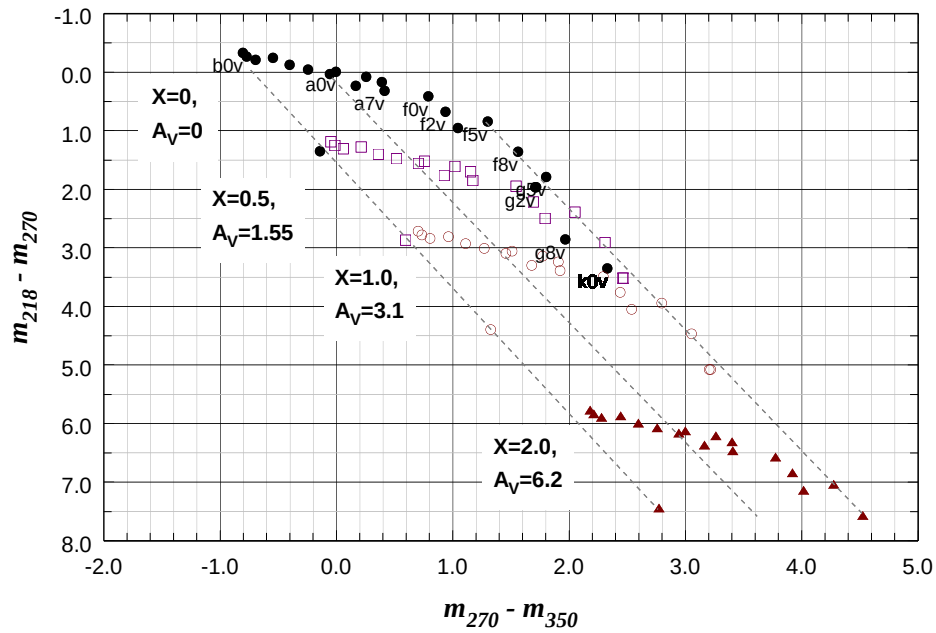


Рис. 6.4. Определение межзвездного поглощения по звездам спектральных классов О – А7 главной последовательности. Использованы полосы “218”, “270” и “350”.

На рисунках 6.3 и 6.4 обращает на себя внимание точка, сильно смещенная по направлению линии покраснения, выпадающая из последовательности и представляющая спектральный класс О5 V. Это действительно покрасненный спектр [Кильпио, Малков, Миронов, 2012]. Дело в том, что в атласе Пиклса, которым мы все время пользовались, несколько спектров ранних спектральных классов являются «неотбеленными» или не полностью отбеленными в ультрафиолетовой области. Влияние полосы межзвездного поглощения около 218 нм исказило спектры атласа Пиклса В0 I, В1 I, В5 I, В5 II, В8 I, и, в особенно сильной степени, В2 II, О5 V и О8 III.

6.3.2. Определение покраснения с помощью фотометрии в полосе “350” и полосах видимого и инфракрасного диапазона

Не следует думать, что только полосы в диапазоне длин волн 200 – 300 нм пригодны для определения поглощения. На рисунке 6.5 представлена диаграмма ($m_{350} - m_{700}$, $m_{700} - m_{930}$). Полосы “350” и “700” являются аналогами полос W и R системы WBVR. Рисунок подтверждает тот факт, что

по этой диаграмме можно определять поглощение как по горячим звездам в интервале спектральных классов $O - B5$, так и по гигантам и карликам $G5 - K5$. В этих участках диаграммы нет множественных пересечений последовательностей звезд и линий нарастающего поглощения. Точки, относящиеся к карликам (заполненные кружки) и к гигантам (прямые крестики) показывают практически единую последовательность и по ним можно определять поглощение, не определяя класса светимости

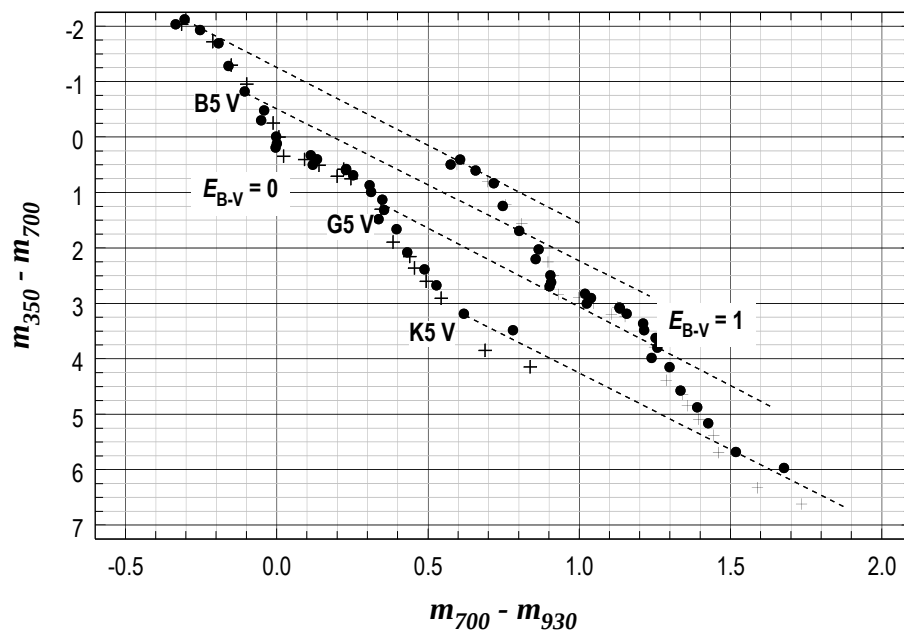


Рис. 6.5. Определение межзвездного поглощения по карликам и гигантам спектральных классов $G - K$. Используются полосы "350", "700" и "930".

6.3.3. Определение межзвездного поглощения по поздним гигантам спектрального класса M .

Обычно при использовании на двухцветных диаграммах показателей цвета, составленных из звездных величин, определенных в полосах аналогичных полосам B, V и R системы $UBVR$, последовательности звезд и линии нарастающего поглощения имеют практически одинаковый наклон, что не позволяет разделить эффекты температуры от эффектов межзвездного покраснения света. Однако из этого правила есть одно важное исключение.

Рассмотрим диаграмму $(m_{440} - m_{555}, m_{555} - m_{700})$. Она аналогична диаграмме $(B - V, V - R)$ и представлена на рисунке 6.6. Замечательным является то, что линия нормальных гигантов имеет крутой излом около спектрального класса M2 и становится почти перпендикулярной линии нарастающего поглощения. Следовательно, по поздним гигантам можно уверенно определять

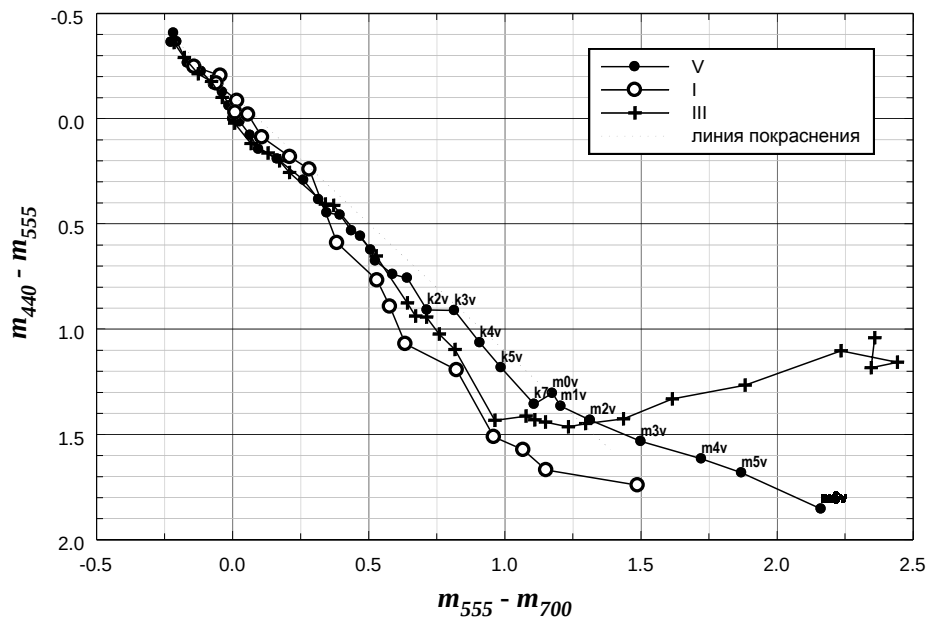


Рис. 6.6. Двухцветная диаграмма $(m_{440} - m_{555}, m_{555} - m_{700})$, аналогичная диаграмме $(B - V, V - R)$ для непокрашенных звезд. Сплошными кружками представлены звезды главной последовательности, прямыми крестиками — гиганты и незаполненными кружками — сверхгиганты.

межзвездное поглощение. Правда, у этого метода есть существенный недостаток. Большинство поздних гигантов являются переменными звездами, и эта переменность вносит ошибку в величину поглощения. Но амплитуда переменности у большинства красных гигантов не превышает немногих десятых долей звездной величины, поэтому при больших значениях поглощения такая переменность не играет существенной роли.

Представленная на рисунке 6.6 диаграмма не является оптимальной. Набор фотометрических полос системы «Лири-Б» позволяет построить диаграммы, аналогичные диаграмме $(B - V, V - R)$, но позволяющие определять поглощение с большей точностью. В качестве примера на рисунке 6.7 представлена диаграмма $(m_{440} - m_{700}, m_{700} - m_{930})$, на которой размах ответвления

красных гигантов достигает двух звездных величин по обеим осям, что в два раза больше, чем на рисунке 6.6. Это в значительной степени уменьшает ошибку, вносимую переменностью.

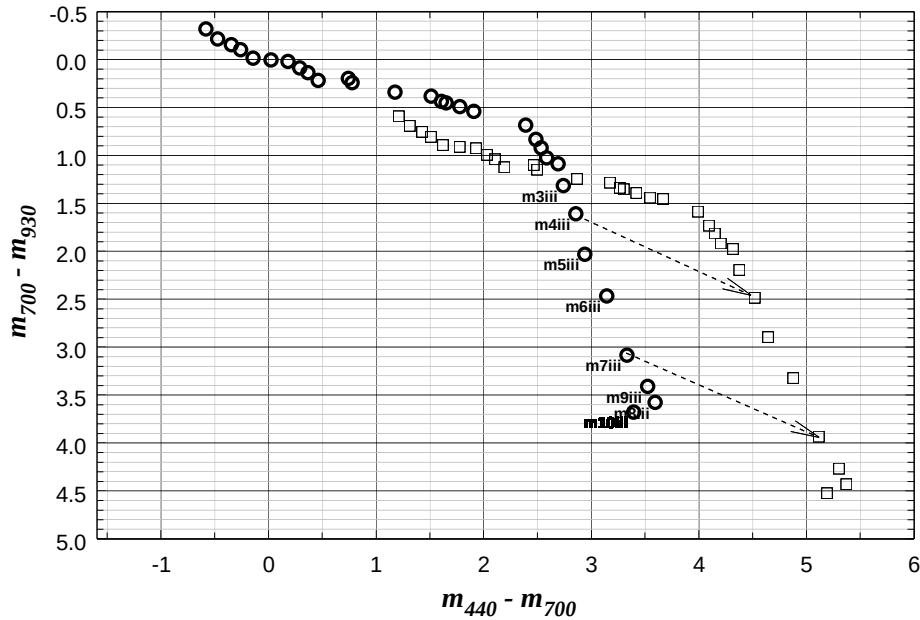


Рис. 6.7. Двухцветная диаграмма ($m_{440} - m_{700}$, $m_{700} - m_{930}$). На рисунке кружками показана последовательность непокрашенных нормальных гигантов, квадратами — последовательность гигантов, имеющих $A_V = 1^m,0$. Штриховые линии со стрелками — линии нарастающего поглощения.

6.4. Трехмерная спектральная классификация с помощью фотометрической системы «Ли́ра-Б»

Известно, что широкополосные фотометрические системы в общем случае не дают возможности провести классификацию звезд по спектральному классу, классу светимости, металличности и величине межзвездного поглощения. Двухцветные диаграммы, показанные в предыдущем разделе, позволяют с уверенностью заявить, что на их основе можно будет построить детальную карту межзвездного поглощения в Галактике и разработать алгоритм его учета. Поэтому в данном разделе показаны некоторые возможности проведения классификации непокрашенных звезд в фотометрической системе «Ли́ра-Б» с точки зрения определения их спектральных классов, клас-

сов светимости и металличности. Работа по поиску оптимальных диаграмм для проведения классификации продолжается. В качестве исходных данных мы вновь воспользовались атласом Пиклса [1998], а также атласами теоретических распределений энергии, рассчитанных в работах Лежена и др. [1997, 1998].

6.4.1. Отделение сверхгигантов от звезд главной последовательности.

Для горячих звезд сверхгиганты отделяются от звезд главной последовательности на диаграмме $(m_{440} - m_{700}, m_{350} - m_{550})$, которая представлена на рисунке 6.8. Различие показателей цвета составляет около $0^m,2$. Это, конечно, немного, но при точной фотометрии нет особенных проблем обнаружить

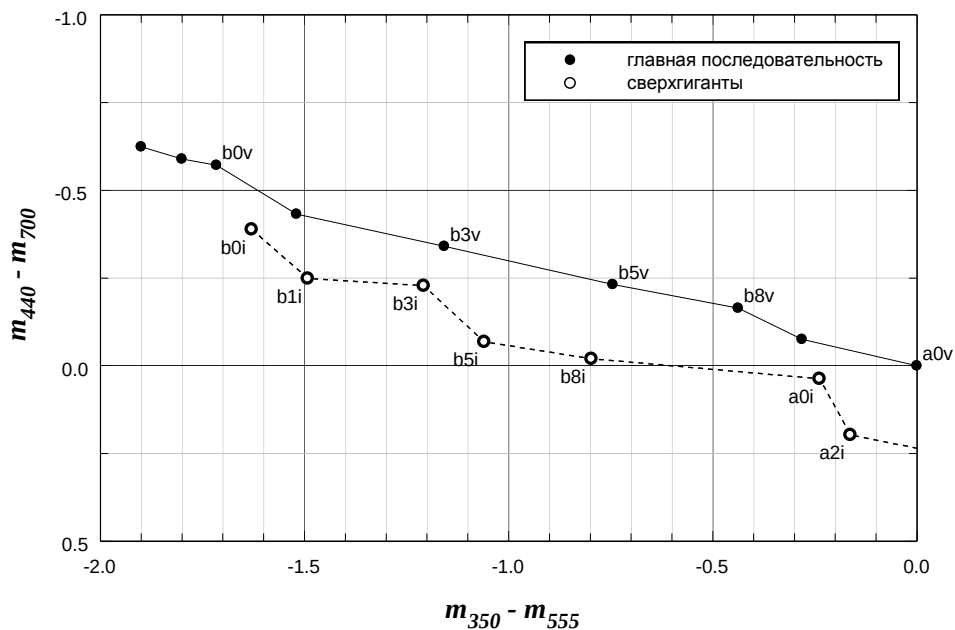


Рис. 6.8. Отделение сверхгигантов от звезд главной последовательности в области спектральных классов О и В.

такую разницу.

Примерно такая же разница между показателями цвета у сверхгигантов и звезд главной последовательности в области спектральных классов G, K и M на диаграмме $(m_{700} - m_{930}, m_{440} - m_{700})$. Это иллюстрирует рисунок 6.9.

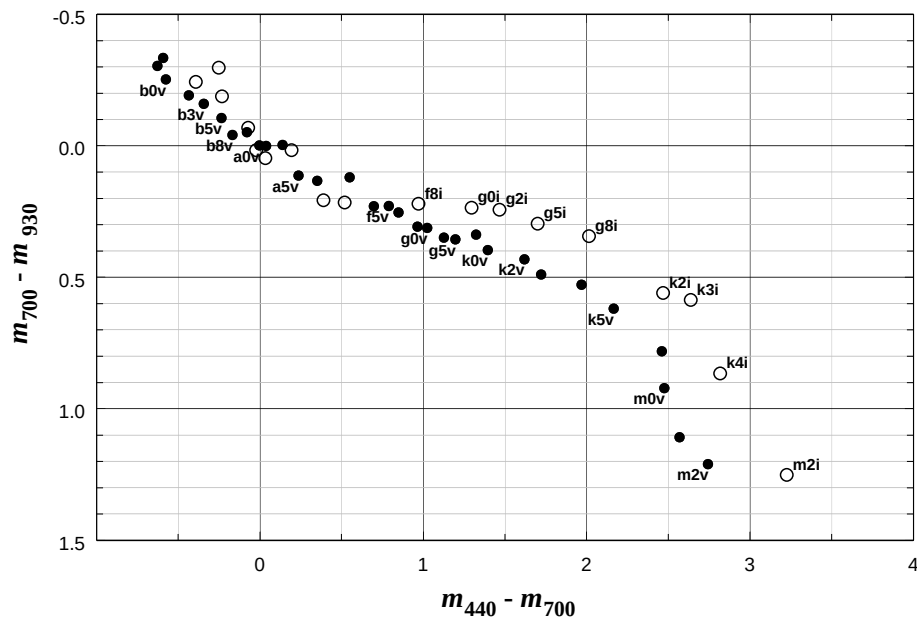


Рис. 6.9. Отделение сверхгигантов от звезд главной последовательности в области спектральных классов G, K и M.

6.4.2. Разделение звезд спектральных классов F-G-K-M по металличности

На рисунке 6.10 приведена двухцветная диаграмма, на которой звезды спектральных классов F-G-K-M разделяются по металличности. Исходными данными послужили теоретические распределения энергии в спектрах [Лежен и др., 1997, 1998].

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

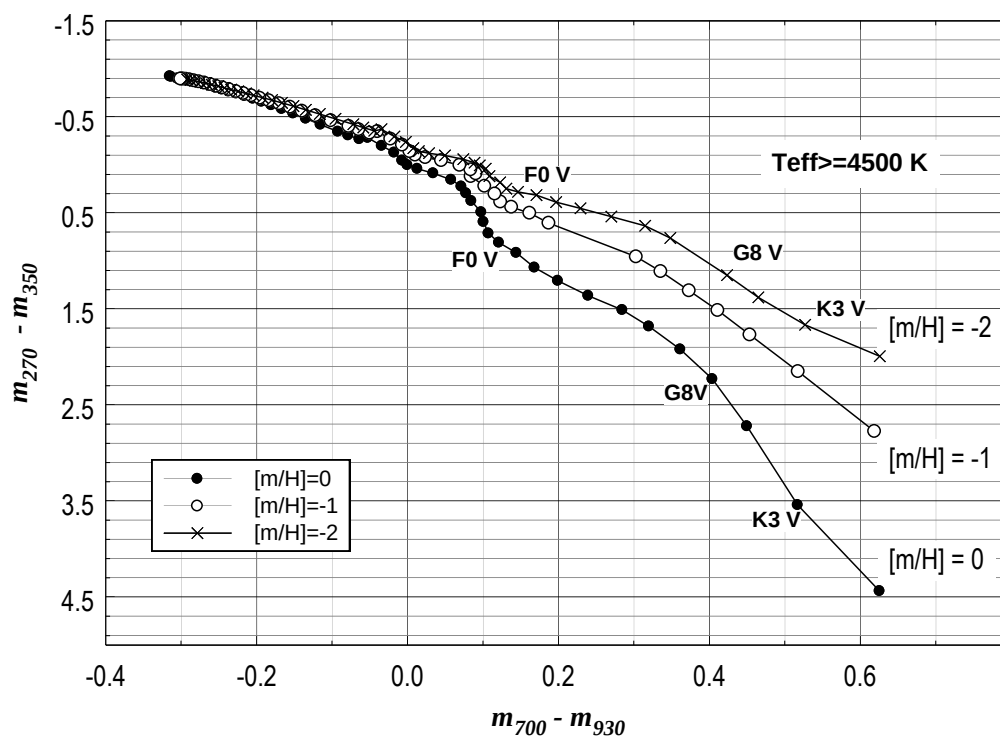


Рис. 6.10. Положение звезд главной последовательности с солнечной металличностью (заполненные кружки) и звезд с десятикратным (пустые кружки) и стократным (косые кресты) дефицитом металлов на диаграмме $(m_{700} - m_{930}, m_{270} - m_{350})$. Различие в показателе цвета $(m_{270} - m_{350})$ достигает одной величины.

6.5. Количество звезд разных спектральных классов, наблюдаемое в полосах будущего каталога «Ли́ра-Б»

6.5.1. Предельные звездные величины в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б»

Размер пикселя фотометрических ПЗС составляет 12 мкм, что при фокусном расстоянии телескопа $F = 3$ м соответствует угловому размеру $0,8''$. МКС совершает один орбитальный оборот за 1,5 ч, откуда следует, что длительность экспозиции, т. е. время прохождения одной ПЗС (вдоль столбца длиной 300 пикс,) при сканировании неба в плоскости орбиты МКС составляет $\tau = 1,04$ с. Полученная длительность экспозиции, вместе с приведенными выше параметрами телескопа и фильтров, позволяет вычислить предельную звездную величину для каждой спектральной полосы. Метод расчета пре-

дельных звездных величин для всех полос фотометрической системы «Ли́ра-Б» и для звезд различных спектральных классов приведен в Приложении «Д». Результаты расчета, усредненные по группам спектральных классов, приведены в таблицах 6.3, 6.4, 6.5, и 6.6. В таблице 6.3 даны предельные величины для случая одного наблюдения и требования, чтобы среднеквадратичная ошибка не превышала $0^m,01$, в таблице 6.4 — для случая одного наблюдения и ошибки, не превышающей $0^m,1$, в таблице 6.5 — для 100 наблюдений и ошибки не более $0^m,1$. Результаты для случая 100 наблюдений и ошибки не более $0^m,01$ численно совпадают с данными в таблице 6.4. Наконец, в таблице 6.6 приведены величины, при которых наступает переполнение пикселей. Более яркие звезды нужно будет наблюдать в специальном режиме для ярких объектов.

Таблица 6.3. 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 $S/N=100$; $\sigma = 0^m,01$.

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 6.4. 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 6,5, 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

Таблица 6.6. 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

В Приложении «Е» даны более подробные таблицы, в которых предельные величины приведены для 108 спектров из атласа Пиклса [1998] и для 14-ти вариантов полос фотометрической системы «Ли́ра-Б».

6.5.2. Ожидаемое количество звезд разных спектральных классов.

Чтобы сделать оценку количества звезд разных спектральных классов, которые будут наблюдаться в ходе фотометрического обзора «Ли́ра-Б», необходимо выбрать за основу некоторый опорный каталог, содержащий фотометрическую информацию и спектральную классификацию. Идея состоит в том, чтобы в каждом направлении в Галактике определить количество

звезд до расстояния, обусловленного предельной звездной величиной этого опорного каталога, а затем проэкстраполировать это количество до расстояния, соответствующего предельной величине каталога «Лира-Б». Если опорный каталог полон в том смысле, что в нем соотношение численностей звезд разных спектральных типов правильно отражает истинное их соотношение в Галактике, тогда можно надеяться, что производимая экстраполяция адекватно отразит ожидаемое количество звезд в каталоге «Лира-Б». Разумеется, экстраполировать нужно по отдельности для каждого сочетания спектрального класса и класса светимости. Однако ситуация является сложной из-за того, что такого опорного каталога, вообще говоря, не существует.

Наиболее близко подходит к удовлетворению этих требованиям каталог Hipparcos.

Во-первых, он практически полон до седьмой звездной величины.

Во вторых, звездная величина H_r измерена с высокой точностью.

В-третьих, каталог содержит данные о спектральных классах и классах светимости. В тех случаях, когда класс светимости не указан, его можно оценить, используя величину H_r и значения параллаксов, приведенные в каталоге.

Ход вычислений подробно описан в Приложении «Ж». Количество ожидаемых звезд всех спектральных классов для случая 100 наблюдений с отношением сигнала к шуму 10 представлено в таблице 6.4.

Таблица 6.4

полоса	количество звезд	полоса	количество звезд
«195»	$3,08 \cdot 10^6$	«700»	$7,61 \cdot 10^8$
«218»	$4,37 \cdot 10^6$	«785»	$1,36 \cdot 10^8$
«270»	$7,23 \cdot 10^6$	«825»	$1,20 \cdot 10^8$
«350»	$2,53 \cdot 10^7$	«930»	$8,54 \cdot 10^7$
«374»	$3,26 \cdot 10^7$	«1000»	$5,70 \cdot 10^7$
«440»	$1,62 \cdot 10^8$	«панхром», подложка 14 нм	$7,62 \cdot 10^8$
«550»	$3,25 \cdot 10^7$	«панхром», подложка 30 нм	$8,24 \cdot 10^8$

На рисунках 6.11, 6.12 и 6.13 показано среднее по всему небу число звезд разных спектральных классов и классов светимости на квадратный градус. Отношение сигнала к шуму принято равным 10. Для каждого спектрального класса количество звезд главной последовательности показано кружками, количество гигантов — треугольниками и полное количество — квадратами.

Рисунок 6.11. Ультрафиолетовые полосы. $S/N = 10$.

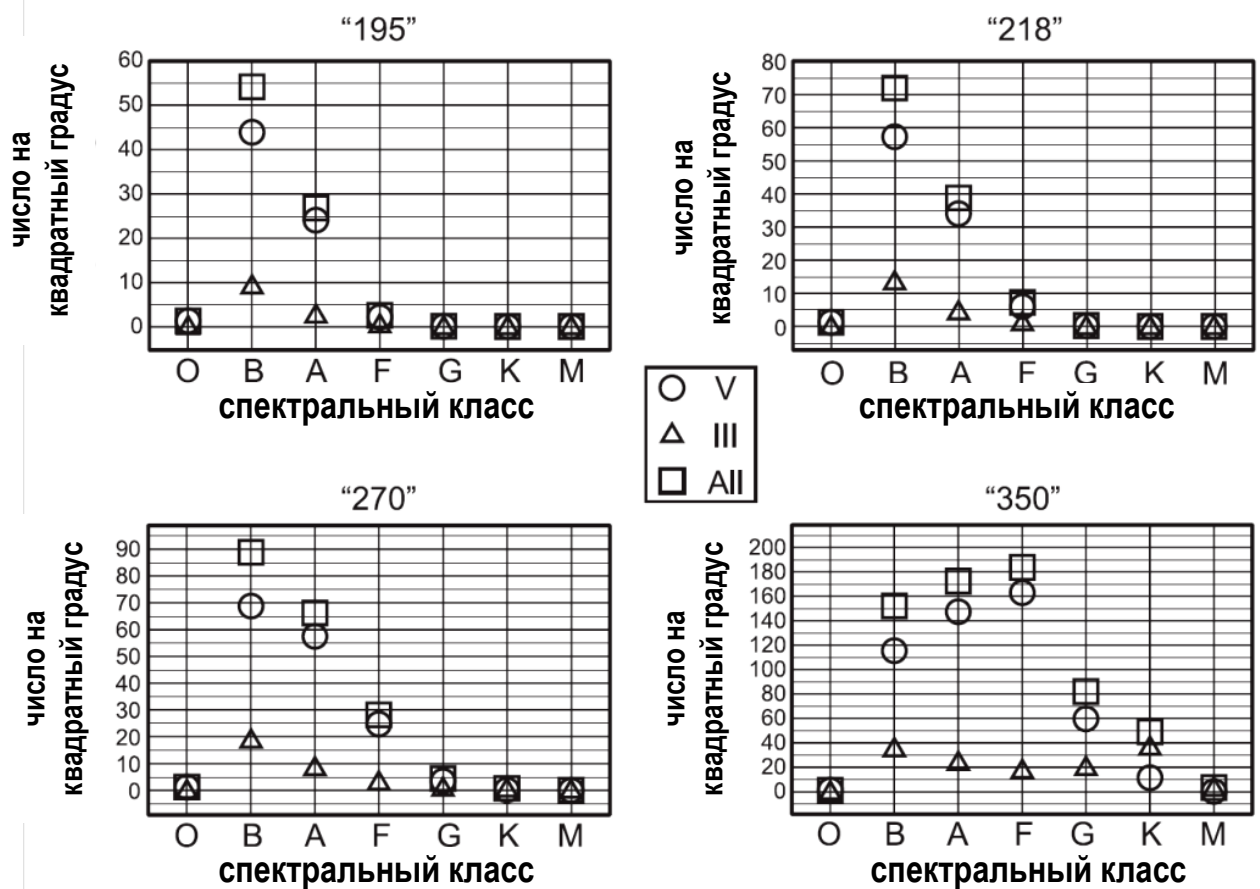
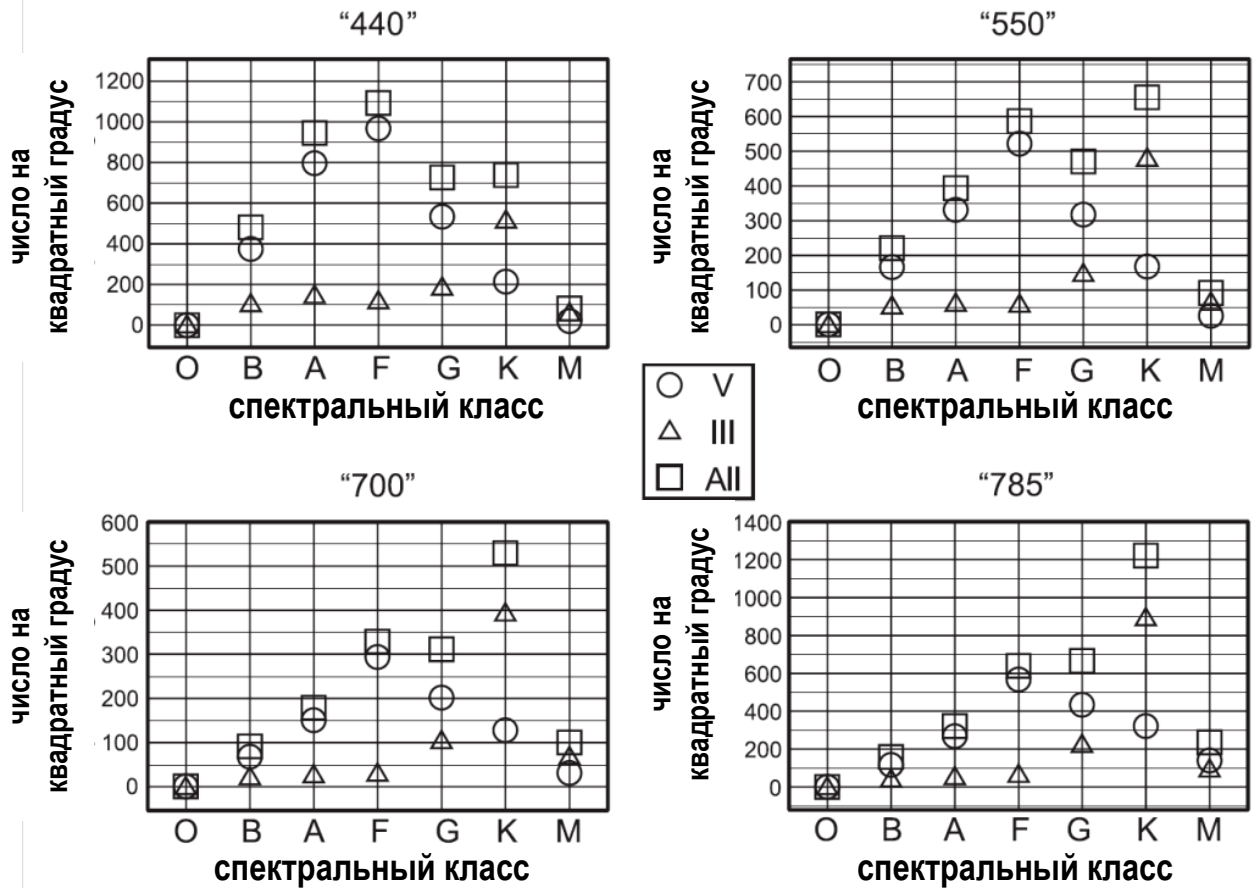
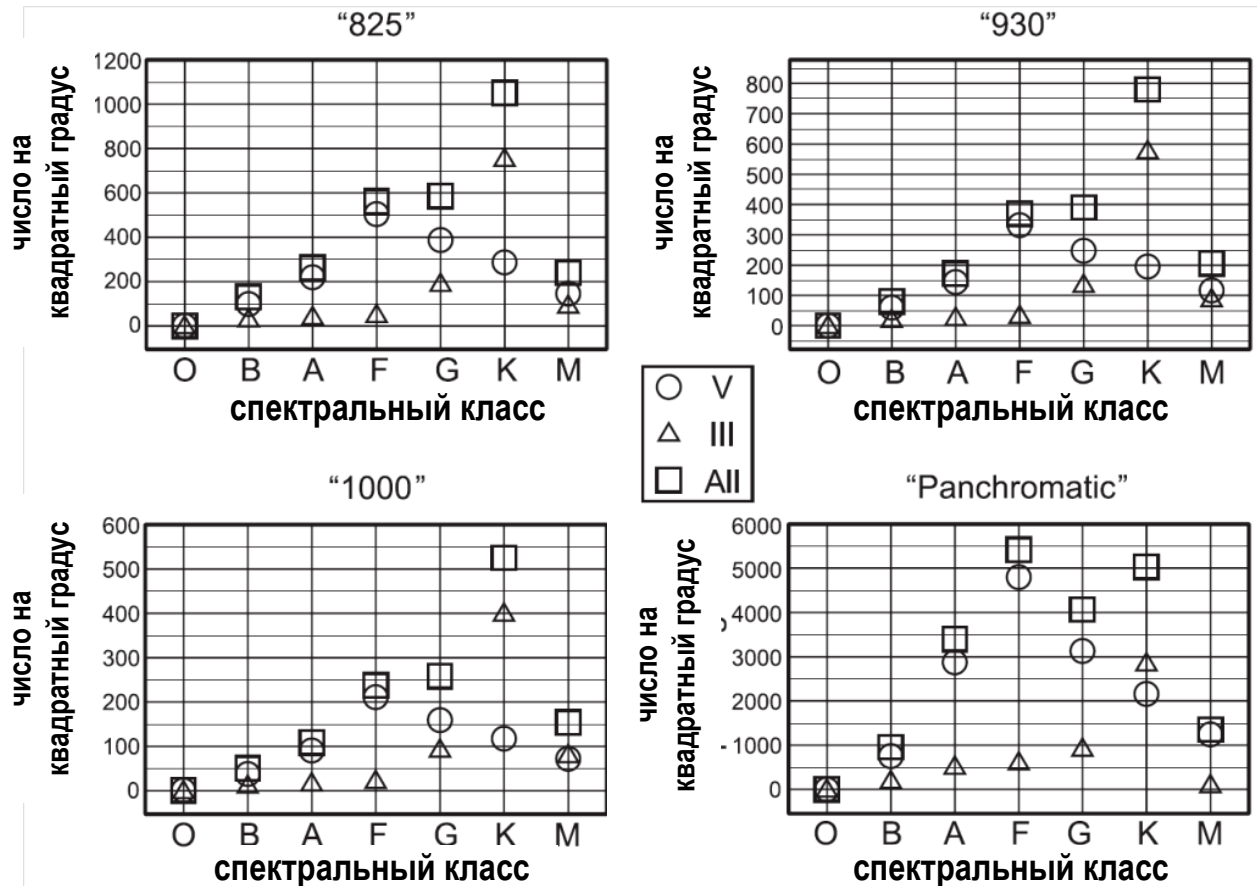


Рисунок 6.12. Полосы в видимом диапазоне. $S/N = 10$ Рисунок 6.13. Полосы в инфракрасном диапазоне и панхроматическая полоса. $S/N=10$ 

В ультрафиолетовых полосах практически мы измерим только звезды спектральных классов В и А, Только в полосе “350” уже будет ощутимое количество звезд F, G, и даже K,

Наибольшее число звезд будет наблюдаться в полосах “440” и “700”: более 1000 объектов различных спектральных классов на квадратный градус, и, конечно в панхроматической полосе. Заметим, что в полосах видимого и инфракрасного диапазона преобладающими будут гиганты спектрального класса K,

6.6. Подходы к улучшению фотометрической точности и созданию высокоточной опорной системы звезд-стандартов на всём небе

Очевидно, что опорная система звезд стандартов нужна, чтобы установить нуль-пункт и шкалу звездных величин.

Если можно сравнить измерения звезды-стандарта и исследуемого объекта, то чтобы определить звездную величину этого объекта, нет необходимости проводить абсолютные измерения. 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. Но не это самое важное. Важнее то, что результаты измерений под атмосферой различны в условиях разных обсерваторий, для разных объектов, для разных зенитных расстояний и (это самое главное!) изменяются со временем. Мы же хотим, чтобы в итоге наблюдения были приведены к единым характеристикам для данной фотометрической системы.

Система опорных фотометрических стандартов должна удовлетворять следующим требованиям:

Система должна быть стабильной во времени. Чтобы контролировать стабильность параметры всех звезд из списка стандартов, включая их возможные вариации блеска и переменность спектра, должны быть тщательно изучены.

Система должна быть удобна для использования. Для этой цели должна быть создана достаточно плотная сетка стандартов в различных диапазонах величин звезд. В идеале число опорных объектов должно было бы достигать 1-6 миллионов. В таком случае при использовании большого наземного телескопа в его поле зрения, размер которого обычно составляет $10' \times 10'$, в среднем содержалось бы от одного до четырех опорных объектов.

Система должна содержать стандарты в различных диапазонах звездных величин. Наиболее яркие стандарты должны быть изучены по особой программе. Величины стандартов, принадлежащих различным диапазонам блеска, должны быть хорошо скоординированы друг с другом.

Система должна поддерживать высокую внутреннюю точность. Обычно считается, что таковая точность для индивидуального наземного наблюдения равна $0^m,01$ (нормальная точность наблюдений). Стандарты опорной системы должны быть измерены в 3-10 раз точнее.

Система должна быть равноточной. Точность опорных стандартов в систематическом отношении практически не должна зависеть ни от положения на небе, ни от блеска и показателя цвета, ни от других параметров.

С помощью системы опорных фотометрических стандартов мы должны уметь:

- вычислять параметры атмосферы Земли для точного учета атмосферной экстинкции; кривые реакции при наземной фотометрии всегда непостоянны из-за изменений атмосферной прозрачности, поэтому стандарты опорной системы должны обеспечивать величины, которые можно редуцировать к унифицированным кривым ре-

акции; некоторые из стандартов должны обладать распределениями энергии в спектре, делающими возможным вывести параметры моделей земной атмосферы с требуемой точностью;

- переводить результаты измерений, сделанных в текущей инструментальной фотометрической системе, спектральные параметры которой медленно дрейфуют, в общую (стандартную!) фотометрическую систему,
- выводить уравнения трансформации между различными фотометрическими системами.

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;
- распределение энергии в спектрах звезд-стандартов должно обеспечивать простую и однозначную трансформацию из инструментальной фотометрической системы в стандартную и обратно, а также из стандартной системы в любую другую фотометрическую систему; средняя ошибка такой трансформации должна быть менее чем $0^m,001 - 0^m,003$;
- звезды не должны показывать переменность в пределах погрешности аппаратуры, т.е. их величины должны быть неизменны с точностью $0^m,001 - 0^m,003$ величины; если это не так, то должен быть известен закон изменения блеска во времени так, чтобы обеспечить такую же точность измерений величин;
- двойные должны быть исключены;
- звезды не должны иметь в ближайшей окрестности звезд-помех, мешающим измерениям; для слабых звезд-стандартов дополнитель-

но 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).

Наконец, каталог опорных фотометрических стандартов *должен* быть дополнен:

- таблицами, описывающими набор внеатмосферных кривых реакции его собственных фотометрических полос;
- таблицами типичных распределений энергии в спектрах (РЭС) 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 метода контроля кривых реакции, использующего наблюдения стандартов в рекомендованных полосах.
- описанием метода трансформации величин в среднюю и стандартную системы;
- описанием метода определения атмосферной экстинкции; описанием процедур и данными для вычисления средних кривых пропускания земной атмосферы при различных условиях и описанием процедур выведения поправок к среднему атмосферному пропусканию, выводимых 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.

Желательным дополнением явились бы процедуры, помогающие подготовить планы наблюдений в зависимости от характеристик аппаратуры, даты и времени наблюдений.

Только комбинация всех этих условий может обеспечить создание системы фотометрических стандартов, удовлетворяющей современным требованиям точности.

Одной из важнейших задач космического эксперимента «Ли́ра-Б», является создание системы высокоточных фотометрических стандартов. Эксперимент должен создать именно такой каталог звезд-стандартов, дополненный набором необходимых данных и описанием процедур обработки.

Большое количество звезд, которое будет измерено в эксперименте «Ли́ра-Б», безусловно, позволит подобрать несколько миллионов стандартов, равномерно распределенных по небесной сфере. Одновременное измерение звездных величин в 10 полосах позволит эффективно применить корреляционный метод обнаружения переменных звезд [Миронов, Захаров, Николаев, 2003, Крусанова, Миронов, Захаров, 2013].

Очевидно, что возникает вопрос: каким образом каталог звездных величин и показателей цвета в полосах фотометрической системы «Ли́ра-Б» может быть полезен рядовому наблюдателю, имеющему свой фотометр со своим набором фильтров и, следовательно, со своей инструментальной фотометрической системой? Ответ на этот вопрос таков: каталог точных звездных величин, как в смысле случайных, так и в смысле систематических ошибок, позволяет широко использовать методы синтетической фотометрии. Если имеется каталог, обладающий вышеперечисленными свойствами, то легко

создать каталог стандартов в заданной фотометрической системе. Чтобы это сделать, не нужно выполнять дополнительные наблюдения!

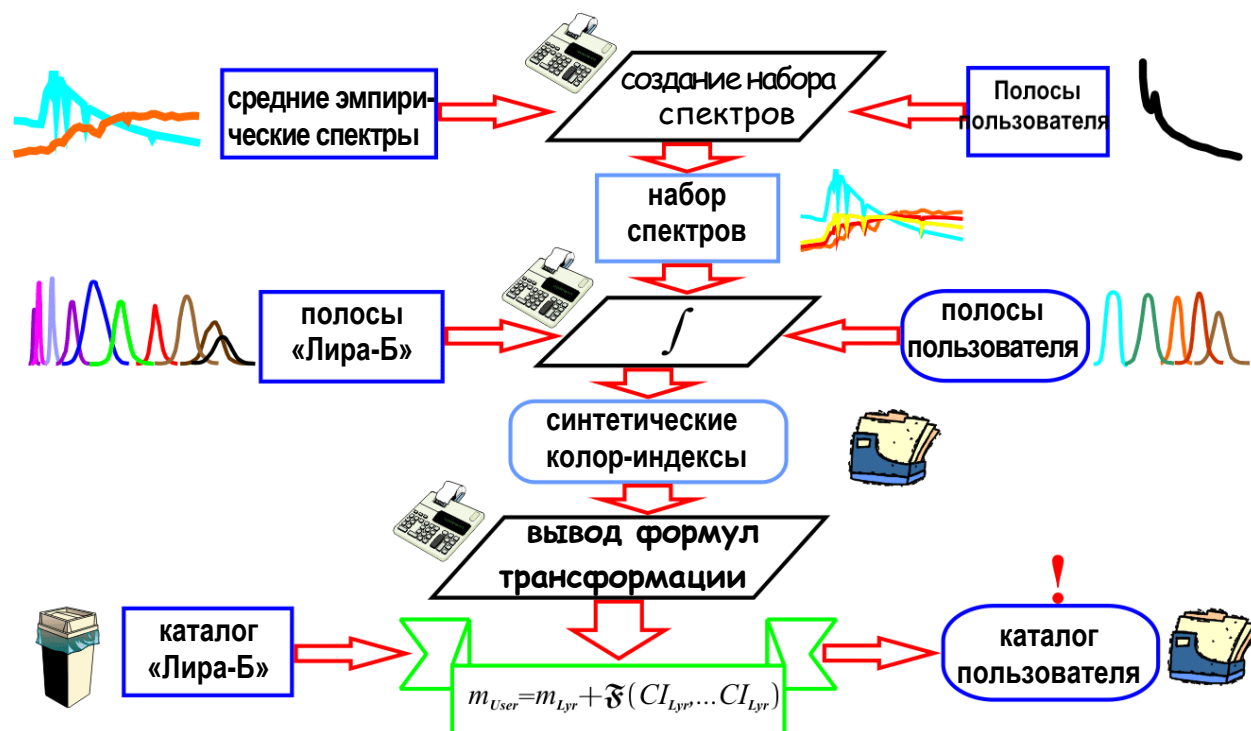


Рис.4. Последовательность действий для построения собственного каталога стандартов.

- Нужно иметь набор распределений энергий в спектре (РЭС) для звезд, подобных тем, которые содержатся в каталоге звезд-стандартов.
- Нужно задать (принять) закон межзвездного покраснения.
- Нужно хорошо знать кривые реакции каталога «Лиры» и кривые реакции собственного оборудования наблюдателя.

При этом становится возможным вычислить набор РЭС для различных значений межзвездного покраснения. Затем следует вычислить синтетические показатели цвета в системе «Лиры-Б» и в системе пользователя, и, наконец, нужно вывести уравнение трансформации звездных величин из системы «Лиры-Б» в собственную систему, используемую наблюдателем.

Другим вариантом использования опорной системы могут быть измерения величин нескольких десятков или сотен стандартов с помощью аппаратуры, применяемой наблюдателем; на основе этих измерений нужно получить уравнение трансформации. Применяя это уравнение ко всем опорным

стандартам, вы получаете сотни тысяч стандартов в вашей собственной фотометрической системе, распределенных по всей небесной сфере и имеющих высокую точность.

Сделанные выше оценки числа звезд, которые будут измерены в ходе эксперимента «Ли́ра-Б», свидетельствуют о том, что даже если только один процент звезд с точной фотометрией будет удовлетворять требованиям, предъявляемым к звездам-стандартам, то и тогда в каждом квадратном градусе найдется в среднем около 40 стандартов.

Одновременные измерения звездных величин в 10 полосах сделают возможным применение корреляционного способа обнаружения и отсева переменных звезд (см. главу 4).

Звездные величины звезд из каталога звезд-стандартов, который будет создан в эксперименте «Ли́ра-Б», будут пригодны для того, чтобы осуществлять их точную трансформацию в другие фотометрические системы, в особенности в широкополосные. Это обеспечивается тем, что

- полосы фотометрической системы «Ли́ра-Б» покрывают рабочий спектральный диапазон без промежутков;
- существует достаточно полос, чтобы принимать во внимание большое разнообразие спектров звезд и вариаций межзвездной экстинкции;
- звезды могут быть проверены на пригодность быть стандартами; это означает, что величины звезд-стандартов в различных полосах системы "Ли́ра" должны быть взаимно «трансформабельны», т. е. должны существовать функции (как правило, это полиномы порядка не выше третьего), представляющие с необходимой точностью любой показатель цвета через остальные показатели цвета.

Величины отобранных кандидатов в стандарты будут увязаны в единую систему путем решения большой системы линейных уравнений методом наименьших квадратов.

Выводы по главе 6

Нами предложены положения полос фотометрической системы «Лира-Б» в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях. С помощью специалистов ФИАН им. П.Н.Лебедева найден способ нанесения интерференционных покрытий на матрицы ПЗС с обратной засветкой. Проведен предварительный расчет этих покрытий, который показал возможность создания светофильтров с высоким пропусканием в рабочих областях и очень малым пропусканием вне этих областей.

Показано, что предложенное расположение полос фотометрической системы «Лира-Б» позволяет эффективно определять межзвездное поглощение и для звезд многих спектральных типов проводить классификацию по спектральным классам и классам светимости. В ряде случаев фотометрическая система «Лира-Б» позволяет оценивать обилие металлов в звездных атмосферах.

Выведены ожидаемые предельные величины для всех полос фотометрической системы для случая измерений с отношениями «сигнал/шум» 10 и 100. 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.

Предложен способ создания системы стандартов для произвольного фотоприемника на основе планируемого каталога опорных фотометрических стандартов в системе «Лира-Б», который не потребует дополнительных наблюдений.

Заключение

О фундаментальной фотометрической системе

Во введении мы уже отмечали, что успех эксперимента Hipparcos, и осуществляемый проект Gaia побуждают астрономов к тому, чтобы была достигнута еще более высокая точность фотометрических и спектrophотометрических измерений. Очевидно, что дальнейший прогресс астрономической фотометрии будет связан с переходом на уровни точности, характеризующиеся десятитысячными долями звездной величины.

Чтобы достичь высокой точности, нужны не только технически совершенные приборы. Для выявления и исключения систематических ошибок требуются мероприятия по совершенствованию методики фотометрических измерений. Задача современной звездной фотометрии состоит в том, что она должна превратиться из раздела практической астрофизики в часть астрономической метрологии, как это имеет место в астрометрии.

В число методических усовершенствований, безусловно, будут входить усовершенствование системы стандартов и процедур трансформации величин между фотометрическими системами.

Астрофотометрия имеет дело со сравнением световых потоков от двух источников в инструментальной фотометрической системе, определенной кривыми реакции инструмента совместно с функцией пропускания земной атмосферы. Эта фотометрическая система изменяется во времени и не может быть стабильной. Таким образом, полученные результаты фотометрических измерений должны быть переведены в уни-

фицированную систему, определенную конкретными кривыми реакции и установленным нуль-пунктом.

При наземных наблюдениях, проводимых через земную атмосферу, инструментальная фотометрическая система будет разной для разных объектов, и будет изменяться *быстро*, в соответствии с изменениями прозрачности атмосферы. При внеатмосферных измерениях фотометрическая система одинакова для всех объектов и меняется *медленно* из-за изменений свойств приемной аппаратуры. При переводе измеренной податмосферной инструментальной величины в стандартную внеатмосферную стандарты должны быть надежными индикаторами параметров земной атмосферы и аппаратуры. Очевидно, что стандарты для физической классификации звезд, для определения атмосферной экстинкции и для определения параметров аппаратуры, скорее всего, будут разными звездами.

Назовем *самосогласованной* астрофотометрией процесс получения каталога звездных величин, в процессе создания которого много пар звезд были сравнены фотометрически, получены разности их величин, все изменения были трансформированы в унифицированную систему и соотнесены друг к другу (увязаны!) в смысле решения методом наименьших квадратов уравнений вида

$$m_i - m_j = \Delta m_{ij},$$

где i и j – номера звезд, m_i и m_j – искомые величины звезд, Δm_{ij} – измеренные разности величин, полученные в одинаковых условиях (см. главу 1, раздел 1.4). Каталог, полученный таким способом, можно назвать *самосогласованным фотометрическим каталогом*. Известно, что такая система уравнений вырождена. Чтобы ее решить, должно быть добавлено еще одно уравнение, которое определяет произ-

вольный нуль-пункт. При проведении самосогласованной фотометрии не требуются предварительные величины звезд.

Каждый каталог самосогласованных величин звезд определяет независимую фотометрическую систему. В процессе работы над самосогласованным каталогом одновременно создается система его стандартов.

В противоположность этому следует называть *зависимой фотометрией* процесс определения разностей звездных величин (в инструментальной системе) между программной звездой и звездой из самосогласованного каталога. Разности величин, определенные в инструментальной системе, впоследствии должны быть переведены в фотометрическую систему самосогласованного каталога.

Несомненно, что в ближайшие десятилетия будут проведены новые обширные наземные и космические обзоры с разными целями. Эти обзоры будут выполнены в разных фотометрических системах и, безусловно, возникнет потребность сравнивать эти данные друг с другом. Без этого нельзя оценить ни случайные, ни систематические ошибки. Поэтому, возникает задача создать такую систему стандартов по всему небу, которая могла бы обслуживать любую (или почти любую) фотометрическую систему, была бы пригодна для любой фотометрической полосы. Основной задачей стандартизации фотометрических измерений становится задача создания каталога таких звезд, величины которых можно было бы легко перевести в любую наперед заданную фотометрическую систему практически без потери точности.

Если существуют несколько самосогласованных каталогов, полученных на основе наблюдений, выполненных на разных обсерваториях, то их комплексная переработка (приведение к унифицированным кривым реакции и единообразному нуль-пункту) даст в результате каталог, который можно назвать *фундаментальным фотометрическим каталогом*.

Обобщая рассуждения об опорной системе фотометрических стандартов, проведенные в шестой главе, можно сказать, что именно звезды фундаментального каталога должны формировать систему опорных фотометрических стандартов. Объединение каталогов является очень сложной и изощренной работой, по причине того, что необходимо найти и, по мере возможности, исключить систематические ошибки во всех каталогах.

Система опорных фотометрических стандартов понимается как набор моделей, соглашений и предписаний, которые нужно использовать, чтобы получить для любого момента времени фотометрические свойства приемной аппаратуры, параметры пропускания земной атмосферы и величины программных звезд в требуемых фотометрических полосах.

В настоящее время фундаментальных фотометрических каталогов не существует.

Очевидно, что для построения фундаментального фотометрического каталога нужна большая работа многих астрономических обсерваторий. Эта работа может быть выполнена в несколько этапов. На первом этапе нужно будет выработать и утвердить предварительные модели и методы; при этом может быть принят во внимание опыт создания Тянь-Шаньского каталога ярких звезд и подготовки к проведению обзора «Лира-Б».

Следует особо подчеркнуть, что фундаментальный каталог должен содержать, среди других, такие полосы многоцветной фотометрической системы, которые пригодны не только для классификации звезд, но также для восстановления параметров аппаратуры и атмосферы,

В тот же самый период следует провести сравнение величин звезд, являющихся общими в различных высокоточных каталогах. На основе этих сравнений следует отобрать звезды для фундаментального катало-

га. Пример такого сравнения был представлен в главе 3. Для сравнения и анализа необходимы не только опубликованные *средние* величины измерений, но также и индивидуальные оценки. Иначе невозможно оценить уровень переменности звезд. Соответствующие базы данных и методик должны быть открыты для этого исследования,

На начальных этапах работы над списком опорных стандартов можно отобрать не слишком много звезд, например 100000. Наш список из 6484 звезд-кандидатов в стандарты может служить первым шагом к созданию фундаментального каталога. После сравнения с другими данными эти звезды могут составить основу опорной системы стандартов в ярких звездах северного неба.

Отбор кандидатов в опорные стандарты среди более слабых звезд является более сложной задачей потому, что мы не имеем ни одного обзора звезд 9-14 величин, обладающего необходимой точностью. Есть надежда, что результаты миссий Gaia и «Лира» положат начало созданию фундаментального фотометрического каталога.

При сравнении звездных величин из разных каталогов, содержащих миллионы слабых звезд, помимо всего прочего возникают проблемы кросс-идентификации объектов из этих каталогов. Эта задача находится в процессе решения. В настоящее время при отождествлении слабых звезд в таких каталогах, как USNO-B1, 2MASS, SDSS или GALEX исследователи нередко сталкиваются с неверными отождествлениями. Нами [Карпов, Малков, Миронов, 2012] было показано, что минимальный радиус отождествления, на котором звезды в двух каталогах могут считаться одним и тем же или разными объектами, сильно зависит от точности координат, от различия между их спектральными классами и от разности центральных длин волн фотометрических полос двух каталогов.

Основные выводы диссертации.

Многоцветные фотометрические системы являются мощным средством исследования физики звезд и звездных систем. Методы современной астрофотометрии позволяют проводить измерения с точностью порядка одной тысячной звездной величины. Но для этого фотометрическая система должна быть построена с соблюдением ряда важных принципов. В диссертации разработаны принципы создания широкополосных фотометрических систем, позволяющих, в сочетании с высококлассной фотометрической аппаратурой и местами наблюдений с хорошим астроклиматом, достигать высочайшей точности измерений. На основе разработанных принципов была создана фотометрическая система *WBVR*, построенная с учетом метрологических требований. В этой системе был выполнен высокоточный каталог *WBVR*-величин ярких звезд северного неба.

В современное понятие фотометрической системы входят не только определения нуль-пункта величин и кривых реакции фотометрических полос, но и методы проведения и обработки наблюдений.

Одним из важнейших условий для обработки наземных фотометрических наблюдений является разработка надежных процедур учета атмосферной экстинкции. В диссертации разработан метод построения модели атмосферной экстинкции; метод применен при обработке фотометрических наблюдений в системе *WBVR*.

Опыт, приобретенный при фотометрических наблюдениях в системе *WBVR*, позволил решить задачу определения показателей цвета Солнца путем прямого сравнения со звездами. Сравнение фотометрических характеристик Солнца со звездами Гиад позволило уточнить место Солнца среди окрестных звезд спектрального класса G2 V.

Надежные показатели цвета Солнца позволили провести поиск аналогов Солнца по фотометрическим данным и помогли создать список вероятных объектов для программы SETI.

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 индивидуального 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 высокоточных фотометрических каталогов, зависящие от небесных координат объектов.

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

Исследование корреляционных связей между квазиодновременными измерениями блеска звезд в разных каналах многоцветного фотометра дало возможность открывать переменные звезды, даже если амплитуда переменности не превосходит уровня шумов, и оценивать статистическую достоверность этого открытия.

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 фотометрического обзора неба с борта Международной космической станции. К числу этих принципов относятся решения о сканирующем режиме обзора, о параметрах космического телескопа, о применении матриц ПЗС с обратной засветкой, работающих в режиме ВЗН, о порядке покрытия небесной сферы наблюдениями, о системе стабилизации изображения (гидировании), о количестве фотометрических полос, о выборе размеров матриц ПЗС и размеров пикселя, о порядке обнаружения и регистрации объектов, о режиме наблюдений ярчайших звезд, о наземных и полетных калибровках приемников излучения, об объеме получаемой информации и методах ее передачи в герметический отсек и на Землю.

В результате был сделан вывод о реализуемости проекта.

Данные, которые предполагается получить в результате проведения космического 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.

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

Предложено расположение десяти полос фотометрической системы «Лира-Б» в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях. С помощью специалистов ФИАН им. Лебедева найден способ

нанесения интерференционных покрытий на матрицы ПЗС с обратной засветкой. Проведен предварительный расчет этих покрытий, который показал возможность создания светофильтров с высоким пропусканием в рабочих областях и очень малым пропусканием вне этих областей.

Показано, что предложенное расположение полос фотометрической системы «Лира-Б» позволяет эффективно определять межзвездное поглощение, и для звезд многих спектральных типов проводить классификацию по спектральным классам и классам светимости. В ряде случаев фотометрическая система «Лира-Б» позволяет оценивать обилие металлов в звездных атмосферах.

Выведены ожидаемые предельные величины для всех полос фотометрической системы для случая измерений с отношениями «сигнал/шум» 10 и 100. 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.

Предложен способ создания системы стандартов для произвольного фотоприемника на основе планируемого каталога опорных фотометрических стандартов в системе «Лира-Б». Способ не требует дополнительных наблюдений.

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, заложенными выдаю-

щимися 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.

Приложение А (справочное)

Оценки некоторых систематических ошибок фотометрии и спектрофотометрии.

Мы уже отмечали, что многие фотометрические каталоги характеризуются погрешностью $\sigma_0 \approx 0^m,02$. Однако в идеальных лабораторных условиях, величина стандартного отклонения отсчетов, накапливаемых в течение достаточного времени экспозиции, обычно составляет всего лишь $\sigma_0 \approx 0^m,001$. К подобным условиям иногда можно приблизиться, если измерять поток от переменной звезды по отношению к близко расположенной на небе и близкой по спектральному типу звезде сравнения. В этом случае можно обнаруживать и исследовать эффекты переменности с амплитудами порядка $0^m,001-0^m,003$ [Миронов, 1998b].

В общем случае при реальных наблюдениях измеряется отношение световых потоков от звезд, расположенных в разных местах на небесной сфере и имеющих различное распределение энергии в спектре. Измерение потока от каждой звезды происходит в различные моменты времени при различных значениях функции спектрального пропускания атмосферы, искажающей спектроэнергетические функции звезд. Кроме того, при изменении температуры светофильтров и фотокатода изменяются их спектральные свойства. При понижении температуры на один градус кривые пропускания

цветных оптических стекол сдвигаются в коротковолновую сторону в среднем на 0,1 нм. Эти и другие причины и приводят к тому, что стандартное отклонение увеличивается в 10–100 раз по сравнению с идеальным случаем.

В процессе измерений и их обработки кроме случайных ошибок возникают многочисленные и значительные систематические ошибки, величину которых можно оценить методами синтетической фотометрии по формулам (Б8.1) – (Б8.3) в Приложении «Б».

Прежде всего, могут возникать ошибки, вызванные различием распределений энергии в спектрах.

Несмотря на то, что уже давно разработаны методы корректного учета атмосферной экстинкции [Зданавичус, 1970, 1975; Мошкалева и Халиуллин, 1985], до настоящего времени они применяются лишь редкими создателями фотометрических систем и каталогов, а атмосферная экстинкция учитывается с помощью постоянных коэффициентов для каждой фотометрической полосы без учета зависимостей от спектрального типа звезды, несмотря даже на то, что эти вопросы уже давно и достаточно хорошо освещены в литературе [Гребель и Робертс 1995a,b].

Один из замечательных объектов астрофизики — переменная V1357 Cyg, связанная с рентгеновским источником Cyg X-1, сверхгигант спектрального типа B0 Ib. Межзвездное поглощение для V1357 Cyg составляет около 3^m . При многочисленных электрофотометрических измерениях звездами сравнения, как правило, служат рекомендованные Лютым [1972] звезды главной последовательности a , b и c .

Предположим, что измерения проводятся в системе *UBV* в районе зенита в чистую (т.е. с малым количеством аэрозоля в атмосфере) летнюю ночь на обсерватории, расположенной невысоко над уровнем моря в средних широтах. Тогда величины выноса A_i будут равны значениям, приведенным в таблице A1. Из таблицы следует, что разность ультрафиолетовых звездных величин переменной и звезды сравнения, измеренных в зените и на зенитном расстоянии z , соответствующем воздушной массе $M(z)=2$, будет систематически различаться на $0^m,010$ при сравнении со звездой "a" и на $0^m,023$ при сравнении со звездой "c". Таким образом, мы легко можем "обнаружить" ложную переменность с амплитудой около $0^m,02$.

Таблица A1.

Величины атмосферной экстинкции в зените для переменной V1357 Cyg и ее звезд сравнения *a*, *b* и *c*.

Звезда	<i>B-V</i>	A_U	A_B	A_V
V1357 Cyg	0,82	0,764	0,441	0,296
"a"	0,59	0,754	0,438	0,297
"b"	0,36	0,752	0,439	0,298
"c"	0,01	0,741	0,459	0,300

Еще сложнее обстоит дело при измерении *непокрасненных* сверхгигантов. Так, знаменитая переменная HZ Her, связанная с рентгеновским источником Her X-1, в максимуме блеска показывает спектр типа B3 I. Ее измерения, как правило, ведутся по отношению к выбранным Лютым [1972] звездам сравнения *c2*, *c3* и *c4*. Величины выноса за атмосферу для этого случая приведены в таблице A2.

Таблица А2.

Величины атмосферной экстинкции в зените для сверхгиганта ВЗ и звезд сравнения переменной HZ Her a , b и c .

Звезда	$B-V$	A_U	A_B	A_V
ВЗ I	-0,10	0,780	0,464	0,300
“с2”	1,12	0,750	0,413	0,293
“с3”	0,56	0,754	0,438	0,297
“с4”	0,63	0,756	0,437	0,297

Здесь амплитуда ложной переменности между измерениями в зените и на зенитном расстоянии около 60° составляет до $0^m,03$ в ультрафиолетовой полосе и даже до $0^m,05$ в полосе B .

В аналогичной ситуации мы оказываемся при фотометрических измерениях Новых. Покажем это на примере V1500 Cyg — Новой Лебеда 1975 года, для которой спектрофотометрические данные получены Терещенко [1977]. Предположим, что мы измеряем величины Новой по отношению к звездам сравнения спектральных классов F2 V и A0 V. Результаты расчетов представлены в таблице А3.

Таблица А3.

Величины атмосферной экстинкции в зените для Новой Лебеда (V1500 Cyg) и звезд сравнения спектральных классов F2 V и A0 V.

Звезда	$B-V$	A_U	A_B	A_V
Nova	—	0,785	0,439	0,296
“F2”	1,12	0,752	0,439	0,298
“A0”	0,56	0,741	0,459	0,300

Причиной разницы в значениях выноса является различие в положении и амплитуде различных абсорбционных и эмиссионных полос и скачков (прежде всего бальмеровского скачка) в спектрах рассматриваемых звезд и их звезд сравнения. Наличие рассмотренных ошибок, безусловно, является одной из причин того, что большее количество известных сверхгигантов ранних спектральных

классов являются объектами Нового каталога звезд, заподозренных в переменности блеска (NSV). Аналогично, сложный характер спектра звезд поздних спектральных классов приводит к ошибкам определения выноса и мешает правильно определять характер и тип их переменности.

Рассмотрим теперь пример аппаратурной ошибки, возникающей из-за сдвига кривой реакции.

Кривые реакции мгновенной инструментальной системы, в которой произведено конкретное измерение, по разным причинам (в частности из-за изменений температуры) отличаются от стандартных кривых реакции. Оценка величины ошибки, сделанная по формуле (Б8.3) дает следующие результаты. В широкополосных системах *UBV* и *WBVR* ошибка для ультрафиолетовой и синей полосы при сдвиге полос, как целого, на $\pm 5 \text{ \AA}$ в для звезд разных спектральных классов достигает $\pm 0^{\text{m}},02\text{--}0^{\text{m}},03$. При сдвиге на $\pm 25 \text{ \AA}$ эти ошибки увеличиваются до $\pm 0^{\text{m}},06\text{--}0^{\text{m}},07$. В среднеполосных фотометрических системах, таких как 13-цветная Аризонская система Джонсона-Митчелла, Вильнюсская система или система *uvby* Стремгрена, максимальные ошибки перевода происходят в полосах, захватывающих бальмеровский скачок. Для этих полос ошибки при типичном температурном сдвиге полос на $\pm 5 \text{ \AA}$ характеризуются величиной $\pm 0^{\text{m}},03\text{--}0^{\text{m}},04$, а для звезд спектрального класса М увеличиваются до $\pm 0^{\text{m}},07\text{--}0^{\text{m}},08$. При сдвиге полос на $\pm 25 \text{ \AA}$ величина ошибки может достигать огромных значений порядка $\pm 0^{\text{m}},10\text{--}0^{\text{m}},20$, а для звезд спектрального класса М даже $\pm 0^{\text{m}},30$.

Для остальных полос, не связанных с бальмеровским скачком, ошибки составляют $\pm 0^{\text{m}},01$ при сдвиге на $\pm 5 \text{ \AA}$ и $\pm 0^{\text{m}},02$ – $0^{\text{m}},04$ при сдвиге на $\pm 25 \text{ \AA}$. Итак, неучет ошибок, вызванных различием мгновенной и принятой кривых реакции фотометрической полосы, могут вызвать обнаружение ложной переменности. К таким же результатам приводит пренебрежение процедурой перевода измеренных звездных величин в стандартную систему, что часто делают, считая, что «системы близки».

Не следует думать, что проблемы касаются только фотометрии звезд со сложными и пекулярными спектрами и измерений в ультрафиолетовых полосах. На рисунке A1 показано сравнение двух рядов оригинальных фотометрических измерений звезд Гиад в полосах *B* и *V* системы *UBV*, опубликованных Джонсоном и Нуклсом [1955] и Апгреном и Вайсом [1977]. В их работах имеется 30 общих звезд в интервале звездных величин между 7^{m} и 11^{m} . Видно, что между двумя фотометриями существует большая систематическая разница, как в звездных величинах, так и в показателях цвета. Это еще раз подчеркивает, что единообразная процедура перевода на стандартную систему в системе *UBV* не была определена. Такие результаты ни с какой точки зрения нельзя считать удовлетворительными.

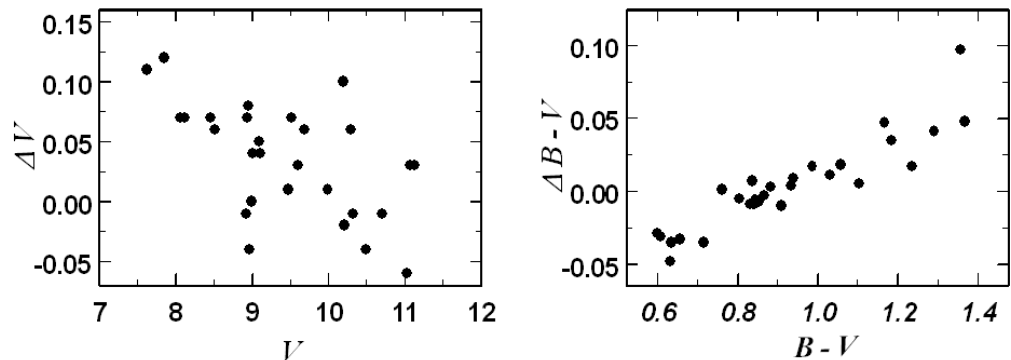


Рис. А1. Сравнение фотометрии звезд Гиад в работах Джонсона и Нуклса [1955] и Апгрена и Вайса [1977]. На левой панели по оси абсцисс — звездная величина V по данным работы Джонсона и Нуклса, по оси ординат — разность звездных величин в смысле V Джонсона и Нуклса минус V Апгрена и Вайса. На правой панели — аналогичный график для показателя цвета $B - V$.

Существуют проблемы и в спектрофотометрических исследованиях. Известно, что спектрофотометрические измерения подвержены влиянию как случайных, так и систематических ошибок в большей степени, чем широкополосная или среднесполосная фотометрия (см., например, [Миронов, Мошкалев, 1995, 1996]). Это затрудняет их использование для вывода о постоянстве или переменности блеска звезд. Данные фотометрии нередко позволяют выявлять такие систематические ошибки. Так, например, в результате сравнения фотометрических данных, полученных в системе $WBVR$ в 1977-1980 гг., и спектрофотометрии, произведенной для построения Алма-Атинского спектрофотометрического каталога, были выявлены систематические ошибки [Козырева и др., 1981]. Учет этих ошибок позволил астрономам АФИ имени В.Г.Фесенкова в Алма-Ате улучшить качество их каталога [Глушкова и др, 1984; Глушкова и Терещенко, 1987; Терещенко 1988].

Наличие случайных и систематических ошибок приводит к тому, что величины и показатели цвета, вычисленные методами синтетической фотометрии, как правило, отличаются от прямых фотометрических измерений. Еще в 1956 году Шаров [1956] одним из первых указывал на расхождения в пределах $0^m,15 - 0^m,30$ между наблюдениями и расчетами, выполненными для звезд ранних спектральных классов, что мешало использовать имеющийся материал для исследования закона межзвездного поглощения света. Несмотря на значительное увеличение количества и точности спектрофотометрических и фотометрических измерений звезд, указанная проблема полностью не решена: до сих пор различия между синтетическими и наблюдаемыми величинами могут достигать $0^m,1 - 0^m,2$. Это существенно больше опубликованных оценок точности фотометрических и спектрофотометрических каталогов.

Мы произвели сравнение [Миронов, Мошкалев, 1995, 1996] данных каталога 238 вторичных спектрофотометрических стандартов [Глушнева и др., 1992] с величинами из нашего Тянь-Шаньского фотометрического каталога [Корнилов, Волков, Захаров и др., 1991, Корнилов, Миронов, Захаров, 1996]. Синтетические величины B_{calc} и V_{calc} вычислялись по первой основной формуле гетерохромной фотометрии (Б8.1). В качестве опорного стандарта принималась Вега, для которой распределение энергии бралось согласно Хейесу [1985], и использовались величины B_{obs} и V_{obs} из Тянь-Шаньского каталога. Для 232 общих звезд были составлены разности $\Delta B_{O-C} = B_{\text{obs}} - B_{\text{calc}}$ и $\Delta V_{O-C} = V_{\text{obs}} - V_{\text{calc}}$. Среднеквадратичные отклонения этих разностей оказались равными $\sigma(\Delta B) = 0^m.039$ и

$\sigma(\Delta V) = 0^m.040$. Для тех же самых звезд сравнение Тянь-Шаньского каталога с Каталогом BS [Хоффлейт и Уоррен, 1991] показало существенно меньшие среднеквадратичные отклонения разностей $B_{obs} - B_{BS}$ и $V_{obs} - V_{BS}$, которые равны, соответственно, $0^m.023$ и $0^m.018$.

Сопоставление разностей ΔB_{O-C} и ΔV_{O-C} со звездными величинами V и показателями цвета $B - V$ показали отсутствие заметных зависимостей. Однако обнаружилась зависимость как для ΔB_{O-C} , так и для ΔV_{O-C} от прямого восхождения. Для полосы V этот эффект показан на рисунке A2.

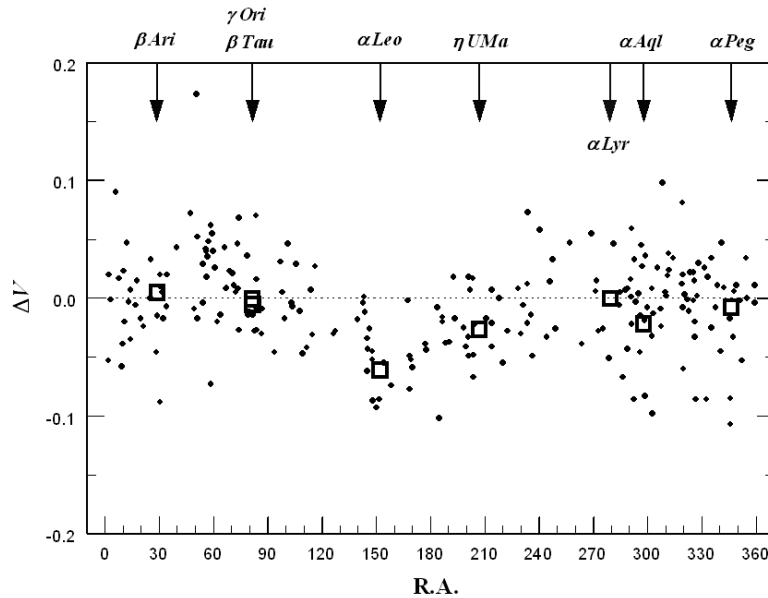


Рис. A2. Систематические разности наблюдаемых и синтетических (вычисленных) величин спектрофотометрических стандартов. Обозначения см. в тексте.

Точками показаны разности ΔV_{O-C} . Отчетливо видно, что в интервале от 105° до 240° ($7^h < \text{R.A.} < 16^h$) почти отсутствуют разности положительного знака. На том же рисунке квадратами пока-

заны те же разности для восьми звезд — основных спектрофотометрических стандартов [Харитонов и др., 1978, 1988, 2011]. Напомним, что в силу определения, разность ΔV_{O-C} для Веги тождественно равна нулю. Из рисунка видно, что положение основных стандартов на графике повторяет ход точек из каталога 238 вторичных стандартов. Следовательно, вероятной причиной систематического отклонения разностей ΔV_{O-C} (так же как и ΔB_{O-C}) от нулевой линии является наличие ошибок в распределениях энергии основных стандартов, к которым привязывались программные звезды, близкие к ним по положению на небесной сфере.

В статьях [Миронов, Мошкалев, 1995, 1996] была сделана попытка на основе сравнения синтетических и наблюдаемых величин получить поправки к распределениям энергии в спектре основных и вторичных стандартов, а также программных звезд из Алма-Атинского каталога. Однако с сегодняшних позиций полученный результат представляется авторам недостаточно убедительным. В любом случае, для улучшения наших знаний о распределениях энергии в спектре звезд нужны новые наблюдения, как фотометрические, так и спектрофотометрические.

Приложение Б (справочное)

О некоторых терминах и формулах

Несмотря на то, что астрофотометрия в XX веке прошла большой путь развития, до сих пор нет единообразия в использовании терминов, характеризующих фотометрические системы. Например, в монографии Страйжиса [1977, стр. 67] сообщается, что фотометрической системой называется *набор участков спектра* (курсив мой, А.Миронов), описываемых определенными кривыми, в которых проводится измерение интенсивности излучения небесного объекта. В то же время Д.Я. Мартынов [1977] в «Курсе практической астрофизики» систематически употребляет термины «система V » или «система U », имея в виду не набор, а единственную фотометрическую полосу. Нет единства в употреблении названий «кривая реакции», «полоса реакции», «фотометрическая полоса», «спектральная полоса», «величина» (в контексте «система величин V »), «фильтр» (в контексте «величины в фильтре V ») и проч.

В данном приложении мы уточним значение терминов, которые используются в настоящей диссертации. Этих терминов и обозначений придерживается автор в учебном пособии «Прецизионная фотометрия» [Миронов, 1997] и в научно-учебной монографии «Основы астрофотометрии» [Миронов, 2008].

Б1. *Распределение энергии в спектре звезды.* Зависимость одной из энергетических величин, характеризующих электромагнитное излучение в оптическом диапазоне, от длины волны. Энергетическими величинами могут быть поток, сила света, освещенность и пр. В физике и технике говорят о *спектральной плотности* энергетического потока, силы света, освещенности и т.п. Для большинства задач фотометрии важны не абсолютные величины спектральной плотности соответствующей величины, а их относительные значения, нормированные на значение спектральной плотности в какой-либо длине волны, чаще всего в длинах волн 5500 или 5556 Å. При этом нормированные значения разных световых величин становятся одинаковыми и такую функцию мы будем называть *распределением энергии в спектре (относительным)*. Различают собственное распределение энергии в спектре звезды $E^0(\lambda)$ и распределение энергии в спектре звезды на верхней границе земной атмосферы $E(\lambda)$. Во втором случае собственное распределение энергии искажено функцией межзвездного поглощения света (межзвездного покраснения) $a(\lambda)$.

Б2. *Спектральная чувствительность приемника излучения.* В качестве примеров различных приемников излучения можно привести человеческий глаз, фотографическую эмульсию, фотокатод фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) или ЭОП'а, поверхность прибора с зарядовой связью (ПЗС) и т.п. Все эти приемники являются селективными. Спектральной чувствительностью приемника или *кривой спектральной чувствительности* мы называем зависимость отклика приемника (почернения фотоэмульсии, фототока

ФЭУ и пр.) от длины волны падающего излучения. В этом же смысле можно употреблять термин *кривая реакции приемника*.

Б3. *Инструментальные кривые реакции прибора*. Этим термином мы называем зависимость отклика прибора от длины волны падающего излучения. Прибором будем считать совокупность всех оптических и фотоэлектронных элементов системы, воспринимающей излучение. Таким образом, в инструментальную кривую реакции прибора $R(\lambda)$ входят функция спектрального пропускания телескопа, функция спектрального пропускания фотометра, включая его светофильтры, спектральная чувствительность приемника излучения и т.д. Поскольку большинство фотометров могут работать с несколькими светофильтрами, то говорят о наборе инструментальных кривых реакции. Для каждой кривой из набора обычно употребляется выражение *инструментальная кривая реакции фотометрической полосы*. Инструментальные кривые реакции не остаются постоянными во времени. Они изменяются от температуры и из-за эффектов старения светочувствительных элементов.

Б4. *Кривая реакции фотометрической системы* — основное понятие, характеризующее фотометрическую систему. В эту функцию, которую мы обычно обозначаем через $T(\lambda)$, входят инструментальная кривая реакции и кривая спектрального пропускания земной атмосферы. Из-за переменности этих функций во времени мы всегда проводим измерения с разными кривыми реакции фотометрической системы. В результате наблюдений мы получаем звездные величины в *мгновенной инструментальной фотометрической системе*. Перевод результатов таких измерений в единую или в *стан-*

дартную фотометрическую систему является сложной проблемой высокоточной фотометрии.

Б5. *Стандартная фотометрическая система.* Результаты любых астрофотометрических наблюдений представляются в той или иной фотометрической системе. В настоящее время обычно наблюдения ведутся в многоцветных фотометрических системах, в состав которых входит несколько фотометрических полос, однако можно говорить и об одноцветной фотометрической системе.

Определить стандартную фотометрическую систему — это значит:

- задать количество фотометрических полос системы; в зависимости от этого различают одноцветные, двухцветные, трёхцветные и вообще N -цветные системы;
- определить неизменные во времени кривые реакции прибора для каждой полосы; это могут быть кривые реакции конкретного прибора в определённых условиях, либо аксиоматически заданные функции длины волны;
- в каждой полосе задать нуль-пункт, т.е. приписать некоторому источнику излучения конкретную звездную величину в данной полосе;
- описать во всех подробностях методы и алгоритмы перехода от величин в меняющейся во времени податмосферной инструментальной фотометрической системе, в которой производятся измерения, в стандартную систему.

До тех пор, пока в астрономии существовал единственный приёмник излучения: человеческий глаз, актуален был лишь третий

пункт из вышеприведённого определения, и существовала единственная визуальная фотометрическая система. Вопрос о других системах остро встал только после появления фотографии.

Итак, современная фотометрическая система — это не только набор фотометрических полос в совокупности с нуль-пунктами величин и показателей цвета. В определение современной фотометрической систем обязательно должны входить описания стандартных методов редукций на стандартную систему.

Заметим, что должен быть определен и алгоритм обратного преобразования. Поскольку почти всегда мы имеем дело с измерением отношения потоков излучения (разности звездных величин) измеряемой звезды и стандарта, нужно уметь перевести величину стандарта, которая берется из того или иного каталога, где, разумеется, даны величины в стандартной системе, в мгновенную инструментальную систему.

В монографии Страйжиса [1977, стр. 67] рекомендуется говорить, что фотометрическая система с двумя спектральными полосами — это *двухцветная* система, с тремя — *трехцветная* и т.п. В связи с этим, Страйжис называет *цветом* или *лучами* (например, цвет R , визуальные лучи V), основную цветовую окраску той или иной кривой реакции, и возражает против применения термина *цвет* в смысле *показателя цвета*. Он подчёркивает, что если цветом называть показатель цвета, то система $UBVRI$ с пятью спектральными полосами, из которых можно образовать десять различных показателей цвета, должна была бы называться десятицветной, что явно неудобно. Соглашаясь с терминологией Страйжиса, отме-

тим, что некоторые термины, в которые входит слово *цвет* в смысле показателя цвета, прочно вошли в употребление. К их числу относится, прежде всего, термин *линия нормальных цветóв*, т.е. геометрическое место на двухцветной диаграмме, соответствующее непокрашенным звездам разных спектральных классов заданного класса светимости.

Б6. *Фотометрическая полоса*. Под этим термином мы понимаем приближенную характеристику кривой реакции прибора. В определение фотометрической полосы входят только средняя длина волны и полуширина кривой реакции. Конкретной формой кривой реакции мы при этом пренебрегаем. Синонимами этого термина являются *спектральная полоса* и *полоса реакции*.

Б7. *Спектральное пропускание земной атмосферы*. Обычно обозначается как $p(\lambda)$. Функция прозрачности атмосферы в различных длинах волн. Её определяют молекулярное (релеевское) рассеяние, рассеяние на частицах атмосферного аэрозоля, и истинное поглощение молекулами воздуха, важнейшими из которых являются молекулы кислорода, озона и водяного пара. Заметим, что

$$T(\lambda) = R(\lambda)[p(\lambda)]^{M(z)}, \quad (\text{Б7.1})$$

где $M(z)$ — воздушная (атмосферная) масса.

Б8. *Основные формулы гетерохромной фотометрии*.

Приведем три основные формулы, играющие главную роль при обработке фотометрических наблюдений и применении методов синтетической фотометрии.

I. Разность гетерохромных звездных величин двух звезд:

$$m_1 - m_2 = -2,5 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_1(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_2(\lambda) T(\lambda) d\lambda} \approx -1,086 \ln \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_1(\lambda) T(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_2(\lambda) T(\lambda) d\lambda}; \quad (\text{Б8.1})$$

II. Гетерохромный показатель цвета:

$$C.I. = m_I - m_{II} = -2,5 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) T_I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) T_{II}(\lambda) d\lambda} + \text{const}; \quad (\text{Б8.2})$$

константа в этой формуле определяется путем приписывания некоторого значения показателя цвета (обычно нулевого) звездам с конкретным распределением энергии $E(\lambda)$ (обычно для звезд спектрального класса A0 V). Эта же формула служит для перевода звездных величин из одной фотометрической системы в другую, если известны распределение энергии и кривые реакции.

III. Поправка за атмосферную экстинкцию (вынос):

$$A_i = -2,5 \lg \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R_i(\lambda) p[\lambda, M(z)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) R_i(\lambda) d\lambda}. \quad (\text{Б8.3})$$

Приложение «В» (справочное)

Уравнения трансформации величин между некоторыми фотометрическими системами

Таблица В1. Уравнения перехода от величины V и показателей цвета в стандартном варианте системы $WBVR$ к величинам и показателям цвета в варианте каталога.

$$V_{\text{cat}} = V_{\text{std}} - 0,0068 \pm 0,0009 \quad (\text{B1})$$

$$(W - B)_{\text{cat}} = 0,0620 + 0,9611 \cdot (B - V)_{\text{std}} \pm 0,0024 \pm 0,0061 \quad \sigma_0 = 0,0115 \quad (\text{B2})$$

$$(B - V)_{\text{cat}} = -0,0083 + 1,0452 \cdot (B - V)_{\text{std}} \pm 0,0014 \pm 0,0035 \quad \sigma_0 = 0,0066 \quad (\text{B3})$$

$$(V - R)_{\text{cat}} = -0,0334 + 0,9983 \cdot (B - V)_{\text{std}} \pm 0,0012 \pm 0,0031 \quad \sigma_0 = 0,0058 \quad (\text{B4})$$

$$(V - R)_{\text{cat}} = -0,0333 + 0,9956 \cdot (V - R)_{\text{std}} \pm 0,0013 \pm 0,0036 \quad \sigma_0 = 0,0058 \quad (\text{B5})$$

Рис. В1. Графически показаны связи между величинами стандартов, употреблявшимися до 1985 года и величинами стандартов, на основе которых создавался Тянь-Шаньский каталог, и которые описываются вышеприведенными уравнениями (В1)–(В4).

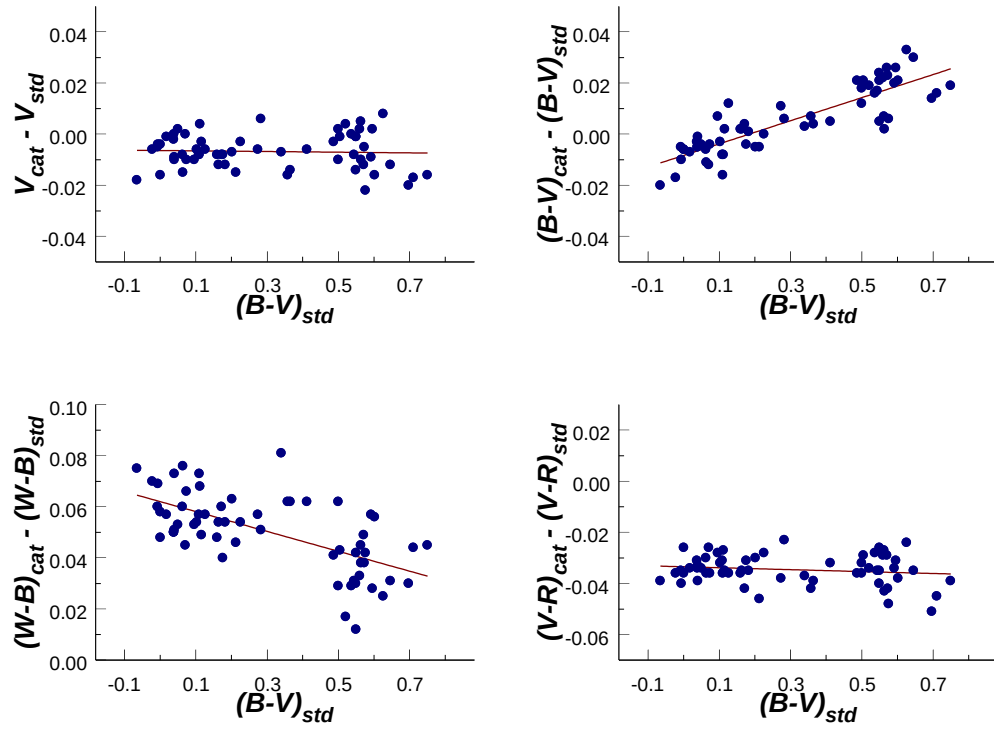


Таблица В2. Коэффициенты уравнений перехода от величин $WBVR$ в варианте каталога к величинам H_p , B_T и V_T каталогов Hipparcos и Tycho (без учета зависимости от координат).

аргумент	$H_p - V$	$V_T - V$	$B_T - B$
1	+0,005448	+0,020926	+0,062439
$(W - B)$	+0,005437	0	+0,054384
$(B - V)$	+0,371105	+0,205544	+0,235592
$(V - R)$	-0,101329	-0,073765	-0,140351
$(W - B)^2$	0	0	+0,038093
$(B - V)^2$	-0,200390	-0,264414	-1,316713
$(V - R)^2$	0	+0,231995	-2,112421
$(W - B)(B - V)$	+0,063512	+0,208320	+0,280815
$(W - B)(V - R)$	-0,060118	-0,188732	-0,519858
$(B - V)(V - R)$	0	0	+3,614515
$(W - B)^3$	0	-0,005484	+0,043945
$(B - V)^3$	+0,517748	+0,301536	0
$(V - R)^3$	-0,293915	-0,053582	+0,584583
$(W - B)^2(B - V)$	+0,067174	+0,168873	-0,174016
$(W - B)^2(V - R)$	-0,063581	-0,159322	0
$(W - B)(B - V)^2$	-0,364450	-0,436563	+0,286444
$(B - V)^2(V - R)$	-1,194061	-0,224944	0
$(W - B)(V - R)^2$	-0,241121	0	+0,370769
$(B - V)(V - R)^2$	+0,997802	0	-0,745328
$(W - B)(B - V)(V - R)$	+0,592085	0,411518	-0,330505
V		-0,007134	+0,017596
V^2		0,000410	+0,001247

Таблица В3. Коэффициенты уравнений перехода от величин H_p , B_T и V_T каталогов Hipparcos и Tycho к величинам $WBVR$ в варианте каталога.

аргумент	$H_p - V$	$V_T - V$	$B_T - B$
1	+0,010403	+0,023496	+0,051852
$(BT - VT)$	+0,299005	+0,286221	+0,287394
$(VT - H_p)$	0	+0,841689	
$(BT - H_p)$	0	0	
$(BT - VT)^2$	-0,412981	-0,187653	-0,359420
$(VT - H_p)^2$	0	-1,569156	
$(BT - H_p)^2$	0	0	
$(BT - VT)(VT - H_p)$	-1,009547	0	
$(BT - VT)(BT - H_p)$	0	0	
$(VT - H_p)(BT - H_p)$	0	0	
$(BT - VT)^3$	+0,554870	+0,039506	+0,488924
$(BT - VT)^2(VT - H_p)$	+1,413491	+1,215551	+4,831243
$(BT - VT)(VT - H_p)^2$	-14,94107	-11,44283	-10,24807
$(VT - H_p)^3$	-21,82318	-30,66389	
$(BT - VT)^4$	-0,414598	0	-0,169062
$(BT - VT)^3(VT - H_p)$	-0,669927	-2,193794	-7,917402
$(BT - VT)^2(VT - H_p)^2$	+16,49249	+20,15367	+46,18878
$(BT - VT)(VT - H_p)^3$	0	0	-161,1264
$(VT - H_p)^4$	+47,47520	+20,89152	
$(BT - VT)^5$	+0,111746	0	
$(BT - VT)^3(VT - H_p)^2$	-3,994680	-8,625810	-30,11792
$(BT - VT)^2(VT - H_p)^3$	0	+12,32494	+165,9879
$(BT - VT)^4(VT - H_p)$	0	+0,877436	+3,220377
$(BT - VT)(VT - H_p)^4$	0	0	-383,2101
$(VT - H_p)^5$	0	0	+816,6509
H_p	-0,001023	-0,005731	-0,015193
H_p^2	0	+0,000373	+0,000942

Таблица В4. Значимые коэффициенты формулы, аппроксимирующей разность $H_p - V$ величинами W , B , V , R , α , и δ .

коэффициенты при членах с показателями цвета		коэффициенты при членах с координатами	
аргументы	значения коэффициен- тов	аргументы	значения коэффициен- тов
1	+0,117237	$\sin \delta$	-0,007730
$(W-B)$	+0,016888	$\cos \alpha$	+0,002407
$(B-V)$	+0,172691	$\sin 2 \delta$	+0,014236
$(V-R)$	-0,174744	$\sin 2 \alpha$	+0,001772
$(W-B)^2$	+0,065709	$\sin \delta \sin \alpha$	+0,003930
$(W-B)(B-V)$	-0,345682	$\sin \delta \cos \alpha$	-0,003742
$(W-B)(V-R)$	+0,274816	$\cos \delta \sin \alpha$	+0,001548
$(B-V)^2$	+0,276535	$\sin 3 \delta$	-0,006447
$(B-V)(V-R)$	-0,434231	$\cos 3 \alpha$	+0,005040
$(W-B)^2(V-R)$	+0,075773	$\sin 2 \delta \sin \alpha$	-0,002958
$(W-B)(B-V)(V-R)$	-0,540892	$\cos 2 \delta \cos \alpha$	-0,001691
$(W-B)(V-R)^2$	+0,444874	$\sin 2 \alpha \sin \delta$	-0,002649
$(B-V)^2(V-R)$	+0,511667	$\cos 2 \alpha \sin \delta$	+0,001708
$(B-V)(V-R)^2$	-0,460676		

Приложение Г (справочное)

Таблицы

Таблица Г1-а. Нормированные спектральные кривые реакции системы WBVR.

Стандартный Тянь-Шаньский вариант (1976-1984 гг.).

длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик
<i>W</i>		<i>B</i>		<i>V</i>		<i>R</i>	
305	0,000	370	0,000	460	0,000	590	0,000
310	0,059	380	0,096	470	0,001	600	0,002
315	0,184	390	0,361	480	0,003	610	0,007
320	0,377	400	0,651	490	0,011	620	0,021
325	0,633	410	0,862	500	0,238	630	0,293
330	0,790	420	0,949	510	0,746	640	0,513
335	0,890	430	0,991	520	0,963	650	0,863
340	0,959	440	1,000	530	1,000	660	1,000
345	0,980	450	0,985	540	0,957	670	0,967
350	1,000	460	0,934	550	0,873	680	0,894
355	0,990	470	0,814	560	0,765	690	0,844
360	0,959	480	0,616	570	0,670	700	0,793
365	0,884	490	0,395	580	0,574	710	0,703
370	0,720	500	0,248	590	0,447	720	0,612
375	0,504	510	0,109	600	0,319	720	0,612
380	0,269	520	0,048	610	0,231	730	0,578
385	0,080	530	0,016	620	0,142	740	0,545
390	0,012	540	0,006	630	0,097	750	0,478
395	0,002	550	0,002	640	0,053	760	0,413
400	0,000	560	0,000	650	0,033	700	0,335
				660	0,017	780	0,295
				670	0,013	790	0,242
				680	0,010	800	0,190
				690	0,007	810	0,156
				700	0,004	820	0,123
				710	0,003	830	0,091
				720	0,001	840	0,067
				730	0,000	850	0,049
						860	0,032
						870	0,018
						880	0,012
						890	0,005
						900	0,000

Таблица Г1-в. Нормированные спектральные кривые реакции системы WBVR. Вариант каталога (АФК-2).

длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик	длина волны (нм)	отклик
W							
300	0,000	325	0,352	350	0,863	375	0,716
305	0,003	330	0,484	355	0,959	380	0,416
310	0,025	335	0,602	360	1,000	385	0,156
315	0,091	340	0,702	365	0,993	390	0,029
320	0,205	345	0,779	370	0,907	395	0,001
B							
365	0,000	410	0,876	455	0,907	500	0,154
370	0,001	415	0,924	460	0,866	505	0,106
375	0,020	420	0,966	465	0,804	510	0,065
380	0,134	425	0,992	470	0,720	515	0,038
385	0,306	430	1,000	475	0,610	520	0,020
390	0,461	435	0,990	480	0,496	525	0,009
395	0,597	440	0,976	485	0,387	530	0,003
400	0,705	445	0,955	490	0,289	535	0,001
405	0,805	450	0,934	495	0,212	540	0,000
V							
465	0,000	530	1,000	595	0,407	660	0,029
470	0,001	535	0,989	600	0,355	665	0,022
475	0,006	540	0,964	605	0,305	670	0,016
480	0,021	545	0,931	610	0,252	675	0,012
485	0,062	550	0,888	615	0,211	680	0,008
490	0,152	555	0,838	620	0,178	685	0,006
495	0,299	560	0,792	625	0,149	690	0,004
500	0,480	565	0,735	630	0,124	695	0,003
505	0,665	570	0,688	635	0,102	700	0,002
510	0,810	575	0,630	640	0,082	705	0,001
515	0,907	580	0,570	645	0,064	710	0,002
520	0,962	585	0,517	650	0,050	715	0,000
525	0,994	590	0,464	655	0,038		
R							
615	0,001	690	0,857	765	0,438	840	0,117
620	0,012	695	0,827	770	0,415	845	0,098
625	0,064	700	0,794	775	0,392	850	0,080
630	0,204	705	0,764	780	0,368	855	0,063
635	0,423	710	0,736	785	0,347	860	0,048
640	0,651	715	0,702	790	0,325	865	0,035
645	0,824	720	0,671	795	0,303	870	0,025
650	0,932	725	0,642	800	0,283	875	0,017
655	0,987	730	0,614	805	0,261	880	0,011
660	1,000	735	0,589	810	0,241	885	0,007
665	0,988	740	0,562	815	0,219	890	0,005
670	0,971	745	0,536	820	0,197	895	0,003
675	0,941	750	0,510	825	0,176	900	0,002
680	0,911	755	0,485	830	0,156	905	0,000
685	0,886	760	0,458	835	0,137		

Таблица Г2-а.

Величины стандартов системы WBVR в версии 1976-1984 гг.

HD	Sp	W	B	V	R	σ_V	n
5015	F8 V	5.223	5.334	4.797	4.313	0.006	2
6116	A5 m	6.184	6.119	5.959	5.817	0.007	1
6210	F6 V	6.355	6.396	5.846	5.348	0.004	6
7964	A3 V	4.911	4.805	4.765	4.700	0.007	11
10307	G1.5 V	5.478	5.583	4.981	4.444	0.006	3
11973	F0 V	5.075	5.068	4.794	4.517	0.006	44
13974	G0 V	5.273	5.474	4.882	4.318	0.006	*
16739	F9 V	5.406	5.476	4.913	4.423	0.008	3*
18411	A2 V	4.877	4.765	4.694	4.606	0.006	14
20150	A1 V	4.848	4.874	4.880	4.857	0.004	7
22484	F9 V	4.737	4.853	4.304	3.791	0.007	7
24357	F4 V	6.157	6.312	5.972	5.638	0.005	1
25102	F5 V	6.594	6.774	6.362	5.968	0.004	3
25457	F5 V	5.690	5.871	5.384	4.917	0.007	0
25570	F2 V	5.655	5.828	5.463	5.097	0.005	8
26690	F2 V +F5 V	5.515	5.659	5.301	4.943	0.006	9*
34411	G2 IV-V	5.238	5.299	4.703	4.173	0.007	3
34557	A3 V	5.643	5.590	5.474	5.330	0.007	4
39319	B9 V	6.607	7.145	7.210	7.208	0.004	6
39587	G0 V	4.833	4.978	4.405	3.872	0.006	49
41695	A1 V n	4.717	4.717	4.677	4.614	0.007	19
45067	F8 V	6.308	6.435	5.891	5.387	0.006	12
55575	G0 V	5.921	6.119	5.559	5.034	0.003	4
64145	A3 V	5.168	5.081	4.978	4.864	0.007	117
69830	G7.5 V	6.844	6.731	5.981	5.333	0.010	8
73210	A5 V	7.023	6.935	6.752	6.552	0.004	8

73262	A1 V nn	4.146	4.156	4.138	4.094	0.008	26
73731	A5 m	6.612	6.470	6.306	6.151	0.004	9
75332	F7 V n	6.564	6.734	6.229	5.763	0.002	4
82446	A3 V	4.784	4.676	4.567	4.422	0.010	13*
82621	A2 V	4.565	4.521	4.483	4.424	0.007	1
86728	G2 V	6.087	6.043	5.397	4.834	0.005	48
92825	A3 V n	5.156	5.115	5.076	5.025	0.006	18
94334	A1 V s	4.553	4.656	4.678	4.671	0.008	70
95608	A1 m	4.476	4.454	4.404	4.356	0.009	32
98353	A2 v	4.844	4.876	4.764	4.660	0.007	8*
99579	F8	7.767	7.841	7.291	6.798	0.005	4
108382	A4 V	5.188	5.081	4.971	4.865	0.009	74
110897	G0 V	6.291	6.538	5.974	5.443	0.006	59
111395	G7 V	7.060	7.012	6.315	5.707	0.007	6
112171	A7 IV	6.496	6.477	6.264	6.051	0.006	39
114330	A1 IV s +Am	4.370	4.368	4.367	4.333	0.006	12*
114710	G0 V	4.702	4.842	4.266	3.749	0.004	6
117176	G2.5 V	5.732	5.701	4.990	4.371	0.007	22
122408	A3 V	4.471	4.350	4.254	4.132	0.005	10
132254	F7 V	5.997	6.139	5.639	5.176	0.003	4
135502	A2 V	5.388	5.364	5.300	5.238	0.009	32
140775	A0 V	5.696	5.670	5.626	5.556	0.005	11
143894	A3 V	4.942	4.907	4.833	4.760	0.009	64
144284	F8 IV	4.463	4.530	4.009	3.533	0.008	24*
173880	A5 III	4.499	4.477	4.350	4.251	0.009	55
186408	G1.5 V	6.575	6.604	5.978	5.433	0.007	26
189340	F8 V	6.313	6.468	5.897	5.379	0.008	6
202275	F5 V + G0 V	4.778	4.998	4.498	4.044	0.007	4*
205767	A7 V	4.948	4.871	4.699	4.526	0.007	12*
214994	A1 IV	4.779	4.800	4.807	4.787	0.011	7

216735	A1 V	4.904	4.925	4.924	4.897	0.005	13
221142	F0	6.954	6.896	6.613	6.336	0.007	19*
221525	A7 IV	5.922	5.800	5.574	5.346	0.008	115
221829	A5	7.444	7.286	7.110	6.907	0.008	24
222603	A7 V	4.721	4.707	4.505	4.320	0.009	11
224687	A0	6.917	6.830	6.767	6.680	0.007	44

Таблица Г2-b.

Величины стандартов системы WBVR в версии каталога (АФК-2)

HR	HD	ab	HIP	R.A.	DECL.	Hp	BT	VT	Sp	V	W-B	B-V	V-R	*
76	1561		1603	00 20 05.17	+48 51 55.6	6.5560	6.541	6.575	A0Vs	6.543	0.104	0.031	0.033	
	3861		3236	00 41 11.87	+09 21 18.2	6.6373	6.576	7.140	F8V	6.527	-0.117	0.513	0.418	
203	4307	A	3559	00 45 28.69	-12 52 50.9	6.2783	6.220	6.906	G2V	6.158	-0.086	0.612	0.512	*
225	4676	A	3810	00 48 58.71	+16 56 26.3	5.1782	5.124	5.684	F8V	5.070	-0.132	0.518	0.428	*
244	5015	A	4151	00 53 04.20	+61 07 26.3	4.9069	4.856	5.466	F8V	4.797	-0.082	0.553	0.456	*
291	6118		4889	01 02 49.10	+31 48 15.3	5.4945	5.491	5.442	B9.5V	5.503	-0.200	-0.051	-0.048	
297	6210		5021	01 04 19.45	+61 34 48.7	5.9575	5.902	6.515	F6V	5.845	-0.029	0.571	0.472	
333	6798		5626	01 12 16.82	+79 40 26.3	5.6135	5.594	5.635	A3V	5.602	0.049	0.020	0.005	
383	7964		6193	01 19 28.00	+27 15 50.6	4.7736	4.757	4.813	A3V	4.756	0.157	0.039	0.026	
	8262		6405	01 22 17.88	+18 40 57.7	7.0938	7.032	7.725	G3V	6.973	-0.079	0.630	0.513	
404	8556	AB	6564	01 24 20.50	-06 54 52.8	6.0119	5.961	6.398	F3V+F4V	5.918	-0.163	0.407	0.361	*
	9407		7339	01 34 33.26	+68 56 53.3	6.6544	6.599	7.366	G6V	6.529	0.041	0.696	0.546	
	9670		7357	01 34 48.87	+00 56 41.2	7.0152	6.957	7.513	F8V	6.903	-0.163	0.526	0.446	
483	10307		7918	01 41 47.14	+42 36 48.1	5.0839	5.031	5.717	G1.5V	4.965	-0.049	0.623	0.499	
538	11335		8771	01 52 50.72	+51 28 29.4	6.3028	6.283	6.338	A3V	6.284	0.128	0.046	0.032	
	13043		9911	02 07 34.27	-00 37 02.7	7.0077	6.946	7.646	G2V	6.883	-0.017	0.630	0.503	
660	13974	A	10644	02 17 03.23	+34 13 27.2	4.9831	4.938	5.606	G0V	4.873	-0.144	0.612	0.530	*
	15228		11427	02 27 23.39	+10 11 54.0	6.5497	6.506	6.978	F5V	6.452	-0.175	0.454	0.395	
784	16673		12444	02 40 12.42	-09 27 10.4	5.9040	5.850	6.404	F6V	5.792	-0.152	0.509	0.433	
860	17948	A	13665	02 55 56.92	+61 31 16.1	5.6858	5.639	6.088	F4V	5.596	-0.184	0.429	0.386	*

879	18411		13879 02	58	45.67 +39	39	45.8 4.7156 4.692 4.774 A2Vn	4.694	0.157	0.059	0.062	
945	19600		14719 03	10	08.84 +27	49	11.2 6.4329 6.418 6.439 A0V	6.424	0.026	0.000	0.010	
972	20150		15110 03	14	54.10 +21	02	40.0 4.8803 4.879 4.872 A1V	4.876	0.043	-0.016	-0.017	
1101	22484		16852 03	36	52.38 +00	24	06.0 4.4104 4.359 4.985 F8V	4.290	-0.086	0.573	0.473	
	22879		17147 03	40	22.06 -03	13	01.1 6.8016 6.749 7.330 F9V	6.688	-0.248	0.543	0.487	
1139	23281		17395 03	43	33.83 -10	29	08.4 5.6598 5.620 5.860 A5m	5.594	0.053	0.214	0.170	
1144	23324		17527 03	45	09.74 +24	50	21.3 5.6447 5.644 5.567 B8Vn	5.663	-0.447	-0.074	-0.043	
1201	24357		18170 03	53	10.05 +17	19	37.5 6.0494 6.002 6.370 F4V	5.965	-0.074	0.343	0.297 *	
1223	25102		18658 03	59	40.49 +10	19	49.4 6.4459 6.395 6.841 F5V	6.356	-0.118	0.417	0.362 *	
1249	25457		18859 04	02	36.74 -00	16	08.1 5.4938 5.441 6.000 F6V	5.381	-0.140	0.508	0.431	
1254	25570		18975 04	03	56.60 +08	11	50.2 5.5360 5.492 5.891 F2V	5.449	-0.111	0.369	0.327	
1309	26690 AB		19719 04	13	33.10 +07	42	57.8 5.3736 5.326 5.716 F2V+F5V	5.285	-0.082	0.365	0.316 *	
1314	26764		19949 04	16	43.09 +53	36	42.5 5.2217 5.205 5.263 A2Vn	5.204	0.093	0.047	0.047	
1419	28459		21038 04	30	38.41 +32	27	28.0 6.1776 6.168 6.137 B9.5Vn	6.184	-0.172	-0.035	-0.016	
1440	28780		21452 04	36	24.20 +64	15	41.8 5.9181 5.907 5.895 A1V	5.918	0.030	-0.021	-0.012	
1468	29329		22152 04	46	00.58 +76	36	39.8 6.5731 6.518 7.043 F7V	6.501	-0.170	0.489	0.427	
1545	30743		22439 04	49	42.24 -13	46	10.8 6.3702 6.322 6.793 F5V	6.273	-0.191	0.444	0.403	
1558	31069		22842 04	54	51.24 +44	03	39.1 6.0561 6.056 6.018 B9.5V	6.062	-0.119	-0.037	-0.035	
1729	34411 A		24813 05	19	08.47 +40	05	56.6 4.8232 4.757 5.453 G2IV/V	4.705	-0.033	0.622	0.499 *	
1738	34557		24902 05	20	14.67 +41	05	10.4 5.5089 5.480 5.615 A3V	5.471	0.102	0.118	0.109 *	
1806	35640		25401 05	26	02.36 -05	31	06.6 6.2321 6.231 6.175 B9V	6.236	-0.238	-0.053	-0.032	
	39319 AB		27657 05	51	21.62 -11	38	46.3 7.1733 7.226 7.111 B9	7.192	-0.463	-0.085	-0.037 *	
2155	41695		28910 06	06	09.32 -14	56	06.9 4.6890 4.674 4.727 A1Vn	4.667	0.073	0.035	0.030	
2209	42818		29997 06	18	50.78 +69	19	11.2 4.7792 4.764 4.789 A0Vn	4.773	0.023	0.006	0.009	

2313	45067		30545 06	25	16.55	-00	56	45.2 5.9959 5.938 6.544 F8V	5.883	-0.096	0.561	0.469	
2321	45239		30608 06	25	58.83	-07	53	41.9 6.4551 6.427 6.581 A4V	6.411	0.142	0.134	0.125	
2350	45618		32296 06	44	30.36	+82	06	55.2 6.6760 6.645 6.843 A5V	6.630	0.034	0.181	0.152	
2375	46089		31119 06	31	48.30	+11	32	39.9 5.2842 5.241 5.442 A3V	5.232	0.107	0.169	0.149	
2402	46590		31665 06	37	38.39	+56	51	27.1 5.8799 5.873 5.879 A2V	5.877	0.045	-0.002	-0.005	
2498	49048		32411 06	45	59.39	-14	47	46.1 5.3291 5.308 5.384 A1IV/V	5.306	0.151	0.059	0.078	
2601	51530 A		33595 06	58	47.41	+26	04	51.9 6.3145 6.256 6.804 F7V	6.215	-0.158	0.514	0.456	*
2710	55111		34768 07	11	51.38	+05	39	16.9 6.0705 6.070 6.048 A1V	6.065	-0.001	-0.017	-0.004	
2721	55575		35136 07	15	50.14	+47	14	23.9 5.6685 5.612 6.251 G0V	5.561	-0.165	0.582	0.496	
2779	57006		35509 07	19	47.65	+07	08	34.6 6.0267 5.967 6.547 F8V	5.917	-0.055	0.527	0.442	
2780	57049		35548 07	20	06.84	+15	08	34.5 6.4583 6.453 6.462 A2Vn	6.448	0.110	0.010	0.032	
2832	58461		35998 07	25	08.32	-13	45	07.1 5.8840 5.830 6.273 F3V	5.791	-0.156	0.417	0.375	
2866	59380		36399 07	29	25.64	-07	33	04.2 5.9698 5.920 6.429 F8V	5.871	-0.173	0.474	0.415	
3067	64145		38538 07	53	29.81	+26	45	56.8 5.0049 4.988 5.105 A3V	4.972	0.141	0.100	0.082	
3098	65123 AB		38870 07	57	16.29	+01	07	37.3 6.4638 6.416 6.948 F5V+F7V	6.363	-0.143	0.496	0.430	*
3259	69830		40693 08	18	23.95	-12	37	55.8 6.0937 6.035 6.917 G7.5V	5.965	0.158	0.769	0.609	
3383	72660		42028 08	34	01.62	-02	09	05.6 5.8134 5.800 5.807 A1V	5.811	0.018	-0.006	-0.006	
3391	72905		42438 08	39	11.70	+65	01	15.3 5.7592 5.706 6.389 G1.5Vb	5.648	-0.096	0.621	0.511	*
	73210		42327 08	37	46.76	+19	16	02.0 6.7907 6.765 6.959 A5V	6.740	0.142	0.184	0.165	
3410	73262 A		42313 08	37	39.37	+05	42	13.6 4.1512 4.139 4.163 A1Vnn	4.137	0.047	0.011	0.010	*
3429	73731 A		42556 08	40	27.01	+19	32	41.3 6.3427 6.309 6.492 A5m	6.294	0.196	0.166	0.120	*
3437	73997		42606 08	41	01.62	-09	03	07.2 6.6536 6.634 6.652 A1Vn	6.648	-0.000	-0.004	-0.010	
3499	75332		43410 08	50	32.22	+33	17	06.2 6.3403 6.273 6.859 F7Vn	6.228	-0.127	0.526	0.437	
3648	79028		45333 09	14	20.54	+61	25	23.9 5.3096 5.255 5.919 F9V	5.195	-0.054	0.605	0.498	

3711	80613		45874 09	21	15.35 +15	22	16.9 6.5740 6.561 6.562 A1V	6.565	0.040	-0.004	-0.003	
3719	80930		46410 09	27	51.59 +75	05	54.0 6.2443 6.212 6.339 A5Vs	6.207	0.170	0.103	0.081	
3787	82446		46776 09	31	58.93 -01	11	04.8 4.5926 4.566 4.689 A3V	4.559	0.165	0.101	0.114 *	
3799	82621		47006 09	34	49.43 +52	03	05.3 4.4948 4.484 4.537 A2V	4.481	0.094	0.035	0.028	
3893	85217		48273 09	50	30.08 +04	20	37.1 6.3410 6.295 6.793 F7Vn	6.238	-0.152	0.472	0.397	
3951	86728		49081 10	01	00.66 +31	55	25.2 5.5094 5.458 6.216 G2Va	5.385	0.075	0.676	0.528	
3989	88195		49812 10	10	07.54 -08	24	29.4 5.9162 5.902 5.921 A1V	5.904	0.042	0.015	0.048	
3991	88215		49809 10	10	05.89 -12	48	57.3 5.3846 5.338 5.721 F2-3IV/V	5.303	-0.122	0.362	0.318	
4112	90839 A		51459 10	30	37.76 +55	58	50.2 4.9366 4.883 5.457 F8V	4.833	-0.166	0.527	0.446	
4192	92825		52457 10	43	24.96 +23	11	18.3 5.0951 5.079 5.128 A3Vn	5.076	0.091	0.034	0.017	
4227	93702		52911 10	49	15.43 +10	32	42.7 5.3385 5.318 5.357 A2V	5.317	0.097	0.031	0.028	
4248	94334		53295 10	53	58.74 +43	11	23.8 4.6680 4.665 4.636 A1Vs	4.672	-0.033	-0.039	-0.029	
4300	95608		53954 11	02	19.78 +20	10	47.4 4.4298 4.413 4.482 A1m	4.406	0.075	0.046	0.014 *	
	97037		54582 11	10	13.34 -07	23	21.8 6.9333 6.881 7.543 G0V	6.821	-0.085	0.613	0.508	
4356	97585		54849 11	13	45.55 -00	04	10.2 5.4033 5.397 5.373 A0V	5.401	0.004	-0.026	-0.009	
4380	98353		55266 11	19	07.90 +38	11	08.0 4.8035 4.775 4.905 A2V	4.768	0.036	0.104	0.077 *	
	99579		55930 11	27	44.77 +37	56	17.5 7.3964 7.337 7.944 F8	7.290	-0.032	0.555	0.458	
4488	101198 AB		56802 11	38	40.02 -13	12	07.0 5.5959 5.544 6.093 F7V	5.490	-0.151	0.511	0.447 *	
4564	103578		58159 11	55	40.53 +15	38	48.5 5.5709 5.543 5.671 A3V	5.531	0.162	0.110	0.086	
4589	104321		58590 12	00	52.39 +06	36	51.6 4.6939 4.671 4.808 A5V	4.648	0.183	0.119	0.095	
4606	104904		58874 12	04	28.11 +85	35	13.7 6.3876 6.335 6.936 F6V	6.277	-0.081	0.570	0.468	
4681	107070		60030 12	18	40.32 -00	47	13.9 5.9541 5.924 6.107 A5Vn	5.905	0.163	0.160	0.146	
4687	107193		60044 12	18	49.98 +75	09	38.0 5.4903 5.470 5.530 A1V	5.473	0.118	0.046	0.041	
4738	108382		60746 12	26	59.30 +26	49	32.5 4.9999 4.975 5.088 A4V	4.963	0.180	0.094	0.070	

4767 108954		61053 12 30 50.14 +53 04 35.8 6.3276 6.275 6.887 F8-G0V	6.220 -0.142 0.560 0.469
4781 109309		61318 12 33 46.75 -09 27 07.5 5.4867 5.491 5.451 A0V	5.491 -0.114 -0.040 -0.036
4845 110897		62207 12 44 59.41 +39 16 44.1 6.0723 6.019 6.625 G0V	5.964 -0.209 0.566 0.488
4864 111395		62523 12 48 47.05 +24 50 24.8 6.4279 6.372 7.170 G7V	6.295 0.078 0.711 0.557
4867 111456		62512 12 48 39.46 +60 19 11.4 5.9399 5.891 6.402 F5V	5.845 -0.188 0.478 0.429
4911 112304		63109 12 55 53.24 -15 19 37.3 6.1936 6.193 6.183 A0Vn	6.195 -0.012 -0.006 0.013
4983 114710 A		64394 13 11 52.39 +27 52 41.5 4.3608 4.311 4.956 G0V	4.244 -0.098 0.582 0.469 *
5072 117176 A		65721 13 28 25.81 +13 46 43.6 5.1033 5.050 5.854 G2.5Va	4.973 0.075 0.727 0.574 *
5163 119537		67004 13 43 54.24 -05 29 56.2 6.5290 6.508 6.577 A1V	6.506 0.012 0.052 0.046
5255 121996		68276 13 58 38.92 +21 41 46.4 5.7682 5.756 5.752 A0Vs	5.764 0.054 -0.010 -0.009
5264 122408 A		68520 14 01 38.79 +01 32 40.3 4.2777 4.254 4.368 A3V	4.244 0.174 0.103 0.094 *
5373 125642		70029 14 19 47.74 +38 47 38.6 6.3413 6.322 6.389 A2V	6.322 0.096 0.050 0.035
5455 128429		71469 14 36 59.78 -12 18 19.3 6.2977 6.243 6.742 F5V	6.202 -0.168 0.467 0.410
	130145 AB	72221 14 46 15.58 +09 38 48.3 7.3813 7.542 8.253 G2V	7.264 -0.063 0.623 0.511 *
5567 131951		73087 14 56 13.23 +14 26 46.6 5.8990 5.898 5.861 A0V	5.905 -0.063 -0.038 -0.023
5581 132254		73100 14 56 23.04 +49 37 42.4 5.7475 5.693 6.258 F7V	5.641 -0.113 0.518 0.427
5629 133994		73706 15 03 57.77 +65 55 11.0 6.2399 6.215 6.279 A2Vs	6.227 0.114 0.042 0.033
5676 135502		74596 15 14 29.16 +29 09 51.5 5.3074 5.287 5.356 A2V	5.285 0.100 0.053 0.026
5679 135559		74689 15 15 49.08 +00 22 19.7 5.6835 5.647 5.843 A4V	5.629 0.053 0.176 0.134
5779 138763		76233 15 34 20.81 -05 41 42.3 6.6436 6.585 7.217 F7V	6.525 -0.129 0.580 0.480 *
5830 139798		76568 15 38 16.23 +46 47 51.9 5.8402 5.797 6.174 F2V	5.761 -0.126 0.359 0.324
5859 140775		77163 15 45 23.48 +05 26 50.3 5.5865 5.573 5.610 A0V	5.568 0.077 0.032 0.020
5927 142640		78059 15 56 14.43 -14 23 57.8 6.4277 6.376 6.890 F6V	6.333 -0.070 0.478 0.421
5968 143761 A		78459 16 01 02.66 +33 18 12.6 5.5246 5.469 6.142 G2V	5.411 -0.105 0.615 0.508 *

5972 143894		78554 16 02 17.69 +22 48 16.0 4.8506 4.825 4.916 A3V	4.823	0.101	0.070	0.037	
5986 144284		78527 16 01 53.35 +58 33 54.9 4.1190 4.064 4.654 F8IV	4.013	-0.050	0.540	0.442	
6004 144874		79007 16 07 37.54 +09 53 30.3 5.6981 5.659 5.883 A7V	5.645	0.109	0.197	0.168	
6033 145607		79387 16 12 07.32 -08 32 51.3 5.4731 5.447 5.576 A4V	5.435	0.138	0.117	0.098	
6093 147449		80179 16 22 04.35 +01 01 44.5 4.9017 4.854 5.227 F0V	4.819	-0.053	0.340	0.289	
6116 148048		79822 16 17 30.29 +75 45 19.2 5.0409 4.999 5.401 F5V	4.966	-0.092	0.372	0.323	
149105		80818 16 30 14.96 +47 57 08.6 7.1043 7.057 7.688 G0V	6.999	-0.099	0.590	0.494 *	
151044		81800 16 42 27.81 +49 56 11.2 6.5884 6.527 7.119 F8V	6.481	-0.138	0.544	0.452	
6235 151527		82259 16 48 26.97 -14 54 33.9 6.0880 6.062 6.263 A0Vn	6.038	0.103	0.204	0.242	
152792		82636 16 53 32.33 +42 49 29.5 6.9407 6.887 7.585 G0V	6.827	-0.093	0.645	0.535	
157089		84905 17 21 07.06 +01 26 35.0 7.0767 7.014 7.633 F9V	6.963	-0.173	0.581	0.498	
6457 157198 A		84887 17 20 54.21 +24 29 58.0 5.1345 5.126 5.125 A2V	5.131	0.079	-0.004	-0.001 *	
6534 159170		85922 17 33 29.84 -05 44 41.3 5.6724 5.637 5.840 A5V	5.622	0.053	0.189	0.152	
6538 159222		85810 17 32 00.99 +34 16 16.1 6.6563 6.595 7.317 G5V	6.537	-0.006	0.646	0.510	
6589 160765		86546 17 41 10.99 +15 10 42.2 6.3570 6.339 6.383 A1V	6.342	0.012	0.028	0.005	
6596 160922 A		86201 17 36 57.09 +68 45 28.7 4.8698 4.824 5.292 F5V	4.779	-0.147	0.441	0.381 *	
6600 161023		86769 17 43 48.41 -13 30 31.3 6.4492 6.409 6.801 F0V	6.367	-0.166	0.380	0.342	
6618 161693		86782 17 43 59.18 +53 48 06.2 5.7652 5.752 5.770 A2V	5.760	0.073	0.021	0.019	
6696 163772		87910 17 57 26.98 +11 02 40.4 6.3810 6.350 6.493 A1V	6.335	0.138	0.130	0.101	
165401		88622 18 05 37.46 +04 39 25.8 6.9236 6.877 7.529 G0-2V	6.805	-0.145	0.615	0.508	
6831 167588		89408 18 14 44.00 +29 12 26.3 6.6330 6.572 7.200 F8V	6.522	-0.138	0.577	0.487	
6850 168151		89348 18 13 53.83 +64 23 50.2 5.0878 5.044 5.496 F5V	5.000	-0.198	0.436	0.392	
6876 168913		89925 18 20 56.97 +29 51 32.1 5.6804 5.639 5.903 A5m	5.618	0.007	0.238	0.193	
6962 171130		90991 18 33 39.02 -14 51 13.0 5.7637 5.746 5.793 A0-1V	5.748	0.041	0.041	0.013	

7025 172864	90182 18 24 09.27 +83 10 31.4 6.1881 6.167 6.224 A2V	6.180 0.127 0.044 0.038
7034 173093	91880 18 43 51.23 -06 49 05.2 6.4009 6.347 6.844 F7V	6.298 -0.138 0.484 0.403
7085 174240	92386 18 49 37.19 +00 50 10.3 6.2569 6.240 6.285 A1V	6.239 0.065 0.040 0.034
7086 174262	92312 18 48 53.39 +19 19 43.4 5.9081 5.896 5.920 A1V	5.896 0.027 0.016 -0.005
7284 179583	94280 19 11 23.16 +40 25 44.7 6.2338 6.204 6.311 A3V	6.209 0.130 0.082 0.061
7332 181383	95002 19 19 53.07 +11 32 05.9 6.0602 6.033 6.148 A2V	6.029 0.108 0.093 0.056
7366 182475	95453 19 25 01.53 -04 53 04.3 6.5849 6.541 6.912 A9V	6.505 0.062 0.350 0.292
184385	96183 19 33 25.55 +21 50 25.2 7.0263 6.959 7.807 G5V	6.893 0.131 0.752 0.580
184499	96185 19 33 27.08 +33 12 06.7 6.7521 6.697 7.328 G0V	6.641 -0.165 0.594 0.504
7451 184960	96258 19 34 19.79 +51 14 11.8 5.8251 5.775 6.302 F7V	5.731 -0.160 0.488 0.417 *
7454 184985	96536 19 37 34.41 -14 18 06.5 5.5725 5.521 6.053 F7V	5.471 -0.108 0.507 0.423
7503 186408	96895 19 41 48.95 +50 31 30.2 6.1084 6.034 6.762 G1.5V	5.986 -0.004 0.659 0.521 *
7504 186427	96901 19 41 51.97 +50 31 03.1 6.3656 6.286 7.029 G2.5V	6.244 0.008 0.671 0.531 *
7522 186760	97033 19 43 14.42 +58 00 59.8 6.4180 6.362 7.005 G0V	6.304 -0.038 0.594 0.478
7637 189340	98416 19 59 47.34 -09 57 29.7 5.9969 5.928 6.582 F8V	5.885 -0.106 0.597 0.489
7724 192425	99742 20 14 16.62 +15 11 51.4 4.9747 4.954 5.032 A2V	4.947 0.073 0.067 0.029
7783 193664	100017 20 17 31.33 +66 51 13.3 6.0407 5.981 6.640 G3V	5.932 -0.128 0.601 0.497
7855 195838	101507 20 34 11.70 -13 43 15.9 6.2373 6.182 6.769 G0V	6.132 -0.113 0.546 0.451
7914 197076 A	102040 20 40 45.14 +19 56 07.9 6.5617 6.498 7.195 G5V	6.444 -0.082 0.628 0.505 *
7954 198070	102631 20 47 47.88 +03 18 23.3 6.3857 6.380 6.364 A0Vn	6.383 -0.084 -0.008 -0.017
8041 199960	103682 21 00 33.84 -04 43 48.9 6.3397 6.278 6.984 G1V	6.214 0.028 0.645 0.496
8123 202275 AB	104858 21 14 28.82 +10 00 25.1 4.5929 4.549 5.092 F5V+G0V	4.488 -0.158 0.512 0.422 *
202573	105000 21 15 57.17 +25 26 01.8 7.1374 7.083 8.107 G5V	6.993 0.329 0.911 0.698
8134 202606	105079 21 17 13.54 -13 16 44.4 6.4274 6.413 6.451 A1V	6.412 0.110 0.042 0.022

203345	AB	105431	21	21	21.58	+10	19	56.2	6.8320	6.776	7.338	F8V+F8V	6.722	-0.160	0.528	0.442	*	
8169	203439	105432	21	21	21.94	+32	36	45.8	6.0723	6.050	6.119	A1V	6.048	0.152	0.067	0.049		
8264	205767	106786	21	37	45.11	-07	51	15.1	4.7431	4.708	4.907	A7V+	4.691	0.137	0.176	0.131		
8291	206538	A	107097	21	41	34.26	+40	48	18.8	6.1119	6.087	6.161	A2V	6.088	0.133	0.068	0.046	*
	208776	108473	21	58	28.42	+03	46	36.9	7.0743	7.027	7.651	G0V	6.959	-0.082	0.592	0.486		
8400	209369	A	108535	21	59	14.97	+73	10	47.6	5.1402	5.090	5.572	F5V	5.045	-0.128	0.455	0.400	*
8451	210419	109442	22	10	21.11	-03	53	38.7	6.2897	6.284	6.272	A1Vnn	6.283	-0.012	0.000	-0.007		
8455	210460	109439	22	10	19.02	+19	36	58.8	6.3162	6.264	7.037	G0V	6.188	0.020	0.719	0.573		
8472	210855	A	109572	22	11	48.77	+56	50	21.7	5.3618	5.313	5.880	F8V	5.258	-0.055	0.522	0.431	*
8641	214994	112051	22	41	45.41	+29	18	27.5	4.8053	4.796	4.790	A1IV	4.802	0.039	-0.012	-0.015		
8647	215143	112179	22	43	14.26	-06	57	46.6	6.4028	6.406	6.367	A0Vn	6.404	-0.115	-0.031	-0.038		
8717	216735	113186	22	55	13.67	+08	48	58.2	4.9155	4.906	4.908	A1V	4.908	0.037	-0.005	-0.009		
8772	217877	113896	23	03	57.27	-04	47	41.5	6.8189	6.763	7.389	F8V	6.707	-0.119	0.585	0.478		
8792	218261	114096	23	06	31.89	+19	54	39.1	6.5568	6.501	7.089	F7V	6.447	-0.111	0.553	0.448	*	
8885	220117	A	115280	23	20	53.26	+38	10	56.4	5.8709	5.826	6.310	F5V	5.773	-0.105	0.460	0.391	*
8917	220957	115839	23	28	05.20	-11	26	59.1	6.5243	6.476	7.508	G6-8III	6.389	0.368	0.929	0.718		
8931	221356	116106	23	31	31.50	-04	05	14.7	6.6127	6.551	7.134	F8V	6.502	-0.179	0.547	0.458		
8938	221525	115746	23	27	00.87	+87	18	27.0	5.6313	5.587	5.850	A7IV	5.571	0.176	0.226	0.200		
	221830	116421	23	35	28.89	+31	01	01.8	6.9850	6.926	7.588	F9V	6.871	-0.128	0.621	0.519		
8971	222386	116714	23	39	10.18	+75	17	34.4	5.9967	5.970	6.092	A3V	5.970	0.104	0.095	0.075		
8984	222603	116928	23	42	02.81	+01	46	48.1	4.5578	4.521	4.744	A7V	4.498	0.077	0.197	0.155		
9013	223274	117371	23	47	54.77	+67	48	24.5	5.0602	5.049	5.056	A1Vn	5.059	0.044	-0.010	-0.006		
	224155	117962	23	55	37.71	+08	13	23.8	6.8337	6.822	6.827	A0V	6.821	-0.008	-0.003	-0.023		
	224687	118285	23	59	30.74	+86	42	23.1	6.7823	6.755	6.837	A0	6.759	0.147	0.057	0.057		

9107|225239| | 394|00 04 53.76|+34 39 35.3|6.2283|6.176|6.870|G2V |6.111|-0.098| 0.640| 0.541| |

Примечания.

* 4307 D: dAB=70", dm=6.3;	* 72905 V: NSV 17937	* 160922 D: dAB=72", dm=8
* 4676 D: dAB=77", dm=7.4;	* 73262 D: dAB=244";	* 184960 V: NSV 24820
* 5015 D: dAB=130", dm=5.5, dBC=0"9, dAD=93", dAE=130";	* 73731 D: dAB=135", dm=1.1, B=HD 73711;	* 186408 D: dAB=39", dm=0.2, B=HD 186427
* 8556 D: dAB=0"2;	* 82446 V: NSV 18227	* 186427 D: dAB=39", dm=0.2, A=HD 186408
* 13974 D: dAB=65", dm=8.5;	* 95608 V: NSV 18592	* 197076 D: dAB=94", dm=5
* 17948 D: dAB=53", dm=7.5, dAC=89", dm=5.5;	* 98353 V: NSV 18718	* 202275 D: dAB=0"2, dm=0.3, dAC=47"
* 24357 V: NSV 15826	* 101198 D: dAB=1"4, dm=5.4;	* 203345 D: dAB=0"2
* 25102 V: NSV 15859	* 114710 V: NSV 19648; D: dAB=91", dm=6;	* 206538 D: dAB=62", dAC=137"
* 26690 D: dAB=0"1, dm=0.2;	* 117176 D: dAB=286", dm=3.6;	* 209369 D: dAB=131", dm=7
* 34411 D: dAB=30", dm=8.7, dAC=40", dm=7.4, dAD=147", dm=4;	* 122408 D: dAB=80", dm=5, dBC=158", dmAC=9;	* 210855 D: dAB=73", dm=5.1
* 34557 V: NSV 16284	* 130145 D: dAB=1", dAC=56", dm=5, dAD=133";	* 218261 V: NSV 26016
* 39319 D: dAB=0"9;	* 138763 V: NSV 20335	* 220117 D: dAB=121", dm=3, dBC=155"
* 51530 V: NSV 17256; D: dAB=29", dm=6;	* 143761 D: dAB=90", dm=3.2;	* 221830 V: NSV 26109
* 65123 D: dAB=0"4, dm=0.2;	* 149105 V: NSV 20671	
	* 157198 D: dAB=223", dm=3.5, dAC=239", dm=5;	

Таблица ГЗ**WBVR** величины звезд Гиад.

Звездные величины переведены в систему каталога **WBVR**.

NvB	HD	W	B	V	R	W-B	B-V	V-R	B-R	W-V
002	20439	8.384	8.384	7.762	7.270	-0.000	0.622	0.492	1.114	0.622
003	21633	9.228	9.087	8.320	7.729	0.141	0.766	0.591	1.357	0.908
004		10.061	9.723	8.862	8.209	0.337	0.861	0.653	1.514	1.199
005		10.825	10.290	9.358	8.620	0.534	0.932	0.738	1.670	1.467
006	24357	6.230	6.303	5.963	5.667	-0.073	0.340	0.296	0.636	0.267
007	285252	10.420	9.966	9.047	8.339	0.453	0.919	0.708	1.627	1.373
008	25102	6.647	6.764	6.346	5.998	-0.117	0.418	0.348	0.766	0.301
009		9.462	9.380	8.667	8.080	0.082	0.713	0.587	1.300	0.795
010	25825	8.353	8.419	7.832	7.334	-0.066	0.587	0.498	1.085	0.521
011/2	26015	6.317	6.393	6.001	5.649	-0.076	0.392	0.352	0.744	0.316
013	26345	6.901	7.020	6.601	6.236	-0.119	0.419	0.365	0.784	0.300
014	26462	5.985	6.063	5.718	5.409	-0.078	0.345	0.309	0.654	0.267
015	26736	8.745	8.729	8.068	7.530	0.016	0.661	0.538	1.199	0.677
016	26737	7.351	7.474	7.055	6.683	-0.123	0.418	0.372	0.790	0.296
017	26756	9.222	9.154	8.448	7.877	0.068	0.706	0.571	1.277	0.774
018	26767	8.688	8.695	8.036	7.529	-0.007	0.658	0.507	1.166	0.652
019	26784	7.516	7.622	7.105	6.674	-0.107	0.517	0.431	0.948	0.411
020	26911	6.618	6.704	6.306	5.963	-0.086	0.398	0.343	0.741	0.312
021		10.241	9.969	9.142	8.507	0.272	0.827	0.635	1.462	1.099
022	27130	9.179	9.051	8.289	7.663	0.128	0.762	0.626	1.388	0.890
023	27149	8.228	8.188	7.501	6.963	0.040	0.687	0.538	1.225	0.727
024	27176	5.958	5.916	5.638	5.397	0.042	0.278	0.241	0.519	0.320
025		11.222	10.586	9.590	8.816	0.636	0.995	0.774	1.770	1.632
026	27250	9.523	9.360	8.621	8.034	0.162	0.739	0.587	1.326	0.902

027	27282	9.315	9.170	8.440	7.862	0.145	0.730	0.578	1.308	0.875
028	27371	5.290	4.660	3.658	2.957	0.629	1.002	0.701	1.703	1.632
029	27383	7.332	7.423	6.861	6.420	-0.091	0.562	0.441	1.003	0.471
030	27397	5.886	5.854	5.576	5.346	0.032	0.278	0.230	0.508	0.310
031	27406	7.924	8.011	7.445	6.974	-0.087	0.566	0.471	1.037	0.479
032	27429	6.422	6.481	6.101	5.780	-0.059	0.380	0.321	0.701	0.321
033	27459	5.565	5.479	5.256	5.078	0.086	0.223	0.178	0.401	0.309
034	27483	6.483	6.603	6.148	5.769	-0.121	0.455	0.379	0.834	0.335
035	27524	7.081	7.222	6.786	6.421	-0.142	0.436	0.365	0.801	0.295
036	27534	7.122	7.243	6.799	6.429	-0.121	0.444	0.370	0.814	0.323
037	27561	6.868	7.070	6.590	6.241	-0.202	0.479	0.349	0.828	0.278
038	27628	6.071	6.025	5.709	5.454	0.045	0.316	0.255	0.571	0.362
039	27685	8.558	8.521	7.838	7.297	0.037	0.683	0.541	1.224	0.720
040	27691	7.482	7.547	6.973	6.507	-0.065	0.574	0.466	1.040	0.509
041	27697	5.430	4.778	3.770	3.071	0.651	1.008	0.699	1.707	1.660
042	27732	9.783	9.619	8.841	8.265	0.164	0.777	0.576	1.354	0.942
043		10.739	10.319	9.396	8.665	0.420	0.923	0.731	1.654	1.343
044	27731	7.517	7.636	7.174	6.787	-0.119	0.462	0.387	0.849	0.343
045	27749	6.026	5.935	5.623	5.395	0.091	0.312	0.228	0.540	0.403
046		10.380	10.005	9.134	8.474	0.375	0.871	0.660	1.531	1.246
047	27819	5.092	4.965	4.799	4.675	0.127	0.166	0.124	0.290	0.293
048	27808	7.539	7.656	7.135	6.701	-0.117	0.521	0.434	0.955	0.404
049	27835	8.789	8.833	8.223	7.731	-0.045	0.610	0.492	1.102	0.566
050	27836	8.132	8.189	7.580	7.077	-0.057	0.609	0.503	1.112	0.552
051	27848	7.286	7.405	6.951	6.576	-0.119	0.453	0.375	0.828	0.335
052	27859	8.345	8.403	7.788	7.300	-0.059	0.615	0.488	1.103	0.557
053	27901	6.314	6.353	5.968	5.639	-0.039	0.384	0.329	0.714	0.346
054		4.508	4.346	4.216	4.112	0.161	0.130	0.104	0.234	0.292
055	27946	5.589	5.522	5.280	5.070	0.067	0.241	0.210	0.451	0.309
056	27962	4.432	4.366	4.292	4.269	0.066	0.074	0.023	0.097	0.140

057	27991	6.810	6.946	6.455	6.040	-0.137	0.491	0.415	0.906	0.355
058	27989	8.295	8.224	7.528	6.978	0.070	0.696	0.550	1.246	0.767
059	28034	7.928	8.015	7.464	7.012	-0.087	0.551	0.452	1.003	0.464
060		4.695	4.558	4.301	4.066	0.136	0.257	0.235	0.492	0.394
061		7.723	7.856	7.347	6.921	-0.133	0.509	0.426	0.935	0.376
062	28033	7.821	7.907	7.367	6.929	-0.086	0.539	0.438	0.978	0.454
063	28068	8.670	8.684	8.038	7.512	-0.015	0.646	0.526	1.172	0.632
064	28099	8.815	8.787	8.113	7.590	0.028	0.674	0.523	1.197	0.702
065	28205	7.845	7.948	7.416	6.970	-0.103	0.531	0.446	0.978	0.429
066	28237	7.970	8.065	7.514	7.049	-0.095	0.550	0.465	1.016	0.456
067	28226	6.057	5.989	5.721	5.496	0.067	0.268	0.225	0.493	0.336
069	28291	9.508	9.352	8.602	8.031	0.156	0.749	0.571	1.320	0.906
070	28305	5.308	4.580	3.541	2.824	0.728	1.039	0.717	1.756	1.767
071	28307	5.383	4.823	3.853	3.156	0.559	0.970	0.697	1.667	1.530
072	28319	3.742	3.585	3.410	3.255	0.157	0.175	0.155	0.330	0.332
073	28344	8.397	8.448	7.830	7.347	-0.052	0.618	0.483	1.101	0.567
074	28355	5.364	5.229	5.026	4.866	0.135	0.203	0.160	0.363	0.338
075	28363	7.016	7.114	6.581	6.124	-0.099	0.533	0.457	0.990	0.435
076		10.208	9.998	9.191	8.622	0.210	0.807	0.569	1.376	1.017
077	28394	7.394	7.519	7.024	6.598	-0.125	0.495	0.426	0.921	0.370
078	28406	7.214	7.355	6.890	6.524	-0.142	0.465	0.366	0.831	0.324
079	285773	10.070	9.772	8.934	8.303	0.298	0.837	0.631	1.469	1.136
080	28485	5.917	5.892	5.568	5.281	0.024	0.324	0.287	0.611	0.349
081	28483	7.446	7.572	7.095	6.698	-0.127	0.477	0.397	0.874	0.351
082	28527	5.081	4.955	4.791	4.665	0.126	0.164	0.126	0.290	0.290
083	28546	5.799	5.719	5.474	5.282	0.080	0.245	0.192	0.437	0.325
084	28556	5.723	5.663	5.396	5.176	0.060	0.266	0.220	0.487	0.327
085	28568	6.815	6.931	6.496	6.120	-0.116	0.435	0.376	0.811	0.319
086	28608	7.369	7.506	7.035	6.622	-0.137	0.471	0.413	0.884	0.334
087	28593	9.501	9.344	8.585	8.002	0.157	0.759	0.583	1.342	0.916

088	28635	8.243	8.334	7.783	7.335	-0.091	0.551	0.448	0.999	0.460
089	28667	6.307	6.338	6.008	5.711	-0.031	0.330	0.297	0.627	0.299
090	28736	6.681	6.787	6.369	6.014	-0.106	0.418	0.355	0.773	0.312
091	28783	10.179	9.824	8.934	8.229	0.354	0.890	0.705	1.595	1.245
092	28805	9.549	9.400	8.647	8.069	0.148	0.753	0.578	1.331	0.902
093		10.743	10.309	9.364	8.719	0.433	0.945	0.645	1.590	1.379
094	28911	6.910	7.047	6.621	6.261	-0.137	0.426	0.360	0.786	0.289
095	28910	4.958	4.896	4.654	4.457	0.062	0.242	0.197	0.439	0.304
096	285931	9.649	9.345	8.501	7.842	0.304	0.844	0.659	1.503	1.148
097	28992	8.506	8.531	7.902	7.398	-0.026	0.629	0.504	1.133	0.604
098		9.555	9.661	9.229	8.805	-0.106	0.432	0.424	0.856	0.326
099		10.665	10.260	9.363	8.736	0.405	0.897	0.627	1.524	1.302
100	29169	6.330	6.402	6.012	5.675	-0.073	0.390	0.627	1.524	1.302
101	29225	6.962	7.080	6.635	6.273	-0.118	0.445	0.362	0.807	0.327
102	29310	8.106	8.159	7.544	7.036	-0.053	0.615	0.508	1.123	0.562
103	29375	6.117	6.092	5.784	5.515	0.025	0.308	0.269	0.577	0.333
104	29388	4.538	4.391	4.272	4.189	0.147	0.119	0.083	0.202	0.266
105	29419	8.015	8.096	7.504	7.053	-0.081	0.592	0.451	1.043	0.511
106	29461	8.647	8.631	7.961	7.456	0.015	0.670	0.505	1.175	0.686
107	29499	5.732	5.631	5.386	5.188	0.101	0.245	0.198	0.443	0.346
108	29488	4.981	4.832	4.681	4.556	0.149	0.151	0.125	0.276	0.300
109		10.432	10.191	9.388	8.754	0.240	0.803	0.634	1.437	1.044
110	29621	9.596	9.550	8.839	8.311	0.046	0.711	0.528	1.239	0.757
111	30034	5.690	5.643	5.391	5.177	0.047	0.252	0.214	0.466	0.299
112	30210	5.711	5.539	5.352	5.224	0.172	0.187	0.128	0.315	0.359
113	30311	7.707	7.807	7.252	6.777	-0.100	0.555	0.475	1.030	0.455
114	30355	9.378	9.265	8.524	7.974	0.112	0.741	0.550	1.291	0.854
115		10.242	9.891	9.051	8.387	0.351	0.840	0.664	1.504	1.191
116	30505	10.150	9.822	8.978	8.337	0.328	0.844	0.641	1.485	1.172
117		11.268	10.568	9.495	8.668	0.700	1.073	0.827	1.900	1.773

118	30589	8.258	8.312	7.730	7.262	-0.054	0.582	0.468	1.050	0.528
119	30676	7.582	7.675	7.109	6.631	-0.093	0.566	0.478	1.044	0.473
120	30712	8.604	8.471	7.733	7.159	0.133	0.738	0.574	1.312	0.871
121	30738	7.668	7.786	7.281	6.870	-0.119	0.505	0.411	0.916	0.387
122	30810	7.180	7.282	6.750	6.296	-0.103	0.532	0.454	0.986	0.430
123	30780	5.399	5.300	5.085	4.909	0.099	0.215	0.176	0.391	0.314
124	30869	6.684	6.758	6.267	5.826	-0.074	0.491	0.441	0.932	0.417
125		9.565	9.812	9.294	8.846	-0.247	0.518	0.448	0.966	0.271
126	31236	6.654	6.645	6.345	6.104	0.009	0.300	0.241	0.541	0.309
127	31609	9.788	9.639	8.897	8.313	0.148	0.742	0.584	1.326	0.891
128	31845	7.074	7.200	6.748	6.372	-0.126	0.451	0.376	0.828	0.326
129	32301	4.935	4.782	4.625	4.508	0.152	0.157	0.117	0.274	0.310
130	33254	5.810	5.674	5.432	5.259	0.135	0.242	0.173	0.415	0.378
131/2		6.344	6.248	5.930	5.698	0.096	0.318	0.232	0.550	0.414
131		6.423	6.298	6.028	5.823	0.125	0.270	0.205	0.475	0.395
133		10.125	10.265	9.642	9.114	-0.140	0.623	0.528	1.151	0.483
134		10.696	10.684	10.030	9.509	0.011	0.654	0.521	1.175	0.666
135		10.334	9.899	8.992	8.296	0.435	0.907	0.696	1.603	1.342
136	23805	9.340	8.540	7.411	6.556	0.800	1.129	0.855	1.984	1.929
137	25202	6.187	6.207	5.889	5.603	-0.020	0.317	0.286	0.603	0.298
138		9.478	9.174	8.278	7.610	0.304	0.896	0.668	1.564	1.200
139		9.744	9.759	9.089	8.581	-0.016	0.670	0.508	1.178	0.655
140		9.825	9.698	8.938	8.293	0.126	0.760	0.645	1.405	0.887
141	28052	4.869	4.738	4.500	4.276	0.130	0.238	0.224	0.462	0.369
142	30246	8.971	8.962	8.292	7.752	0.008	0.670	0.540	1.210	0.679
143		8.309	8.423	7.887	7.466	-0.114	0.536	0.421	0.957	0.422
144		9.405	9.568	9.073	8.622	-0.164	0.495	0.451	0.946	0.332
145ab		10.264	0.080	9.296	8.676	0.183	0.784	0.620	1.404	0.968
146	31153	7.666	7.767	7.222	6.775	-0.101	0.545	0.447	0.992	0.444
147		9.586	9.678	9.148	8.677	-0.092	0.530	0.471	1.001	0.438

148		9.435	9.537	8.903	8.358	-0.103	0.634	0.545	1.179	0.532
149		9.062	9.135	8.522	8.002	-0.074	0.613	0.520	1.133	0.540
150		10.313	9.845	8.782	7.925	0.468	1.062	0.857	1.920	1.531
151		11.404	10.844	9.903	9.112	0.560	0.940	0.791	1.732	1.501
152		10.573	10.199	9.230	8.466	0.374	0.968	0.764	1.733	1.343

Таблица Г4. Каталог звезд, отобранных в качестве кандидатов для SETI.

В трех первых колонках таблицы даны обозначения звезд по каталогам HD, CNS3 и Hipparcos, соответственно. В 4-й колонке – спектральный класс по каталогу CNS3; в 5-й – параллакс по данным каталога CNS3, в 6-й – параллакс по каталогу Hipparcos, в 7-й – абсолютная звездная величина по параллаксу из CNS3; в 8-й – значение возраста в миллиардах лет, усредненное по всем использованным каталогам; в 9-й – период осевого вращения в сутках; в 10-м, 11-м, 12-м и 13-м столбцах, соответственно, даны звездная величина V и показатели цвета $W-B$, $B-V$ и $V-R$ по данным Тянь-Шаньского фотометрического каталога. В 14-м столбце дан номер звезды по каталогам ADS или IDS, если имеется указание на кратность этой системы. В 15-м столбце – угловое расстояние между двумя ближайшими компонентами кратной системы, а в 16-м – то же расстояние, выраженное в астрономических единицах.

HD	Name	HIP	Sp	par	par	MV	Age	P	V	W-B	B-V	V-R	Doubl	Sep	Sep
(1)	CNS3	(3)	CNS3	CNS3	HIP	CNS3	(8)	rot	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	"	a.e.
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
123	G1 4.1A	518	G5 V	46.5	49.30	4.77	12.8	–	5.99	0.05	0.69	0.55	A00061AB	1.4	28.40
166	G1 5	544	K0 V e	70.2	72.98	5.37	13.8	–	6.09	0.15	0.76	0.59	–	–	–
3196	G1 23 A	2762	F6 V	61.4	47.51	4.59	5.2	–	5.21	–0.09	0.56	0.47	A00490AB	0.2	4.21
4614	G1 34 A	3821	G3 V	168.4	167.99	4.58	11.2	17	3.44	–0.15	0.59	0.51	A00671AB	11.0	65.48
4676	G1 34.1	3810	F8 V	55.0	41.80	3.77	2.8	–	5.07	–0.13	0.52	0.43	I00437+1624A	77.0	1842.11
4813	G1 37	3909	F7 IV/V	61.8	64.69	4.12	3.9	–	5.17	–0.15	0.51	0.44	–	–	–
7439	G1 54.2A	5799	F5 V	56.8	41.01	3.91	3.3	–	5.15	–0.17	0.44	0.40	A01003A	50.0	1219.21
7924	G1 56.5	6379	dK0	57.0	59.46	5.89	–	35	7.18	0.29	0.85	0.67	–	–	–
9407	G1 59.1	7339	G6 V	53.0	47.65	5.15	–	30	6.53	0.04	0.70	0.55	–	–	–
10307	G1 67	7918	G1.5 V	73.1	79.09	4.27	8.2	–	4.96	–0.05	0.62	0.50	–	–	–
10700	G1 71	8102	G8 Vp	286.0	274.17	5.77	–	33	3.50	0.02	0.73	0.60	I01394–1628A	90.0	328.26
11131	Wo 9061 B	8486	dG1	40.0	43.47	4.78	12.4	–	6.75	–0.07	0.63	0.53	I01447–1111B	184.0	4232.80
13974	G1 92	10644	G0 V e	98.1	92.20	4.83	12.2	13	4.87	–0.14	0.61	0.53	A01739A	65.0	704.99
16673	NN 3175	12444	F8 V	45.0	46.42	4.05	2.5	–	5.79	–0.15	0.51	0.43	–	–	–
16895	G1 107 A	12777	F7 V	79.3	89.03	3.63	3.5	10	4.11	–0.15	0.50	0.42	A02081A	20.0	224.64
20630	G1 137	15457	G5 V e	104.5	109.18	4.92	6.7	–	4.84	0.02	0.67	0.54	I03141+0300A	270.0	2472.98
22484	G1 147	16852	F8 V	59.4	72.89	3.15	6.6	18	4.29	–0.09	0.57	0.47	–	–	–
24496	NN 3255	18267	G5	47.0	48.36	5.17	17.2	29	6.82	0.09	0.74	0.59	–	–	–
25457	G1 159	18859	F6 V	55.2	52.00	4.08	4.3	2	5.38	–0.14	0.51	0.43	–	–	–

25680	Gl	160	19076	G5 V	57.5	59.79	4.70	6.5	-	5.91	-0.04	0.63	0.51	I03594+2144A	170.0	2843.28
25998	Gl	161.1	19335	F7 V	43.0	46.87	3.69	4.1	-	5.54	-0.13	0.52	0.43	-	-	-
32923	Gl	188 A	23835	G4 V	58.8	63.02	4.45	9.9	27	4.93	-0.03	0.65	0.53	A03701AB	0.1	1.59
33564	Gl	196	25110	F6 V	52.9	47.66	3.67	3.0	-	5.10	-0.13	0.47	0.41	A1686A	11.0	230.80
35296	Gl	202	25278	F8 V e	65.2	68.19	4.06	6.4	-	5.00	-0.14	0.53	0.45	I05186+1716A	86.0	1261.18
38858	GJ	1085	27435	G2 V	59.0	64.25	4.82	12.2	23	5.98	-0.08	0.64	0.53	-	-	-
39587	Gl	222 AB	27913	G0 V	103.1	115.43	4.47	7.1	-	4.40	-0.11	0.60	0.49	-	0.6	5.20
40397	NN	3376AB	28267	G0	40.0	43.10	5.00	-	33	7.00	0.06	0.73	0.59	A04557AB	5.0	116.01
43386	Wo	9207	29800	F5 IV/V	43.4	51.00	3.23	3.5	-	5.04	-0.17	0.43	0.37	I06108+1218A	24.0	470.59
43587	Gl	231.1A	29860	F9 V	61.0	51.76	4.63	8.2	20	5.71	-0.07	0.61	0.50	I06120+0508A	190.0	3670.79
50692	Gl	252	33277	G0 V	59.0	57.89	4.59	9.5	15	5.76	-0.13	0.59	0.49	-	-	-
58855	Wo	9234	36439	F6 V	44.0	50.25	3.58	4.4	-	5.37	-0.20	0.46	0.40	I07233+4952A	91.0	1810.95
62613	Gl	290	38784	G8 V	60.5	58.67	5.47	-	28	6.56	0.07	0.73	0.57	-	-	-
64096	Gl	291 A	38382	F9 V	62.7	59.98	4.71	9.3	-	5.16	-0.10	0.60	0.51	A06420AB	0.6	10.00
68146	Gl	297.2A	40035	F7 V	48.8	44.47	3.98	3.3	-	5.53	-0.15	0.48	0.42	I08059-1330A	93.0	2091.30
69897	Gl	303	40843	F6 V	63.8	55.17	4.16	6.9	7	5.13	-0.18	0.47	0.42	-	-	-
71148	Gl	307.1	41484	G5 V	50.0	45.89	4.81	10.9	21	6.34	-0.03	0.63	0.51	-	-	-
72905	Gl	311	42438	G1 V	72.2	70.07	4.93	12.6	5	5.65	-0.10	0.62	0.51	-	-	-
78366	Gl	334.2	44897	F9 V	52.0	52.25	4.51	6.5	-	5.96	-0.09	0.59	0.48	-	-	-
79028	Gl	337.1	45333	F9 V	56.0	51.12	3.87	5.5	-	5.20	-0.05	0.60	0.50	-	-	-
89125	Gl	387 A	50384	F8 Vbw	60.8	44.01	4.74	7.0	-	5.81	-0.20	0.51	0.44	A07712AB	7.6	172.69
89269	NN	3593	50505	G5 V	46.0	48.45	4.96	-	24	6.67	-0.03	0.68	0.54	I10127+4433A	151.0	3116.62
90839	Gl	395	-	F8 V	78.0	77.82	4.30	4.5	11	4.83	-0.17	0.53	0.45	-	-	-
95128	Gl	407	53721	G0 V	71.9	71.04	4.33	10.2	23	5.04	-0.06	0.62	0.51	-	-	-
97334	Gl	417	54745	G0 V	44.0	46.04	4.63	7.7	-	6.42	-0.05	0.62	0.50	I11071+3621A	86.0	1867.94
100180	NN	3669 A	56242	G0 V	41.0	43.42	4.26	8.1	-	6.27	-0.10	0.58	0.48	A08196A	15.0	345.46
101501	Gl	434	56997	G8 V e	116.0	104.81	5.65	-	15	5.30	0.09	0.74	0.57	I11357+3446A	159.0	1517.03
108799	Gl	469.2A	60994	G0 V	47.4	40.03	4.84	8.6	-	6.38	-0.12	0.59	0.52	A08573AB	1.5	37.47
109358	Gl	475	61317	G0 V	114.7	119.46	4.57	11.9	-	4.25	-0.13	0.60	0.49	-	-	-
111395	Gl	486.1	62523	G7 V	60.0	58.23	5.20	13.3	15	6.29	0.08	0.71	0.56	-	-	-
114378	Gl	501 A	64241	F5 V	51.7	69.81	3.55	2.8	-	4.33	-0.20	0.46	0.39	A08804AB	0.5	7.16
114710	Gl	502	64394	G0 V	119.8	109.23	4.65	5.8	12	4.24	-0.10	0.58	0.47	I13072+2823A	91.0	833.10
116442	NN	3781 A	65352	G5 V	49.0	62.41	5.51	-	37	7.07	0.15	0.80	0.65	A08883A	26.5	424.61
116443	NN	3782 B	65355	G5 V	49.0	59.56	5.81	-	42	7.36	0.29	0.85	0.70	A08883B	25.5	428.14
117176	Gl	512.1	65721	G2.5 Va	112.0	55.22	5.23	7.4	32	4.97	0.07	0.73	0.57	I13236+1419A	286.0	5179.28
124292	NN	3830	69414	K1	51.0	44.89	5.57	-	34	7.06	0.10	0.73	0.60	-	-	-

126053	G1	547		70319	G1	V	57.9	56.82	5.08	14.4	23	6.27	-0.11	0.64	0.53	-	-	-
126660	G1	549	A	70497	F7	V	81.0	68.63	3.60	3.5	-	4.04	-0.13	0.51	0.42	I14218+5219A	68.0	990.82
128642	NN	3859		70857	G5		54.0	51.04	5.57	10.0	-	6.89	0.12	0.77	0.61	-	-	-
130948	G1	564		72567	G2	V	69.7	55.73	5.07	10.5	6	5.89	-0.12	0.60	0.49	-	-	-
132254	NN	3880		73100	F8	V	41.0	40.25	3.69	2.8	-	5.64	-0.11	0.52	0.43	-	-	-
133640	G1	575	A	73695	F9	V n	85.1	78.39	4.84	15.4	-	4.74	-0.07	0.67	0.55	A09494AB	0.7	8.93
137107	G1	584	A	75312	G2	V	59.6	53.70	4.50	10.2	-	5.00	-0.12	0.57	0.46	A09617AB	0.5	9.31
137763	G1	586	A	75718	K2	V	61.8	50.34	5.87		39	6.90	0.27	0.83	0.65	I15228-0900A	52.0	1032.98
140538	G1	596.1A		77034	G5	V	50.6	68.16	4.38		24	5.87	0.02	0.69	0.55	A09763AB	4.0	58.69
145958	G1	615.1A		79492	G8	V	51.8	41.05	5.93		36	6.67	0.16	0.78	0.60	A09969AB	5.0	121.80
146361	G1	615.2A		79607	F8	V	44.4	46.11	3.88	6.7	-	5.18	-0.12	0.57	0.50	A09979AB	6.0	130.12
146233	G1	616		79672	G1	V	65.1	71.30	4.56	8.3	24	5.50	-0.03	0.65	0.52	I16102-0806A	26.0	364.66
149661	G1	631		81300	K0	V e	95.1	102.27	5.64		20	5.77	0.30	0.84	0.65	I16310-0207A	99.0	968.03
153597	G1	648		82860	F6	V	59.0	66.28	3.74	5.0	-	4.89	-0.18	0.49	0.43	-	-	-
154417	G1	654.1		83601	F9	V	51.0	49.06	4.54	4.3	8	6.02	-0.13	0.59	0.47	-	-	-
159062	NN	4010		85653	G5		50.0	44.77	5.70		36	7.23	0.07	0.75	0.60	-	-	-
160269	G1	684	A	86036	G0	Va	67.9	70.98	4.50	11.5	-	5.23	-0.08	0.61	0.53	A10660AB	0.6	8.45
162003	G1	694.1A		86614	F5	IV/V	54.9	45.38	3.28	4.0	-	4.58	-0.13	0.44	0.39	A10759A	30.0	661.08
162004	G1	694.1B		86620	F8	V	54.9	44.80	4.49	5.7	-	5.79	-0.14	0.52	0.44	A10759B	30.0	669.64
165908	G1	704	A	88745	F7	V	59.2	63.88	3.95	10.7	9	5.06	-0.21	0.53	0.47	A11077AB	1.5	23.48
168151	G1	708.1		89348	F5	V	50.3	42.56	3.54	3.0	-	5.00	-0.20	0.44	0.39	-	-	-
170153	G1	713	AB	89937	F7	V	132.6	124.11	4.18	8.8	-	3.56	-0.22	0.53	0.46	I18229+7241A	150.0	1208.61
176051	G1	738	A	93017	F9	V	56.5	66.76	4.10	10.0	-	5.22	-0.11	0.60	0.51	A11871AB	0.7	10.49
185144	G1	764		96100	K0	V	178.2	173.41	5.93		34	4.68	0.17	0.81	0.64	I19325+6929A	315.0	1816.50
186408	G1	765.1A		96895	G2	V	43.0	46.25	4.13	10.4	27	5.99	-0.00	0.66	0.52	A12815A	39.0	843.24
186427	G1	765.1B		96901	G5	V	43.0	46.70	4.37	9.9	29	6.24	0.01	0.67	0.53	A12815B	39.0	835.12
187013	G1	767.1A		97295	F5	IV/V	44.4	47.94	3.23	2.7	-	5.01	-0.14	0.46	0.41	A12913A	25.8	538.17
190406	G1	779		98819	G1	V	60.2	56.60	4.70	8.8	15	5.80	-0.07	0.61	0.48	I19596+1648A	60.0	1060.07
193664	G1	788		100017	G5	V	72.9	56.92	5.24	7.9	-	5.93	-0.13	0.60	0.50	-	-	-
195987	G1	793.1		101382	G9	V	51.1	44.99	5.63	5.8	39	7.08	0.15	0.80	0.68	-	-	-
197076	G1	797	A	102040	G5	V	49.8	47.65	4.94	11.4	19	6.44	-0.08	0.63	0.51	I20362+1934A	94.0	1972.72
206860	G1	836.7		107350	G0	V	66.1	54.37	5.04	10.0	-	5.98	-0.13	0.59	0.49	-	-	-
215648	G1	872	A	112447	F6	IV/V	50.0	61.54	2.68	4.4	10	4.21	-0.15	0.50	0.43	A16261AB	12.0	195.00
219623	NN	4324		114924	F7	V	51.0	49.31	4.08	5.1	-	5.59	-0.13	0.55	0.45	I23121+5241A	130.0	2636.38
222143	NN	4351		116613	G5		48.0	43.26	4.99	5.8	-	6.59	-0.02	0.65	0.52	-	-	-
222368	G1	904		116771	F7	V	72.5	72.51	3.43	4.4	-	4.13	-0.13	0.51	0.43	I23348+0505A	70.0	965.38

Приложение Д (справочное)

О программе вычисления спектрального пропускания атмосферы Земли.

МОДЕЛЬ ЧИСТОЙ АТМОСФЕРЫ.

Чтобы построить модель, описывающую пропускание света земной атмосферой в области 3000–9000 Å, необходимо задаться моделями высотного распределения температуры и высотных распределений концентрации кислорода, озона и водяного пара. Все эти параметры изменяются со временем, и во время астрофотометрических измерений различаются как от ночи к ночи, так и от сезона к сезону. Содержащиеся в многочисленных справочниках модели стандартных атмосфер, а также так называемые справочные модели, не учитывают в достаточной мере реальную пространственно-временную изменчивость атмосферных параметров. Поэтому нами были использованы статистические модели высотного распределения температуры, влажности воздуха и содержания озона.

Принятая нами модель чистой (т.е. без учета аэрозолей) атмосферы приведена в Таблице Д1.

При построении модели вся атмосфера от уровня моря до высоты 90 км была разбита на 62 слоя. Влиянием на оптические свойства атмосферы, слоев расположенных выше уровня 90 км, мы пренебрегали. Для 44 нижних слоев (до высоты примерно 31 км) данные о температуре, плотности и содержании озона водяного пара, основанные на результатах обширных радиозондовых наблюдений, были взяты из таблиц монографии Зуева и Комарова [1986], относящихся к умеренной климатической зоне Земли, отдельно для летнего и зимнего сезонов. Для высот выше 31 км (слои 45..62) высотное распределение температуры принято

согласно данным из справочника «Астрофизические величины» Аллена [1977].

Содержание водяного пара на высотах свыше 16 км исчезающе мало, поэтому для слоев 45..62 оно было принято равным нулю. Содержание озона на высотах свыше 31 км убывает и сходит к нулю для высоты около 60 км (53 слой). Для слоев 45..52 данные о содержании озона из монографии Зуева и Комарова [1986] были проэкстраполированы, ориентируясь на данные для соответствующих высот, приведенные в монографии Хргиана [1973, таблица 29].

Взятые непосредственно из рассмотренных источников, либо проинтерполированные значения атмосферных параметров для принятых границ слоев для летнего и зимнего сезонов, соответственно, приведены в таблицах Д1а и Д1б.

РАСЧЕТ ОСЛАБЛЕНИЯ СВЕТА.

Расчет ослабления света земной атмосферой в визуальной области за счет всех ее газовых составляющих, вносящих существенный вклад в этой области спектра, проводился для набора 50-ангстремных интервалов длин волн от 3025 до 9975 Å с шагом 50 Å. Интегрирование по длине пути света в атмосфере заменялось суммированием по слоям. Каждый слой с номером l ($l = 1, 2, \dots, 62$) характеризовался положением его верхней и нижней границ (т.е. значениями давлений $P_{\min}$ и $P_{\max}$ или высот $h_{\max}$ и $h_{\min}$ соответственно), его толщиной и средними значениями давления, температуры, общего содержания озона и общего количества водяного пара. Для луча света, приходящего к наблюдателю с видимого зенитного расстояния z , необходимо для каждого слоя вычислить угол падения $\zeta(l)$ между направлением падения и нормалью к данному слою. Этот угол вычисляется по формуле (Д.1)

$$\sec \zeta(l) = \sqrt{1 - \left(\frac{R_0 n_0}{(R_0 + h)n} \right)^2 \times (\sin^2 z - 1)}, \quad (\text{Д.1})$$

где R_0 – радиус Земли, n_0 и n , соответственно, коэффициенты преломления воздуха при $h = 0$ и в слое с номером l .

ОСЛАБЛЕНИЕ ЗА СЧЕТ МОЛЕКУЛЯРНОГО РАССЕЯНИЯ.

Данные в таблицах Д1а и Д1б позволяют для каждого слоя рассчитать поперечное сечение σ молекулярного (релеевского) рассеяния, рассчитанного на одну молекулу. В многочисленных руководствах и монографиях [см., например, Аллен, 1977] приведена формула

$$\sigma = 8\pi^3 \frac{(n^2 - 1)^2}{3\lambda^4 N^2} \times \frac{6 + 3d}{6 - 7d}, \quad (\text{Д.2})$$

где n — показатель преломления воздуха, λ — длина волны света, N — число молекул в 1 см^2 , d — фактор деполяризации (для воздуха $d = 0.035$).

Показатель преломления воздуха вычислялся по формулам, приведенным в справочнике Аллена [1977, стр.180–181]. Согласно этим формулам показатель преломления является функцией длины волны света, а также давления, температуры воздуха и парциального давления водяного пара. Данные, необходимые для расчета, приведены в таблицах Д1а и Д1б настоящего Приложения. Связь парциального давления (упругости) водяного пара e с массовой долей q задается формулой

$$q = 622 \frac{e}{P}, \quad (\text{Д.3})$$

где P — давление воздуха.

Для каждой длины волны λ релеевская составляющая τ_r оптической толщи атмосферы при наблюдениях с нижней границы слоя с номером l_{beg} представляется как

$$\tau_R(\lambda, l_{beg}) = \sum_{l_{beg}}^{62} \sigma(\lambda, l) N(\lambda, T) \Delta h(l) \sec \zeta(l) \quad , \quad (Д.4)$$

где $\Delta h(l) = h(l+1) - h(l)$.

Спектральное пропускание атмосферы, обусловленное релеевским рассеянием, равно

$$p_R(\lambda, l_{beg}) = e^{-\tau_R(\lambda, l_{beg})} \quad . \quad (Д.5)$$

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА АТМОСФЕРНЫМ ОЗОНОМ.

Значения десятичного объемного коэффициента поглощения озона $\alpha(\lambda)$, при стандартной его плотности неоднократно измерялись в лаборатории. Результаты наиболее тщательных измерений, сделанных Вигру [1953] и Инном и Танакой (1959) воспроизведены в монографиях Гущина (1963) и Хргиана (1973). Нами были использованы коэффициенты Вигру и его данные об изменении $\alpha(\lambda)$ с температурой. Данные Вигру как в области полос Гартли и Геггинса, так и области полос Шаппюи представлены для длин волн, в которых значения $\alpha(\lambda)$ имеют локальный экстремум. В большинстве случаев расстояния между соседними минимумом и максимумом $\alpha(\lambda)$ составляют от 2 до 15 Å. При вычислениях мы усредняли значения $\alpha(\lambda)$ в пределах каждого из 50-ангстремных интервалов длин волн и пользовались этим средним. Принятые экспоненциальные значения $2.3026 \times \alpha(\lambda)$ приведены в таблице Д2. Там же приведены значения отношения коэффициентов поглощения озона при разных температурах к коэффициентам при температуре 18°C по Вигру. Для атмосферной толщи, образованной слоями, начиная со слоя с номером l_{beg} оптическая толщина озона составит

$$\tau_{O_3}(\lambda, l_{beg}) = 2.3026 \sum_{l_{beg}}^{62} \alpha(\lambda, l) \frac{\rho_3}{\rho_{30}} \Delta h(l) \sec \zeta(l) \quad (Д.6)$$

где ρ_3 — плотность озона (в мкг/м^3) в текущем слое, пропорциональная числу молекул озона в 1 см^3 , а ρ_{30} — плотность озона при нормальном давлении и температуре ($\rho_{30} = 2.144 \cdot 10^{-9} \text{ мкг/м}^3$). Парциальное давление озона (выражаемое в нанобарах) и плотность озона связаны через уравнение состояния соотношением

$$p_3 = 0.0017322(T + 273.15)\rho_3. \quad (Д.7)$$

Спектральное пропускание атмосферы, обусловленное поглощением озоном, равно

$$p_{O_3}(\lambda, l_{beg}) = e^{-\tau_{O_3}(\lambda, l_{beg})}. \quad (Д.8)$$

ПОГЛОЩЕНИЕ СВЕТА В ПОЛОСАХ КИСЛОРОДА И ВОДЯНОГО ПАРА.

Учет и моделирование поглощения света в насыщенных теллурических линиях и полосах кислорода и водяного пара вызывает особые трудности. Одним из наиболее простых способов, дающих в то же время удовлетворительную точность представления экспериментальных данных, является метод эмпирических параметров. В применении к задаче звездной спектрофотометрии со спектральным разрешением от 25 до 100 Å этот метод подробно рассматривался и применялся Галкиным и Архаровым [1981] и Галкиным [1986]. Для модельного представления спектрального пропускания атмосферы в области теллурических линий кислорода и водяного пара они использовали простое и удобное эмпирическое выражение, предложенное в ряде работ [Голубицкий и Москаленко 1968; Москаленко 1968, 1969]:

$$p(\lambda) = \exp\{-\beta(\lambda)w^{\mu(\lambda)}P^{\nu(\lambda)}\}, \quad (Д.9)$$

где $p(\lambda)$ — спектральное пропускание, w — количество поглощающего вещества, P — давление, $\beta(\lambda)$, $\mu(\lambda)$, $\nu(\lambda)$ — эмпирические параметры. Считается, что это выражение применимо в широком диапазоне давлений и концентраций поглощающего вещества.

В случае водяного пара w — это обычно количество осажденной воды на луче зрения (в сантиметрах или миллиметрах). В случае кислорода w — это давление воздуха в месте наблюдений.

Мы принимали, что w для водяного пара это количество осажденной воды (в миллиметрах), содержащееся в текущем слое; для кислорода w это величина, пропорциональная разности давлений воздуха на границах слоя. Необходимый коэффициент пропорциональности зависит от единиц измерения и учитывается автоматически при вычислении величины $\beta(\lambda)$.

При наблюдениях через полную толщу атмосферы выше уровня, с которого производятся наблюдения, величину P нужно заменить на эффективное давление $P_{\text{эф}}$, отражающее эффективную полуширину теллурической линии. Галкин [1986], проанализировав различные зависимости профилей линий от давления, температуры и от энергии нижнего уровня пришел к выводу, что приемлемыми значениями являются $P_{\text{эф}} = 0.85$ атм для линий водяного пара и $P_{\text{эф}} = 0.5$ атм для линий кислорода. В случае нашей модели, $P \equiv P_{\text{эф}}$ — просто среднее давление в текущем слое. Москаленко [1969] указывает, что для полос водяного пара в рассматриваемом интервале длин волн величина $\nu(\lambda)$ может быть принята постоянной: $\nu(\lambda) = 0.34$. Как следует из данных Галкина [1986, таблица 12], эффективное давление образования теллурических линий кислорода практически линейно связано с давлением воздуха на высоте места наблюдения. Из этого следует, что можно принять для кислорода $\nu(\lambda) = 1.0$.

С этими значениями параметров $\beta(\lambda)$, $\mu(\lambda)$, $\nu(\lambda)$ Галкиным и Архаровым [1981, табл.2] и Галкиным [1986, табл. 16, 17, 20] было вычислено поглощение в полосах водяного пара и кислорода. Из данных в этих таблицах легко получить эмпирические параметры $\beta(\lambda)$, $\mu(\lambda)$, $\nu(\lambda)$ для полос водяного пара и кислорода. В таблицах Галкина и Архарова количество осажденной воды приводится в миллиметрах, а количество кислорода в атмосферных массах для высоты 2000 м над уровнем моря. (Это высота, на которой находилась обсерватория). Следовательно, параметр w в формуле (Д1.9) нужно подставлять в тех же самых единицах. Отметим, что отношение атмосферных масс на высоте 2000 м и на уровне моря относятся как соответствующие давления

$$\frac{M(z=1)_{2000}}{M(z=1)_0} = \frac{P_{2000}}{P_0} = \frac{793}{1013} = 0.785$$

Принятые нами величины $\beta(\lambda)$ и $\mu(\lambda)$ приведены в таблице ДЗ.

Оптическая толща кислорода определяется выражением:

$$\tau_{O_2}(\lambda, l_{beg}) = 2.3026 \sum_{l_{beg}}^{62} [\beta_{O_2}(\lambda) P(\Delta P(l)) \sec \zeta(l)]^{\mu_{O_2}(\lambda)} \quad (Д.10)$$

В этой формуле $\Delta P(l)$ — разность давлений воздуха на верхней и нижней границах текущего слоя, отнесенная к давлению на высоте 2000 м ($P_{2000} = 795$ гПс = 596 мм.рт.ст).

$$\tau_{H_2O}(\lambda, l_{beg}) = \sum_{l_{beg}}^{62} [\beta_{H_2O}(\lambda) P^{0.34}(\Delta w(l)) \sec \zeta(l)]^{\mu_{H_2O}(\lambda)} \quad (Д.11)$$

Спектральное пропускание атмосферы, обусловленное поглощением кислородом вычислялось как

$$p_{O_2}(\lambda, l_{beg}) = e^{-\tau_{O_2}(\lambda, l_{beg})}, \quad (Д.12)$$

а обусловленное поглощением водяным паром

$$p_{H_2O}(\lambda, l_{beg}) = e^{-\tau_{H_2O}(\lambda, l_{beg})}, \quad (Д.13)$$

В методе Мошкалева–Халиуллина поправочная функция $x\lambda^{-n}+y$ определяется после учета модели чистой атмосферы. В эту модель можно добавить фоновое или среднециклическое количество аэрозоля, пользуясь данными из монографии Зуева и Крекова [1986]

Таблица Д1а. Вертикальное распределение температуры (T), влажности (q) и содержания озона (P_3) для летнего сезона умеренных широт.

N	P (гПа)	h (км)	T (°C)	σ_T	P_3 (нб)	σ_{P_3}	q (%.)	σ_q
1	1013.25	0.000	19.400	7.200	21.000	18.300	9.920	3.390
2	1000.00	0.097	18.600	7.100	21.000	18.300	9.920	3.390
3	975.00	0.287	17.100	7.000	22.000	17.800	9.020	3.010
4	950.00	0.488	16.300	6.400	24.800	17.400	8.450	2.850
5	925.00	0.698	15.400	6.600	27.500	16.800	7.870	2.720
6	900.00	0.920	15.000	6.400	29.800	16.000	7.340	2.630
7	875.00	1.160	13.400	6.400	30.800	14.800	6.480	2.570
8	850.00	1.412	12.200	6.400	31.000	14.000	6.370	2.360
9	825.00	1.671	11.000	6.400	31.500	13.600	5.770	2.360
10	800.00	1.938	9.700	6.300	31.900	13.300	5.240	2.240
11	775.00	2.220	8.492	6.025	33.477	12.604	4.743	2.102
12	750.00	2.508	7.200	5.800	34.800	11.900	4.290	1.980
13	729.00	2.753	5.869	5.901	33.983	11.887	3.966	1.939
14	700.00	3.086	3.900	6.100	32.400	11.900	3.550	1.870
15	675.00	3.357	2.231	6.069	32.025	11.356	3.142	1.704
16	650.00	3.631	0.500	6.000	31.900	10.800	2.820	1.520
17	625.00	3.907	-1.356	5.992	31.777	10.644	2.782	1.385
18	600.00	4.198	-3.300	6.000	31.600	10.600	2.770	1.270
19	575.00	4.506	-5.223	6.005	31.158	10.557	2.437	1.174
20	550.00	4.827	-7.281	6.023	30.607	10.492	2.070	1.086
21	525.00	5.164	-9.473	6.055	29.952	10.406	1.672	1.004
22	500.00	5.517	-11.800	6.100	29.200	10.300	1.240	0.930
23	475.00	5.888	-14.405	6.214	28.323	9.795	1.017	0.849
24	450.00	6.284	-17.206	6.318	27.481	9.470	0.831	0.768
25	425.00	6.702	-20.205	6.414	26.674	9.309	0.682	0.684
26	400.00	7.142	-23.400	6.500	25.900	9.300	0.570	0.600
27	375.00	7.606	-27.150	6.566	24.928	9.496	0.458	0.497
28	350.00	8.094	-30.867	6.554	24.335	10.288	0.362	0.399
29	325.00	8.598	-34.550	6.466	24.096	11.718	0.283	0.307
30	300.00	9.135	-38.200	6.300	24.200	13.900	0.220	0.220

31	275.00	9.710	-40.933	6.079	24.570	18.732	0.169	0.168
32	250.00	10.327	-44.000	5.500	27.200	24.400	0.127	0.126
33	225.00	11.005	-48.300	4.200	36.000	28.800	0.094	0.093
34	200.00	11.760	-51.300	4.800	42.000	31.500	0.070	0.070
35	175.00	12.614	-53.500	5.600	45.500	30.000	0.045	0.045
36	150.00	13.596	-55.700	7.600	48.000	27.600	0.025	0.025
37	125.00	14.754	-57.604	8.998	53.937	27.509	0.010	0.010
38	100.00	16.208	-58.100	9.300	65.900	28.200	0.000	0.000
39	75.00	18.100	-55.988	7.656	96.264	26.196	0.000	0.000
40	50.00	20.747	-51.900	5.300	133.600	20.000	0.000	0.000
41	40.00	22.173	-49.980	4.383	142.210	19.240	0.000	0.000
42	30.00	24.023	-47.400	3.700	141.700	17.800	0.000	0.000
43	20.00	26.655	-43.600	3.600	125.600	14.000	0.000	0.000
44	10.00	31.261	-36.900	4.500	75.600	11.400	0.000	0.000
45	7.50	33.260	-31.700	5.000	56.300	8.500	0.000	0.000
46	5.00	36.142	-25.500	5.000	37.000	5.600	0.000	0.000
47	3.00	39.878	-17.000	5.000	21.600	3.300	0.000	0.000
48	2.00	42.966	-10.000	5.000	13.900	2.500	0.000	0.000
49	1.00	48.360	0.000	5.000	6.200	1.200	0.000	0.000
50	0.75	50.650	0.000	5.000	4.200	1.000	0.000	0.000
51	0.50	53.896	-8.500	5.000	2.300	0.900	0.000	0.000
52	0.30	57.913	-20.600	5.000	0.800	0.790	0.000	0.000
53	0.20	60.996	-29.800	5.000	0.010	0.000	0.000	0.000
54	0.10	65.887	-44.100	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
55	0.05	70.452	-58.400	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
56	0.03	73.614	-68.400	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
57	0.02	76.036	-76.400	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
58	0.01	80.000	-90.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
59	0.005	83.851	-90.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.002	88.697	-90.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
61	0.0015	90.172	-90.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000
62	0.0002	100.975	-90.000	5.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Таблица Д16.

Вертикальное распределение температуры, влажности и содержания озона для зимнего сезона умеренных широт.

N	$P(\text{гПа})$	$H(\text{км})$	$T(^{\circ}\text{C})$	σ_T	$P_3(\text{нб})$	σ_{P_3}	$q(\%)$	σ_q
1	1013.25	0.000	-1.400	5.400	19.500	11.100	3.730	2.950
2	1000.00	0.097	-1.500	14.900	19.500	11.100	3.730	2.950
3	975.00	0.287	-1.700	13.800	19.700	10.500	3.280	2.620
4	950.00	0.488	-2.000	13.000	19.900	10.200	3.230	2.390
5	925.00	0.698	-2.700	12.000	20.000	9.900	3.030	2.190
6	900.00	0.920	-3.000	11.600	20.500	9.500	2.830	2.020
7	875.00	1.160	-3.400	11.100	20.900	9.000	2.660	1.880
8	850.00	1.412	-3.900	10.700	22.000	8.800	2.460	1.740
9	825.00	1.671	-4.900	10.600	23.500	8.600	2.230	1.550
10	800.00	1.938	-5.900	10.200	25.600	8.500	1.890	1.420
11	775.00	2.220	-6.881	10.117	25.711	8.653	1.751	1.316
12	750.00	2.508	-7.900	10.100	25.100	8.700	1.690	1.230
13	729.00	2.753	-8.781	9.896	25.235	8.206	1.607	1.175
14	700.00	3.086	-10.200	9.600	25.300	7.500	1.470	1.090
15	675.00	3.357	-11.831	9.493	24.686	7.404	1.298	0.962
16	650.00	3.631	-13.600	9.400	24.000	7.500	1.120	0.830
17	625.00	3.907	-15.267	9.196	23.744	7.663	0.977	0.736
18	600.00	4.198	-17.000	9.000	23.500	7.900	0.850	0.660
19	575.00	4.506	-18.897	8.974	22.832	8.159	0.729	0.606
20	550.00	4.827	-20.929	8.964	22.140	8.448	0.618	0.556
21	525.00	5.164	-23.097	8.974	21.429	8.762	0.519	0.511
22	500.00	5.517	-25.400	9.000	20.700	9.100	0.430	0.470
23	475.00	5.888	-27.816	8.993	20.065	9.384	0.358	0.408
24	450.00	6.284	-30.388	8.907	19.611	9.771	0.296	0.347
25	425.00	6.702	-33.116	8.743	19.325	10.272	0.243	0.288
26	400.00	7.142	-36.000	8.500	19.200	10.900	0.200	0.230
27	375.00	7.606	-39.481	7.962	18.828	11.622	0.165	0.187
28	350.00	8.094	-42.875	7.367	19.135	12.754	0.134	0.149
29	325.00	8.598	-46.181	6.712	20.154	14.418	0.110	0.117
30	300.00	9.135	-49.400	6.000	22.000	16.800	0.090	0.090
31	275.00	9.710	-51.838	5.265	26.625	21.633	0.071	0.070

32	250.00	10.327	-54.000	4.800	33.400	27.500	0.055	0.053
33	225.00	11.005	-56.000	5.000	42.000	31.500	0.041	0.040
34	200.00	11.760	-57.200	5.700	52.800	39.300	0.030	0.030
35	175.00	12.614	-56.700	5.800	62.000	44.000	0.020	0.020
36	150.00	13.596	-57.500	5.300	72.500	49.100	0.011	0.011
37	125.00	14.754	-58.906	6.021	82.271	52.909	0.005	0.005
38	100.00	16.208	-60.000	6.900	95.400	54.400	0.000	0.000
39	75.00	18.100	-60.015	6.661	126.800	52.580	0.000	0.000
40	50.00	20.747	-58.800	6.300	157.100	39.300	0.000	0.000
41	40.00	22.173	-57.928	6.279	162.890	30.250	0.000	0.000
42	30.00	24.023	-56.600	6.400	153.900	22.100	0.000	0.000
43	20.00	26.655	-54.500	6.800	120.800	18.100	0.000	0.000
44	10.00	31.261	-43.300	8.100	64.200	16.800	0.000	0.000
45	7.50	33.260	-33.500	7.000	47.800	12.500	0.000	0.000
46	5.00	36.142	-31.700	7.000	31.400	8.200	0.000	0.000
47	3.00	39.878	-23.500	7.000	18.300	4.800	0.000	0.000
48	2.00	42.966	-16.200	7.000	11.800	4.000	0.000	0.000
49	1.00	48.360	0.000	7.000	5.200	3.300	0.000	0.000
50	0.75	50.650	0.000	7.000	3.600	2.500	0.000	0.000
51	0.50	53.896	-8.500	7.000	2.000	1.990	0.000	0.000
52	0.30	57.913	-20.600	7.000	0.600	0.590	0.000	0.000
53	0.20	60.996	-29.800	7.000	0.010	0.000	0.000	0.000
54	0.10	65.887	-44.100	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
55	0.05	70.452	-58.400	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
56	0.03	73.614	-68.400	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
57	0.02	76.036	-76.400	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
58	0.01	80.000	-90.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
59	0.005	83.851	-90.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60	0.002	88.697	-90.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
61	0.0015	90.172	-90.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000
62	0.0002	100.975	-90.000	7.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Таблица Д2.
 Объемные (экспоненциальные) показатели $\alpha(\lambda)$ поглощения озона
 Полосы Геггинса

$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)18^\circ\text{C}$	-92/+18	-75/+18	-59/+18	-44/+18	-30/+18
3025	7.3540	0.897	0.905	0.903	0.920	0.947
3075	3.8250	0.890	0.894	0.893	0.912	0.929
3125	1.9880	0.831	0.828	0.831	0.865	0.884
3175	1.0400	0.824	0.819	0.815	0.835	0.869
3225	0.5430	0.766	0.774	0.775	0.794	0.835
3275	0.2760	0.664	0.693	0.696	0.724	0.780
3325	0.1560	0.721	0.737	0.736	0.757	0.799
3375	0.0687	0.782	0.815	0.800	0.830	0.843
3425	0.0243	0.86	0.86	0.86	0.86	0.89
3475	0.0182	0.86	0.86	0.86	0.86	0.89
3520	0.0000	—	—	—	—	—

Полосы Шапнюи

$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$ 18°C	–92/ 18	$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$ 18°C	–92/ 18	$\lambda(\text{\AA})$	$\alpha(\lambda)$ 18°C	–92/ 18
4425	0.0000	1.00	5525	0.0878	1.00	6625	0.0541	0.99
4475	0.0022	1.00	5575	0.0964	1.01	6675	0.0500	0.99
4525	0.0045	0.97	5625	0.1116	1.01	6725	0.0439	0.99
4575	0.0074	0.97	5675	0.122	1.01	6775	0.0389	0.99
4625	0.0106	0.97	5725	0.1263	1.01	6825	0.0349	0.99
4675	0.0106	0.97	5775	0.1268	1.01	6875	0.0319	0.99
4725	0.0120	0.97	5825	0.1195	1.01	6925	0.0289	0.99
4775	0.0162	0.97	5875	0.1171	1.01	6975	0.0260	0.99
4825	0.0224	0.97	5925	0.1203	1.01	7025	0.0235	0.99
4875	0.0220	0.97	5975	0.1290	1.01	7075	0.0218	0.99
4925	0.0231	0.98	6025	0.1347	1.01	7125	0.0207	0.99
4975	0.0275	0.99	6075	0.1284	1.01	7175	0.0193	0.99
5025	0.0391	1.00	6125	0.1178	1.00	7225	0.0168	0.99
5075	0.0446	0.99	6175	0.1088	1.00	7275	0.0150	0.99
5125	0.0421	0.99	6225	0.1009	1.00	7325	0.0135	0.99
5175	0.0452	0.99	6275	0.0946	1.00	7375	0.0114	0.99
5225	0.0520	1.00	6325	0.0884	1.00	7425	0.0093	0.99
5275	0.0635	1.00	6375	0.0817	0.99	7475	0.0071	0.99
5325	0.0727	1.00	6425	0.0753	0.99	7525	0.0040	0.99
5375	0.0753	1.00	6475	0.0685	0.99	7575	0.0020	0.99
5425	0.0806	1.00	6525	0.0636	0.99	7625	0.0010	0.99
5475	0.0841	1.00	6575	0.0588	0.99	7675	0.0000	0.99

Таблица ДЗ.

Эмпирические параметры для поглощения в теллурических полосах.

1) Кислород

λ	β_{O_2}	μ_{O_2}	λ	β_{O_2}	μ_{O_2}
6275	0.0151	0.699	7575	0.1557	0.323
6325	0.0036	0.937	7625	0.8510	0.650
-----			7675	0.1000	0.527
6875	0.1403	0.524	7725	0.0006	0.555
6925	0.0362	0.633			

2) Водяной пар

λ	β_{O_2}	μ_{O_2}	λ	β_{O_2}	μ_{O_2}
5875	0.0007	1.000	8325	0.0072	0.850
5925	0.0015	1.000	8375	0.0036	0.910
5975	0.0007	1.000	8425	0.0016	0.970
-----			8475	0.0008	1.000
6475	0.0009	1.000	-----		
6525	0.0010	1.000	8775	0.0010	1.000
6575	0.0003	1.000	8825	0.0020	0.980
-----			8875	0.0036	0.940
6925	0.0015	1.000	8925	0.0078	0.895
6975	0.0020	1.000	8975	0.0156	0.850
7025	0.0022	1.000	9025	0.0262	0.810
7075	0.0031	0.955	9075	0.0360	0.770
7125	0.0062	0.865	9125	0.0455	0.730
7175	0.0135	0.780	9175	0.0507	0.685
7225	0.0182	0.740	9225	0.0492	0.640
7275	0.0151	0.785	9275	0.0830	0.600
7325	0.0086	0.870	9325	0.1585	0.570
7375	0.0034	0.955	9375	0.1850	0.570
7425	0.0010	1.000	9425	0.1570	0.595
7475	0.0000	1.000	9475	0.1358	0.625
7525	0.0040	1.000	9525	0.1173	0.655
7575	0.0020	1.000	9575	0.0940	0.685
7625	0.0010	1.001	9625	0.0687	0.715
-----			9675	0.0444	0.745
7975	0.0005	1.000	9725	0.0285	0.775
8025	0.0016	0.960	9775	0.0216	0.805
8075	0.0036	0.885	9825	0.0164	0.835
8125	0.0089	0.810	9875	0.0106	0.865
8175	0.0162	0.735	9925	0.0068	0.895
8225	0.0172	0.730	9975	0.0037	0.925
8275	0.0119	0.790			

Приложение Е (Справочное)

Расчет предельных звездных величин

Расчет предельных величин звезд различных спектральных классов, наблюдаемых в различных полосах фотометрической системы «Лира-Б», проводился следующим образом. Для 108 спектров из атласа Пиклса [1998] энергетические распределения энергии в спектрах $E(\lambda)$ были переведены в фотонные $N(\lambda)$ по формуле:

$$N(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{hc/\lambda} \bigg/ \frac{E(\lambda_{550})}{hc/\lambda_{550}} \times N_{Vega}(\lambda_{550}) \times \Delta\lambda \times S \times 1,028016$$

где:

λ – длина волны в Å;

$E(\lambda)$ – кривые из атласа Пиклса, представленные с шагом 5 Å;

$E(\lambda_{550})$ – значение на соответствующей кривой из атласа Пиклса для длины волны 550 Å;

$N_{Vega}(\lambda_{550})$ – количество фотонов, приходящее от Веги на верхней границе земной атмосферы в секунду на 1 кв. см. на 1 Å; это значение равно 1160 фотонов / (с см² Å), что соответствует энергетическому потоку $E_{Vega}(\lambda_{550}) = 4,65 \times 10^{-9}$ эрг / (с см² Å) [Хейес, 1985];

$\Delta\lambda$ – ширина шага в таблицах атласа Пиклса; $\Delta\lambda = 5$ Å;

S – площадь рабочей части главного зеркала телескопа «Лира-Б»;

1,028016 – коэффициент перевода фотонного потока от Веги на звезду нулевой звездной величины в фотометрической полосе V (звездная величина Веги принята равной $V_{Vega} = 0^m,03$).

Далее, кривые спектральной плотности фотонных потоков были свернуты с кривыми квантовой эффективности фильтров фотометрической системы «Лира-Б», и при этом были учтены потери на отражение

от двух алюминированных зеркал телескопа [Аллен, 1977] и на пропускание кварцевого линзового корректора. В результате для каждого из 108 спектров Пиклса было вычислено ожидаемое количество электронов, генерируемых за одну секунду в пикселе ПЗС для всех полос системы. Суммарное время экспозиции при прохождении изображения звезды в режиме ВЗН через каждую матрицу в фокальной плоскости телескопа «Лира-Б» практически будет равно одной секунде.

Теперь нужно учесть то, что изображение звезды занимает площадь более чем один пиксель. Выполненные расчеты оптической системы телескопа «Лира-Б» [Цуканова и Бахолдин, 2012] показали, что в соответствии с техническим заданием:

в кружке диаметром 1 пиксель ($D=0,0125$ мм; $S=0.0001227$ мм²) собирается

на оптической оси	52% света,
на расстоянии 0,30 градуса от опт. оси	52%,
на расстоянии 0,45 градуса от опт. оси	30%,
на расстоянии 0,5118 градуса от опт. оси	19%,
на расстоянии 1 градус от опт. оси	8%;

в кружке диаметром 5 пикселей ($D=0,0625$ мм; $S=0.0030680$ мм²) собирается

на оптической оси	100% света,
на расстоянии 0,30 градуса от опт. оси	100%,
на расстоянии 0,45 градуса от опт. оси	100%,
на расстоянии 0,5118 градуса от опт. оси	98%,
на расстоянии 1 градус от опт. оси	96%.

Для вывода необходимого уравнения введем следующие обозначения.

Для каждого спектра из атласа Пиклса и каждой фотометрической полосы обозначим

ns_0 — полезный сигнал (число электронов) от полного изображения звезды накопленный за 1 секунду от звезды нулевой величины;

ns — полезный сигнал (число электронов, накопленное за N измерений), соответствующий заданному значению отношения сигнала к шуму;

N — число измерений;

k — число пикселей, занимаемых звездой;

nt — темновой сигнал (число электронов) в пикселе в одном измерении;

nb — сигнал от фона неба в пикселе в одном измерении;
 $nb = ne \times 0,64$, где ne — число электронов от фона неба с квадратной секунды ($0,64 = 0,8 \times 0,8$ это площадь пикселя со стороной 0,8 угловой секунды);

nr — шум однократного считывания, принимаемый равным 7 электронам с одного пикселя;

$N \times k \times nr \times nr$ — сигнал, эквивалентный шуму считывания из k пикселей, занимаемых звездой, в N измерениях (кв. корень из него равен шуму N -кратного считывания из k пикселей);

$\sqrt{N \times ns}$ — квантовый шум полезного сигнала;

$\sqrt{N \times nt}$ — квантовый шум темнового сигнала;

$\sqrt{N \times nb}$ — квантовый шум сигнала от фона неба;

Полный шум будет складываться из квантовых шумов полезного сигнала, темнового сигнала, сигнала от фона неба и сигнала, эквивалентного шуму считывания: $\sqrt{ns + N \times k \times (nt + nb + nr^2)}$

Запишем отношение полезного сигнала к шуму Ψ :

$$\Psi = \frac{ns}{\sqrt{ns + N \times k \times (nt + nb + nr^2)}}$$

После возведения обеих частей этого уравнения в квадрат, умножим обе части уравнения на знаменатель правой части и перенесем все члены в левую часть. Получим:

$$ns^2 - \Psi^2 \times ns - \Psi^2 \left(N \times k \times (nt + nb + nr^2) \right) = 0$$

Решаем это приведенное квадратное уравнение относительно ns .

$$ns = \frac{\Psi^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\Psi^2}{2} \right)^2 + \Psi^2 \left(N \times k \times (nt + nb + nr^2) \right)}$$

После этого предельная величина вычисляется как

$$mag_{\lim} = -2,5 \lg \left(\frac{ns}{N \times ns_0} \right)$$

При расчетах фон неба принимался следующим образом.

В документации на проект Gaia есть такие сведения (ESA, 2000):

«Для анализа основной астрометрической точности средняя яркость неба была принята равной $V = 21.0 \text{ mag arcsec}^{-1}$, с солнечным спектральным распределением ($V - I = 0.7$). Это эквивалентно величине GAIA $G = 21.1 \text{ mag arcsec}^{-1}$. Для большинства областей на небе это предположение является слишком консервативным. Фон неба, измеренный с HST в высоких эклиптических широтах равен в лучах $V = 23.3 \text{ mag arcsec}^{-1}$, а в лучах $I = 22.0 \text{ mag arcsec}^{-1}$. (Windhorst et al. 1994), что эквивалентно $G = 23.3 \text{ mag arcsec}^{-1}$. На эклиптике (но далее, чем в 60 градусах от Солнца) фон неба на 1-2 величины ярче, из-за наличия зодиакального света (HST/WFPC2 Instrument Handbook).

Однако большинство областей на небе значительно темнее, и точная оценка для фотометрии и измерения лучевых скоростей должна основываться на более реалистичной (более слабой) яркости неба порядка $V = 22.5 \text{ mag arcsec}^{-1}$.»

Основываясь на этой оценке, мы приняли, что в качестве фона неба в данном фильтре следует принять электронный поток от спектра G2V звезды нулевой величины, уменьшенный:

для высоких эклиптических широт	в 10^9 раз,
для плоскости эклиптики	в 10^8 раз.

Это составляет электронные потоки (количество фотонов, приходящее за одну секунду времени с площадки на небесной сфере площадью в одну квадратную секунду дуги):

полоса	полюс эклиптики	плоскость эклиптики
“195”	0.0001347768	0.001347768
“218”	0.0009827826	0.009827826
“270”	0.0141868	0.141868
“350”	0.1143328	1.143328
“370”	0.1413541	1.413541
“440”	0.7429355	7.429355
“550”	0.4270355	4.270355
“700”	0.2760261	2.760261
“785”	0.6595693	6.595693
“825”	0.6385689	6.385689
“930”	0.7419788	7.419788
“1050”	0.8480023	8.480023
“панхром”	4.989816	49.89816

Ниже помещены подробные таблицы предельных величин. Подчеркнем, что в таблицах приведены V величины, а не величины в соответствующем фильтре.

В таблице 13 колонок. В первой колонке наименование спектрального класса и класса светимости, как они даны в таблицах Пиклса [1998]. Далее идут четыре группы по три колонки в каждой. Каждая

группа из трех колонок относится к соответствующему фильтру : “195”, “218” и так далее. В первой колонке каждой группы — предельные величины для звезд соответствующего спектрального типа для случая одного измерения с отношением сигнала к шуму, равным 100. Во второй колонке — для одного измерения с отношением сигнала к шуму, равным 10, что численно равно предельной величине для 100 измерений с отношением сигнала к шуму, равным 100, и в третьей колонке — для 100 измерений с отношением сигнала к шуму, равным 10.

Pickles Sp	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100
spectrum	m195	m195	m195	m218	m218	m218	m270	m270	m270	m350	m350	m350
o5v	9.8	14.5	17.6	9.6	14.2	17.4	11.6	16.2	19.4	12.0	16.7	19.8
o8iii	10.5	15.1	18.3	10.4	15.0	18.2	11.8	16.5	19.6	12.0	16.6	19.8
o9v	11.3	16.0	19.1	11.7	16.4	19.5	12.0	16.7	19.8	11.9	16.6	19.7
b0i	10.6	15.3	18.4	11.1	15.7	18.9	11.8	16.4	19.6	11.8	16.4	19.6
b0v	11.3	16.0	19.1	11.8	16.5	19.6	12.0	16.7	19.8	11.9	16.5	19.7
b1i	10.4	15.0	18.2	11.1	15.7	18.9	11.7	16.4	19.5	11.7	16.3	19.5
b12iii	10.7	15.3	18.5	11.2	15.8	19.0	11.7	16.4	19.5	11.7	16.4	19.5
b1v	10.9	15.6	18.7	11.4	16.1	19.2	11.7	16.4	19.6	11.7	16.4	19.5
b2ii	9.8	14.5	17.6	10.1	14.8	17.9	11.4	16.0	19.2	11.6	16.3	19.4
b2iv	10.8	15.5	18.6	11.4	16.1	19.2	11.8	16.5	19.6	11.7	16.4	19.5
b3i	9.7	14.3	17.5	10.6	15.3	18.4	11.3	15.9	19.1	11.5	16.1	19.3
b3iii	10.2	14.8	18.0	10.8	15.4	18.6	11.2	15.9	19.0	11.4	16.0	19.2
b3v	10.4	15.0	18.2	10.9	15.6	18.7	11.2	15.9	19.0	11.3	16.0	19.2
b5i	9.5	14.2	17.3	10.1	14.8	17.9	10.9	15.6	18.7	11.3	16.0	19.1
b5ii	9.5	14.2	17.3	9.9	14.6	17.7	10.9	15.6	18.7	11.3	16.0	19.1
b5iii	9.8	14.5	17.6	10.3	15.0	18.1	10.8	15.5	18.6	11.1	15.8	18.9
b57v	9.7	14.4	17.5	10.2	14.9	18.0	10.7	15.4	18.5	11.0	15.7	18.8
b6iv	9.5	14.2	17.3	10.0	14.6	17.8	10.5	15.2	18.3	10.9	15.5	18.7
b8i	7.6	12.3	15.4	7.6	12.3	15.4	10.2	14.8	18.0	11.1	15.7	18.9
b8v	9.2	13.9	17.0	9.7	14.4	17.5	10.3	14.9	18.1	10.8	15.4	18.6
b9iii	8.8	13.5	16.6	9.3	14.0	17.1	10.0	14.6	17.8	10.6	15.2	18.4
b9v	8.8	13.5	16.6	9.3	14.0	17.1	9.9	14.6	17.7	10.6	15.3	18.4
a0i	8.2	12.9	16.0	8.8	13.4	16.6	9.5	14.2	17.3	10.6	15.3	18.4
a0iii	8.7	13.4	16.5	9.1	13.8	16.9	9.8	14.5	17.6	10.4	15.0	18.2
a0iv	8.4	13.1	16.2	8.9	13.6	16.7	9.6	14.3	17.4	10.4	15.1	18.2
a0v	8.5	13.1	16.3	9.0	13.7	16.8	9.6	14.3	17.4	10.4	15.0	18.2
a2i	7.5	12.2	15.3	8.0	12.6	15.8	9.1	13.8	16.9	10.6	15.2	18.4
a2v	8.1	12.7	15.9	8.5	13.2	16.3	9.4	14.0	17.2	10.3	14.9	18.1
a3iii	7.3	12.0	15.1	8.0	12.7	15.8	8.9	13.6	16.7	10.2	14.8	18.0
a3v	8.0	12.7	15.8	8.6	13.2	16.4	9.3	13.9	17.1	10.3	14.9	18.1
a5iii	7.4	12.0	15.2	8.0	12.7	15.9	8.9	13.6	16.7	10.1	14.8	18.0
a5v	7.6	12.3	15.4	8.3	12.9	16.1	9.1	13.7	16.9	10.2	14.8	18.0
a7iii	7.1	11.8	14.9	7.8	12.5	15.6	8.8	13.5	16.6	10.1	14.8	17.9
a7v	7.4	12.1	15.2	8.1	12.8	15.9	9.1	13.8	16.9	10.2	14.9	18.0
a47iv	7.6	12.3	15.4	8.2	12.9	16.0	9.1	13.8	16.9	10.2	14.9	18.1
f0i	5.7	10.3	13.5	6.2	10.8	14.0	7.8	12.5	15.6	9.9	14.5	17.7
f0ii	6.0	10.7	13.9	6.8	11.5	14.6	8.0	12.7	15.8	9.9	14.6	17.7
f0iii	6.2	10.9	14.0	7.2	11.8	15.0	8.6	13.2	16.4	10.1	14.8	17.9
f0v	6.8	11.4	14.6	7.7	12.4	15.5	8.8	13.4	16.6	10.2	14.9	18.0
f2ii	5.9	10.5	13.7	6.9	11.6	14.8	8.1	12.8	15.9	9.9	14.6	17.7
f2iii	6.1	10.7	13.9	7.1	11.8	14.9	8.4	13.1	16.2	10.2	14.9	18.0
f02iv	6.0	10.7	13.8	7.3	11.9	15.1	8.6	13.3	16.4	10.2	14.9	18.0
f2v	6.1	10.8	13.9	7.3	12.0	15.1	8.7	13.4	16.5	10.2	14.9	18.0
f5i	4.3	9.0	12.1	5.6	10.2	13.4	7.4	12.1	15.2	9.9	14.6	17.7
f5iii	6.3	11.0	14.2	7.4	12.0	15.2	8.3	13.0	16.1	10.1	14.8	17.9
f5iv	5.5	10.2	13.3	6.9	11.6	14.7	8.5	13.1	16.3	10.2	14.9	18.0
f5v	5.1	9.7	12.9	6.8	11.5	14.6	8.4	13.0	16.2	10.2	14.9	18.0
f6v	5.2	9.9	13.0	6.9	11.6	14.7	8.6	13.2	16.4	10.2	14.9	18.0
f8i	3.3	8.0	11.1	5.0	9.7	12.8	7.0	11.7	14.8	9.5	14.2	17.3
f8iv	4.6	9.2	12.4	6.5	11.2	14.3	7.8	12.5	15.6	10.0	14.7	17.8
f8v	3.7	8.3	11.5	5.9	10.6	13.7	8.0	12.7	15.8	10.1	14.8	17.9
g0i	3.7	8.4	11.5	5.4	10.1	13.2	7.0	11.7	14.8	9.5	14.2	17.3
g0iii	3.4	8.1	11.2	5.2	9.8	13.0	7.5	12.2	15.3	9.8	14.5	17.6
g0iv	3.1	7.8	10.9	5.2	9.9	13.0	7.7	12.3	15.5	9.9	14.6	17.7
g0v	2.8	7.4	10.6	5.1	9.7	12.9	7.8	12.4	15.6	10.0	14.7	17.8
g2i	1.2	5.9	9.0	3.8	8.5	11.6	6.5	11.2	14.3	9.3	13.9	17.1
g2iv	1.7	6.4	9.5	5.1	9.8	12.9	7.6	12.2	15.4	9.8	14.4	17.6
g2v	2.7	7.3	10.5	5.0	9.6	12.8	7.7	12.4	15.5	9.9	14.6	17.7
g5i	-1.8	2.8	6.0	0.6	5.3	8.4	6.0	10.6	13.8	9.0	13.6	16.8
g5ii	-0.9	3.8	6.9	2.6	7.3	10.4	6.7	11.3	14.5	9.4	14.1	17.2
g5iii	1.0	5.7	8.9	4.5	9.1	12.3	6.8	11.5	14.6	9.4	14.0	17.2
g5iv	-0.7	3.9	7.1	3.6	8.3	11.5	7.1	11.8	14.9	9.6	14.3	17.4
g5v	2.9	7.6	10.7	4.9	9.6	12.7	7.5	12.1	15.3	9.8	14.5	17.6

g8i	0.3	5.0	8.1	1.7	6.4	9.5	5.4	10.0	13.2	8.5	13.2	16.3
g8iii	-1.6	3.1	6.2	2.3	7.0	10.1	6.2	10.8	14.0	9.2	13.8	17.0
g8iv	-1.7	3.0	6.1	2.1	6.8	9.9	6.6	11.3	14.4	9.4	14.1	17.2
g8v	-1.0	3.6	6.8	3.6	8.3	11.4	7.2	11.9	15.1	9.7	14.3	17.5
k0iii	-1.8	2.9	6.0	-1.2	3.5	6.6	5.6	10.2	13.4	9.0	13.7	16.8
k0iv	-1.8	2.9	6.0	-1.0	3.7	6.8	6.1	10.7	13.9	9.2	13.9	17.0
k0v	-1.5	3.1	6.3	2.6	7.3	10.4	6.8	11.4	14.6	9.6	14.2	17.4
k01iii	-1.6	3.1	6.2	-1.3	3.4	6.5	4.1	8.8	11.9	8.4	13.1	16.2
k1iii	-1.7	2.9	6.1	-1.3	3.3	6.5	5.2	9.9	13.0	8.9	13.5	16.7
k1iv	-1.7	3.0	6.1	-1.3	3.4	6.5	5.6	10.3	13.4	9.1	13.8	16.9
k2i	-1.4	3.3	6.4	-1.0	3.6	6.8	5.0	9.6	12.8	7.9	12.5	15.7
k2iii	-1.6	3.1	6.2	-1.3	3.4	6.6	4.5	9.2	12.3	8.7	13.4	16.5
k2v	1.9	6.6	9.7	3.9	8.6	11.7	6.7	11.4	14.5	9.3	14.0	17.1
k3i	-1.2	3.5	6.6	-0.9	3.8	6.9	4.5	9.2	12.3	7.8	12.5	15.6
k34iii	-1.3	3.3	6.5	-1.0	3.6	6.8	3.0	7.6	10.8	7.8	12.4	15.6
k3iii	-1.6	3.1	6.2	-1.2	3.4	6.6	4.0	8.6	11.8	8.4	13.1	16.2
k3iv	-1.6	3.1	6.3	-1.2	3.5	6.6	5.0	9.7	12.8	8.6	13.2	16.4
k3v	-1.6	3.1	6.2	-0.9	3.8	6.9	5.8	10.4	13.6	9.2	13.9	17.0
k4i	-0.8	3.9	7.0	-0.5	4.2	7.3	4.0	8.7	11.8	7.8	12.5	15.6
k4iii	-1.3	3.4	6.5	-1.0	3.7	6.8	3.5	8.2	11.3	8.0	12.7	15.8
k4v	-1.5	3.2	6.4	-1.1	3.6	6.7	5.4	10.1	13.2	9.0	13.7	16.8
k5iii	-1.0	3.6	6.8	-0.7	3.9	7.1	3.3	7.9	11.1	7.9	12.6	15.7
k5v	-1.2	3.4	6.6	-0.9	3.8	6.9	4.8	9.5	12.7	8.7	13.4	16.5
k7v	-0.9	3.8	6.9	-0.6	4.1	7.2	4.1	8.8	11.9	8.7	13.4	16.5
m0iii	-0.7	3.9	7.1	-0.1	4.6	7.7	3.6	8.3	11.4	8.1	12.8	15.9
m0v	-0.8	3.9	7.0	-0.5	4.2	7.3	2.4	7.0	10.2	8.6	13.3	16.4
m1iii	-0.6	4.1	7.2	-0.0	4.7	7.8	3.5	8.1	11.3	8.1	12.8	16.0
m1v	-0.6	4.1	7.3	-0.3	4.4	7.5	2.0	6.7	9.8	8.5	13.2	16.3
m2i	-0.1	4.6	7.7	0.2	4.9	8.0	2.6	7.2	10.4	7.6	12.3	15.4
m2v	-0.3	4.4	7.5	-0.0	4.6	7.8	1.4	6.1	9.3	8.7	13.3	16.5
m2iii	-0.4	4.2	7.4	0.1	4.7	7.9	3.4	8.1	11.2	8.1	12.8	15.9
m3ii	-0.0	4.6	7.8	0.2	4.9	8.0	1.1	5.8	8.9	7.6	12.3	15.4
m3iii	-0.1	4.5	7.7	0.3	5.0	8.1	3.6	8.3	11.4	8.2	12.9	16.1
m3v	0.2	4.8	8.0	0.4	5.1	8.2	1.6	6.3	9.4	8.6	13.2	16.4
m4iii	0.3	5.0	8.1	0.7	5.4	8.5	3.8	8.4	11.6	8.5	13.1	16.3
m4v	0.5	5.2	8.3	0.8	5.4	8.6	1.6	6.3	9.4	8.1	12.7	15.9
m5iii	0.9	5.6	8.7	1.3	5.9	9.1	4.0	8.6	11.8	9.0	13.6	16.8
m5v	1.0	5.7	8.9	1.3	6.0	9.1	2.0	6.6	9.8	8.2	12.9	16.0
m6iii	1.8	6.5	9.6	2.1	6.7	9.9	4.5	9.2	12.3	9.5	14.2	17.3
m6v	1.8	6.5	9.6	2.1	6.7	9.9	2.6	7.3	10.4	8.2	12.9	16.0
m7iii	3.3	8.0	11.1	3.6	8.2	11.4	5.5	10.2	13.4	10.8	15.5	18.6
m8iii	4.1	8.8	11.9	4.4	9.0	12.2	6.0	10.7	13.8	11.4	16.1	19.2
m9iii	3.8	8.5	11.6	4.1	8.7	11.9	5.4	10.1	13.2	11.5	16.2	19.3
m10iii	4.2	8.9	12.0	4.4	9.1	12.3	5.7	10.4	13.5	11.9	16.5	19.7

Pickles Sp	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100
spectrum	m374	m374	m374	m400	m400	m400	m550	m550	m550	m700	m700	m700
o5v	11.9	16.6	19.7	12.7	17.3	20.5	11.2	15.8	19.0	9.9	14.6	17.7
o8iii	11.9	16.5	19.7	12.6	17.3	20.4	11.2	15.9	19.0	10.0	14.6	17.8
o9v	11.8	16.5	19.6	12.6	17.3	20.4	11.1	15.8	18.9	9.9	14.6	17.7
b0i	11.7	16.3	19.5	12.5	17.2	20.3	11.2	15.8	19.0	10.0	14.7	17.8
b0v	11.8	16.5	19.6	12.6	17.3	20.4	11.2	15.8	19.0	10.0	14.6	17.8
b1i	11.6	16.3	19.4	12.5	17.2	20.3	11.2	15.9	19.0	10.2	14.8	18.0
b12iii	11.7	16.4	19.5	12.6	17.2	20.4	11.2	15.9	19.0	10.0	14.7	17.8
b1v	11.7	16.3	19.5	12.6	17.2	20.4	11.2	15.9	19.0	10.1	14.7	17.9
b2ii	11.6	16.2	19.4	12.5	17.2	20.3	11.2	15.9	19.0	10.1	14.7	17.9
b2iv	11.7	16.3	19.5	12.6	17.3	20.4	11.2	15.9	19.0	10.0	14.7	17.8
b3i	11.5	16.2	19.3	12.5	17.2	20.3	11.3	16.0	19.1	10.2	14.9	18.0
b3iii	11.4	16.1	19.2	12.5	17.2	20.3	11.2	15.9	19.0	10.1	14.8	17.9
b3v	11.4	16.1	19.2	12.5	17.2	20.3	11.2	15.9	19.0	10.1	14.7	17.9
b5i	11.4	16.1	19.2	12.5	17.1	20.3	11.3	15.9	19.1	10.3	14.9	18.1
b5ii	11.4	16.0	19.2	12.5	17.2	20.3	11.3	15.9	19.1	10.2	14.8	18.0
b5iii	11.2	15.9	19.0	12.5	17.2	20.3	11.2	15.9	19.0	10.1	14.8	17.9
b57v	11.2	15.9	19.0	12.5	17.1	20.3	11.2	15.9	19.0	10.1	14.8	18.0
b6iv	11.1	15.8	18.9	12.5	17.1	20.3	11.2	15.9	19.0	10.2	14.9	18.0
b8i	11.2	15.9	19.0	12.4	17.0	20.2	11.2	15.9	19.0	10.2	14.9	18.0
b8v	11.1	15.7	18.9	12.5	17.1	20.3	11.3	15.9	19.1	10.2	14.9	18.0
b9iii	11.0	15.6	18.8	12.5	17.1	20.3	11.3	15.9	19.1	10.2	14.9	18.0
b9v	10.9	15.6	18.8	12.4	17.1	20.2	11.3	15.9	19.1	10.2	14.9	18.0
a0i	11.0	15.7	18.8	12.4	17.1	20.2	11.3	15.9	19.1	10.3	15.0	18.1
a0iii	10.8	15.4	18.6	12.4	17.1	20.2	11.3	16.0	19.1	10.3	15.0	18.1
a0iv	10.8	15.5	18.6	12.4	17.1	20.2	11.3	15.9	19.1	10.3	14.9	18.1
a0v	10.8	15.4	18.6	12.4	17.1	20.2	11.3	16.0	19.1	10.3	15.0	18.1
a2i	11.0	15.6	18.8	12.4	17.0	20.2	11.3	16.0	19.1	10.4	15.1	18.2
a2v	10.7	15.4	18.5	12.4	17.1	20.2	11.3	16.0	19.1	10.3	15.0	18.1
a3iii	10.6	15.3	18.5	12.4	17.0	20.2	11.3	16.0	19.2	10.4	15.1	18.2
a3v	10.7	15.3	18.5	12.3	17.0	20.1	11.3	16.0	19.1	10.4	15.0	18.2
a5iii	10.6	15.2	18.4	12.3	17.0	20.1	11.3	16.0	19.1	10.4	15.1	18.3
a5v	10.6	15.3	18.4	12.3	17.0	20.1	11.3	16.0	19.1	10.4	15.1	18.2
a7iii	10.6	15.2	18.4	12.3	17.0	20.1	11.4	16.1	19.2	10.5	15.2	18.3
a7v	10.6	15.2	18.4	12.3	17.0	20.1	11.4	16.0	19.2	10.5	15.2	18.3
a47iv	10.7	15.4	18.5	12.4	17.1	20.2	11.3	16.0	19.1	10.4	15.1	18.2
f0i	10.5	15.2	18.4	12.3	17.0	20.1	11.4	16.0	19.2	10.6	15.2	18.4
f0ii	10.6	15.3	18.4	12.3	17.0	20.1	11.3	16.0	19.1	10.5	15.1	18.3
f0iii	10.5	15.2	18.3	12.3	16.9	20.1	11.4	16.1	19.2	10.6	15.2	18.4
f0v	10.5	15.2	18.3	12.3	16.9	20.1	11.4	16.1	19.2	10.7	15.3	18.5
f2ii	10.4	15.1	18.2	12.2	16.9	20.0	11.4	16.1	19.2	10.7	15.3	18.5
f2iii	10.5	15.2	18.3	12.3	16.9	20.1	11.5	16.2	19.3	10.8	15.5	18.6
f02iv	10.5	15.2	18.3	12.3	16.9	20.0	11.4	16.1	19.2	10.7	15.4	18.5
f2v	10.5	15.2	18.3	12.2	16.9	20.0	11.5	16.1	19.3	10.8	15.4	18.6
f5i	10.5	15.2	18.3	12.3	16.9	20.1	11.4	16.0	19.2	10.6	15.3	18.4
f5iii	10.4	15.1	18.2	12.2	16.9	20.0	11.5	16.1	19.3	10.8	15.5	18.6
f5iv	10.5	15.1	18.3	12.2	16.9	20.0	11.4	16.1	19.2	10.8	15.4	18.6
f5v	10.5	15.1	18.3	12.2	16.8	20.0	11.5	16.1	19.3	10.8	15.5	18.6
f6v	10.4	15.1	18.2	12.2	16.8	20.0	11.5	16.1	19.3	10.8	15.5	18.6
f8i	10.1	14.8	17.9	12.1	16.8	19.9	11.5	16.2	19.3	10.9	15.6	18.7
f8iv	10.3	14.9	18.1	12.1	16.8	19.9	11.5	16.2	19.3	10.9	15.6	18.7
f8v	10.4	15.0	18.2	12.2	16.8	20.0	11.5	16.2	19.3	10.9	15.6	18.7
g0i	9.9	14.6	17.7	12.0	16.7	19.8	11.6	16.3	19.4	11.1	15.8	18.9
g0iii	10.1	14.7	17.9	12.1	16.7	19.9	11.6	16.2	19.4	11.0	15.7	18.8
g0iv	10.2	14.8	18.0	12.1	16.8	19.9	11.5	16.2	19.3	11.0	15.6	18.8
g0v	10.3	15.0	18.1	12.2	16.8	20.0	11.5	16.2	19.3	11.0	15.6	18.8
g2i	9.7	14.3	17.5	12.0	16.7	19.8	11.7	16.3	19.5	11.2	15.9	19.0
g2iv	10.0	14.7	17.8	12.1	16.7	19.9	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
g2v	10.2	14.8	18.0	12.1	16.8	19.9	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
g5i	9.3	14.0	17.2	11.9	16.6	19.7	11.7	16.4	19.5	11.3	16.0	19.1
g5ii	9.6	14.3	17.5	12.0	16.6	19.8	11.7	16.3	19.5	11.2	15.9	19.0
g5iii	9.6	14.3	17.4	12.0	16.6	19.8	11.6	16.3	19.4	11.2	15.9	19.0
g5iv	9.9	14.5	17.7	12.0	16.7	19.8	11.6	16.2	19.4	11.1	15.7	18.9
g5v	10.1	14.7	17.9	12.1	16.8	19.9	11.6	16.2	19.4	11.1	15.7	18.9
g8i	9.0	13.6	16.8	11.8	16.5	19.6	11.8	16.5	19.6	11.5	16.2	19.3

g8iii	9.5	14.2	17.3	11.9	16.6	19.7	11.7	16.3	19.5	11.3	15.9	19.1
g8iv	9.7	14.4	17.5	12.0	16.7	19.8	11.6	16.3	19.4	11.2	15.9	19.0
g8v	9.9	14.6	17.7	12.1	16.7	19.9	11.6	16.3	19.4	11.1	15.8	18.9
k0iii	9.4	14.0	17.2	11.9	16.6	19.7	11.7	16.3	19.5	11.3	16.0	19.1
k0iv	9.5	14.2	17.3	12.0	16.6	19.8	11.7	16.4	19.5	11.3	16.0	19.1
k0v	9.9	14.5	17.7	12.0	16.7	19.8	11.6	16.3	19.4	11.2	15.9	19.0
k01iii	8.8	13.5	16.6	11.8	16.5	19.6	11.8	16.5	19.6	11.5	16.2	19.3
k1iii	9.2	13.9	17.0	11.9	16.6	19.7	11.7	16.4	19.5	11.4	16.1	19.2
k1iv	9.5	14.1	17.3	12.0	16.6	19.8	11.7	16.4	19.5	11.4	16.1	19.2
k2i	8.4	13.0	16.2	11.7	16.4	19.5	11.9	16.6	19.7	11.8	16.5	19.6
k2iii	9.1	13.8	17.0	11.9	16.6	19.7	11.8	16.4	19.6	11.5	16.2	19.3
k2v	9.6	14.2	17.4	12.0	16.7	19.8	11.7	16.4	19.5	11.4	16.0	19.2
k3i	8.3	13.0	16.1	11.7	16.4	19.5	12.0	16.7	19.8	12.0	16.6	19.8
k34iii	8.3	13.0	16.1	11.7	16.4	19.5	11.9	16.5	19.7	11.8	16.4	19.6
k3iii	8.9	13.5	16.7	11.8	16.5	19.6	11.8	16.4	19.6	11.6	16.2	19.4
k3iv	9.0	13.6	16.8	11.9	16.5	19.7	11.8	16.5	19.6	11.6	16.2	19.4
k3v	9.5	14.2	17.3	12.1	16.7	19.9	11.8	16.5	19.6	11.5	16.2	19.3
k4i	8.2	12.9	16.0	11.7	16.4	19.5	12.1	16.7	19.9	12.1	16.8	19.9
k4iii	8.4	13.1	16.2	11.7	16.4	19.5	11.9	16.6	19.7	11.8	16.5	19.6
k4v	9.3	14.0	17.1	12.0	16.6	19.8	11.8	16.5	19.6	11.7	16.3	19.5
k5iii	8.4	13.1	16.2	11.8	16.4	19.6	11.9	16.6	19.7	11.9	16.6	19.7
k5v	9.1	13.7	16.9	12.0	16.6	19.8	12.0	16.6	19.8	11.8	16.5	19.6
k7v	9.0	13.7	16.8	11.9	16.6	19.7	12.1	16.7	19.9	12.1	16.7	19.9
m0iii	8.6	13.3	16.4	11.9	16.6	19.7	12.1	16.8	19.9	12.1	16.8	19.9
m0v	9.0	13.6	16.8	11.9	16.6	19.7	12.0	16.7	19.8	12.1	16.7	19.9
m1iii	8.7	13.4	16.5	12.0	16.6	19.8	12.1	16.8	19.9	12.2	16.9	20.0
m1v	9.0	13.6	16.8	11.9	16.6	19.7	12.1	16.7	19.9	12.1	16.8	19.9
m2i	8.3	12.9	16.1	11.7	16.4	19.5	12.1	16.8	20.0	12.5	17.2	20.3
m2v	9.1	13.8	16.9	11.9	16.6	19.7	12.1	16.8	19.9	12.3	17.0	20.1
m2iii	8.7	13.4	16.5	12.0	16.6	19.8	12.2	16.8	20.0	12.3	17.0	20.1
m3ii	8.3	13.0	16.1	11.8	16.4	19.6	12.1	16.8	19.9	12.5	17.1	20.3
m3iii	8.8	13.5	16.6	12.0	16.7	19.8	12.2	16.9	20.0	12.4	17.1	20.2
m3v	9.1	13.7	16.9	11.9	16.5	19.7	12.1	16.8	19.9	12.5	17.1	20.3
m4iii	9.1	13.8	16.9	12.1	16.8	19.9	12.3	16.9	20.1	12.6	17.3	20.4
m4v	8.6	13.3	16.4	11.8	16.4	19.6	12.1	16.7	19.9	12.7	17.3	20.5
m5iii	9.6	14.3	17.4	12.3	17.0	20.1	12.4	17.0	20.2	12.9	17.6	20.7
m5v	8.7	13.4	16.5	11.8	16.5	19.6	12.2	16.9	20.0	12.9	17.5	20.7
m6iii	10.1	14.8	17.9	12.6	17.2	20.4	12.6	17.2	20.4	13.4	18.1	21.2
m6v	8.6	13.3	16.4	11.7	16.4	19.5	12.2	16.9	20.0	13.2	17.9	21.0
m7iii	11.4	16.1	19.2	13.3	18.0	21.1	13.2	17.9	21.0	14.4	19.0	22.2
m8iii	11.9	16.6	19.7	13.5	18.1	21.3	13.4	18.1	21.2	14.8	19.5	22.6
m9iii	12.0	16.6	19.8	13.4	18.1	21.2	13.4	18.0	21.2	14.7	19.3	22.5
m10iii	12.3	17.0	20.1	13.7	18.3	21.5	13.5	18.1	21.3	14.8	19.5	22.6

Pickles Sp	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100
spectrum	m785	m785	m785	m825	m825	m825	m930	m930	m930	m1000	m1000	m1000
o5v	10.4	15.1	18.2	10.2	14.9	18.0	9.6	14.2	17.4	9.0	13.6	16.8
o8iii	10.5	15.1	18.3	10.2	14.9	18.0	9.6	14.2	17.4	9.0	13.7	16.8
o9v	10.4	15.1	18.2	10.2	14.9	18.0	9.5	14.2	17.3	8.9	13.6	16.7
b0i	10.6	15.2	18.4	10.4	15.0	18.2	9.7	14.4	17.5	9.1	13.8	16.9
b0v	10.5	15.2	18.3	10.3	14.9	18.1	9.6	14.3	17.4	9.1	13.7	16.9
b1i	10.7	15.3	18.5	10.5	15.1	18.3	9.8	14.4	17.6	9.2	13.9	17.0
b12iii	10.6	15.2	18.4	10.4	15.0	18.2	9.7	14.4	17.5	9.1	13.8	16.9
b1v	10.6	15.3	18.4	10.4	15.1	18.2	9.8	14.4	17.6	9.2	13.9	17.0
b2ii	10.6	15.3	18.4	10.4	15.1	18.2	9.8	14.4	17.6	9.2	13.9	17.0
b2iv	10.6	15.3	18.4	10.4	15.0	18.2	9.7	14.4	17.5	9.2	13.8	17.0
b3i	10.8	15.4	18.6	10.6	15.2	18.4	9.9	14.6	17.7	9.4	14.0	17.2
b3iii	10.7	15.3	18.5	10.5	15.1	18.3	9.8	14.5	17.6	9.3	13.9	17.1
b3v	10.7	15.3	18.5	10.5	15.1	18.3	9.8	14.5	17.6	9.3	13.9	17.1
b5i	10.9	15.6	18.7	10.7	15.4	18.5	10.1	14.8	17.9	9.6	14.2	17.4
b5ii	10.7	15.4	18.5	10.5	15.2	18.3	9.9	14.6	17.7	9.4	14.0	17.2
b5iii	10.7	15.4	18.5	10.5	15.2	18.3	9.9	14.6	17.7	9.4	14.1	17.2
b57v	10.8	15.4	18.6	10.6	15.2	18.4	9.9	14.6	17.7	9.4	14.1	17.2
b6iv	10.8	15.4	18.6	10.6	15.2	18.4	10.0	14.7	17.8	9.5	14.2	17.3
b8i	10.9	15.5	18.7	10.7	15.4	18.5	10.2	14.8	18.0	9.6	14.3	17.4
b8v	10.8	15.5	18.6	10.6	15.3	18.4	10.1	14.7	17.9	9.6	14.2	17.3
b9iii	10.8	15.5	18.6	10.6	15.3	18.4	10.1	14.8	17.9	9.6	14.3	17.4
b9v	10.8	15.5	18.6	10.6	15.3	18.4	10.1	14.8	17.9	9.6	14.2	17.4
a0i	11.0	15.6	18.8	10.8	15.5	18.6	10.3	14.9	18.1	9.7	14.4	17.5
a0iii	10.9	15.6	18.7	10.7	15.4	18.5	10.2	14.9	18.0	9.7	14.3	17.5
a0iv	10.9	15.5	18.7	10.7	15.3	18.5	10.2	14.8	18.0	9.6	14.3	17.4
a0v	10.9	15.6	18.7	10.7	15.4	18.5	10.2	14.9	18.0	9.7	14.3	17.5
a2i	11.1	15.7	18.9	10.9	15.6	18.7	10.4	15.0	18.2	9.8	14.5	17.6
a2v	10.9	15.6	18.7	10.8	15.4	18.6	10.2	14.9	18.0	9.7	14.4	17.5
a3iii	11.0	15.7	18.8	10.8	15.5	18.6	10.3	15.0	18.1	9.8	14.5	17.6
a3v	11.0	15.7	18.8	10.8	15.5	18.6	10.3	14.9	18.1	9.7	14.4	17.5
a5iii	11.1	15.8	18.9	10.9	15.6	18.7	10.4	15.1	18.2	9.9	14.6	17.7
a5v	11.1	15.8	18.9	10.9	15.6	18.7	10.4	15.1	18.2	9.9	14.6	17.7
a7iii	11.2	15.9	19.0	11.1	15.7	18.9	10.6	15.2	18.4	10.1	14.7	17.9
a7v	11.2	15.9	19.0	11.0	15.7	18.8	10.6	15.2	18.4	10.1	14.7	17.8
a47iv	11.0	15.7	18.8	10.8	15.5	18.6	10.4	15.0	18.1	9.8	14.5	17.6
f0i	11.3	15.9	19.1	11.1	15.8	18.9	10.7	15.3	18.5	10.1	14.8	17.9
f0ii	11.1	15.8	18.9	11.0	15.6	18.8	10.5	15.1	18.3	10.0	14.6	17.8
f0iii	11.3	16.0	19.1	11.2	15.8	19.0	10.7	15.4	18.5	10.2	14.8	18.0
f0v	11.4	16.1	19.2	11.2	15.9	19.0	10.7	15.3	18.5	10.2	14.8	18.0
f2ii	11.4	16.0	19.2	11.2	15.9	19.0	10.8	15.4	18.6	10.3	14.9	18.1
f2iii	11.5	16.2	19.3	11.4	16.1	19.2	10.9	15.6	18.7	10.4	15.1	18.2
f2iv	11.4	16.1	19.2	11.3	15.9	19.1	10.8	15.4	18.6	10.3	14.9	18.1
f2v	11.5	16.2	19.3	11.4	16.0	19.2	10.9	15.6	18.7	10.4	15.0	18.2
f5i	11.4	16.0	19.2	11.2	15.9	19.0	10.8	15.4	18.6	10.3	14.9	18.1
f5iii	11.6	16.2	19.4	11.4	16.1	19.2	11.0	15.6	18.8	10.5	15.1	18.3
f5iv	11.5	16.2	19.3	11.4	16.0	19.2	10.9	15.5	18.7	10.4	15.0	18.2
f5v	11.6	16.2	19.4	11.4	16.1	19.2	10.9	15.6	18.7	10.4	15.1	18.2
f6v	11.6	16.3	19.4	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8	10.5	15.2	18.3
f8i	11.6	16.3	19.4	11.5	16.1	19.3	11.0	15.7	18.8	10.5	15.2	18.3
f8iv	11.7	16.3	19.5	11.5	16.2	19.3	11.1	15.7	18.9	10.6	15.2	18.4
f8v	11.7	16.4	19.5	11.6	16.3	19.4	11.1	15.8	18.9	10.6	15.3	18.4
g0i	11.9	16.5	19.7	11.7	16.4	19.5	11.2	15.9	19.0	10.8	15.4	18.6
g0iii	11.9	16.5	19.7	11.7	16.4	19.5	11.3	16.0	19.1	10.8	15.5	18.6
g0iv	11.7	16.4	19.5	11.6	16.3	19.4	11.1	15.8	18.9	10.7	15.3	18.5
g0v	11.8	16.5	19.6	11.7	16.3	19.5	11.2	15.9	19.0	10.7	15.4	18.5
g2i	12.0	16.6	19.8	11.8	16.5	19.6	11.4	16.0	19.2	10.9	15.5	18.7
g2iv	11.8	16.5	19.6	11.7	16.4	19.5	11.2	15.9	19.0	10.7	15.4	18.5
g2v	11.8	16.5	19.6	11.7	16.4	19.5	11.3	15.9	19.1	10.8	15.4	18.6
g5i	12.1	16.8	19.9	12.0	16.6	19.8	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
g5ii	12.1	16.7	19.9	11.9	16.6	19.7	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
g5iii	12.1	16.7	19.9	11.9	16.6	19.7	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
g5iv	11.9	16.6	19.7	11.8	16.4	19.6	11.3	16.0	19.1	10.8	15.5	18.6
g5v	11.9	16.6	19.7	11.8	16.4	19.6	11.3	16.0	19.1	10.9	15.5	18.7
g8i	12.3	17.0	20.1	12.2	16.8	20.0	11.8	16.5	19.6	11.3	16.0	19.1
g8iii	12.1	16.8	19.9	12.0	16.7	19.8	11.6	16.3	19.4	11.2	15.8	19.0

g8iv	12.1	16.7	19.9	11.9	16.6	19.7	11.5	16.2	19.3	11.1	15.7	18.8
g8v	12.0	16.6	19.8	11.9	16.5	19.7	11.4	16.1	19.2	10.9	15.6	18.7
k0iii	12.2	16.9	20.0	12.1	16.8	19.9	11.7	16.4	19.5	11.2	15.9	19.0
k0iv	12.2	16.9	20.0	12.1	16.8	19.9	11.7	16.4	19.5	11.2	15.9	19.0
k0v	12.0	16.7	19.8	11.9	16.6	19.7	11.5	16.2	19.3	11.0	15.7	18.8
k0liii	12.4	17.1	20.2	12.3	17.0	20.1	12.0	16.6	19.8	11.5	16.2	19.3
k1iii	12.3	17.0	20.1	12.2	16.9	20.0	11.8	16.5	19.6	11.4	16.0	19.2
k1iv	12.3	17.0	20.1	12.2	16.9	20.0	11.8	16.5	19.6	11.4	16.0	19.2
k2i	12.7	17.4	20.5	12.6	17.2	20.4	12.3	16.9	20.1	11.8	16.5	19.6
k2iii	12.4	17.1	20.2	12.3	17.0	20.1	12.0	16.6	19.8	11.5	16.2	19.3
k2v	12.2	16.9	20.0	12.1	16.8	19.9	11.7	16.4	19.5	11.2	15.9	19.0
k3i	12.9	17.6	20.7	12.8	17.4	20.6	12.5	17.1	20.3	12.0	16.7	19.8
k34iii	12.7	17.4	20.5	12.6	17.3	20.4	12.3	17.0	20.1	11.9	16.6	19.7
k3iii	12.5	17.1	20.3	12.4	17.0	20.2	12.0	16.7	19.8	11.6	16.2	19.4
k3iv	12.5	17.2	20.3	12.4	17.1	20.2	12.0	16.7	19.8	11.5	16.2	19.3
k3v	12.4	17.1	20.2	12.3	17.0	20.1	11.9	16.6	19.7	11.4	16.1	19.2
k4i	13.2	17.9	21.0	13.2	17.8	21.0	12.9	17.6	20.7	12.5	17.1	20.3
k4iii	12.8	17.4	20.6	12.7	17.4	20.5	12.4	17.0	20.2	11.9	16.6	19.7
k4v	12.6	17.3	20.4	12.5	17.2	20.3	12.1	16.8	19.9	11.6	16.3	19.4
k5iii	13.0	17.6	20.8	12.9	17.6	20.7	12.7	17.3	20.5	12.2	16.9	20.0
k5v	12.8	17.5	20.6	12.7	17.4	20.5	12.4	17.0	20.2	11.9	16.6	19.7
k7v	13.1	17.8	20.9	13.1	17.8	20.9	12.8	17.4	20.6	12.3	17.0	20.1
m0iii	13.3	17.9	21.1	13.2	17.9	21.0	13.0	17.6	20.8	12.5	17.2	20.3
m0v	13.2	17.9	21.0	13.2	17.9	21.0	12.9	17.6	20.7	12.5	17.2	20.3
m1iii	13.4	18.1	21.2	13.4	18.0	21.2	13.1	17.8	20.9	12.7	17.4	20.5
m1v	13.4	18.1	21.2	13.4	18.1	21.2	13.2	17.9	21.0	12.8	17.4	20.6
m2i	13.9	18.6	21.7	13.9	18.6	21.7	13.7	18.4	21.5	13.3	18.0	21.1
m2v	13.7	18.3	21.5	13.6	18.3	21.4	13.5	18.1	21.3	13.0	17.7	20.8
m2iii	13.5	18.2	21.3	13.5	18.2	21.3	13.3	18.0	21.1	12.9	17.6	20.7
m3ii	13.9	18.6	21.7	13.9	18.6	21.7	13.8	18.4	21.6	13.4	18.0	21.2
m3iii	13.8	18.5	21.6	13.8	18.5	21.6	13.6	18.3	21.4	13.2	17.9	21.0
m3v	14.1	18.7	21.9	14.1	18.8	21.9	14.0	18.6	21.8	13.6	18.2	21.4
m4iii	14.2	18.8	22.0	14.3	18.9	22.1	14.2	18.8	22.0	13.8	18.4	21.6
m4v	14.4	19.0	22.2	14.4	19.1	22.2	14.4	19.1	22.2	14.0	18.7	21.8
m5iii	14.7	19.3	22.4	14.8	19.4	22.6	14.8	19.5	22.6	14.5	19.1	22.3
m5v	14.8	19.5	22.6	15.0	19.6	22.8	14.9	19.6	22.7	14.6	19.2	22.3
m6iii	15.3	20.0	23.1	15.5	20.2	23.3	15.8	20.4	23.6	15.5	20.1	23.2
m6v	15.4	20.0	23.2	15.6	20.3	23.4	15.8	20.5	23.6	15.5	20.1	23.2
m7iii	16.5	21.2	24.3	16.9	21.6	24.7	17.4	22.0	25.2	17.1	21.8	24.9
m8iii	17.1	21.7	24.9	17.5	22.2	25.3	18.3	22.9	26.1	18.2	22.8	26.0
m9iii	16.7	21.4	24.5	17.2	21.8	25.0	18.0	22.6	25.8	17.9	22.5	25.7
m10iii	17.0	21.6	24.8	17.5	22.2	25.3	18.4	23.1	26.2	18.3	23.0	26.1

Pickles Sp	100/1	10/1	10/100	100/1	10/1	10/100
spectrum	p14	p14	p14	p30	p30	p30
o5v	14.4	19.1	22.2	14.4	19.1	22.2
o8iii	14.4	19.1	22.2	14.5	19.1	22.2
o9v	14.5	19.2	22.3	14.5	19.2	22.3
b0i	14.4	19.0	22.1	14.4	19.0	22.2
b0v	14.5	19.2	22.3	14.5	19.2	22.3
b1i	14.4	19.0	22.1	14.4	19.0	22.1
b12iii	14.4	19.0	22.1	14.4	19.1	22.2
b1v	14.4	19.1	22.2	14.4	19.1	22.2
b2ii	14.3	18.9	22.0	14.3	18.9	22.0
b2iv	14.4	19.1	22.2	14.5	19.1	22.2
b3i	14.3	18.9	22.0	14.3	19.0	22.1
b3iii	14.2	18.9	22.0	14.3	18.9	22.0
b3v	14.2	18.9	22.0	14.3	18.9	22.0
b5i	14.2	18.8	22.0	14.2	18.9	22.0
b5ii	14.2	18.8	21.9	14.2	18.9	22.0
b5iii	14.1	18.8	21.9	14.2	18.8	21.9
b57v	14.1	18.8	21.9	14.1	18.8	21.9
b6iv	14.1	18.7	21.8	14.1	18.8	21.9
b8i	14.0	18.7	21.8	14.1	18.7	21.8
b8v	14.1	18.7	21.8	14.1	18.7	21.9
b9iii	14.0	18.7	21.8	14.1	18.7	21.8
b9v	14.0	18.6	21.8	14.0	18.7	21.8
a0i	14.0	18.6	21.8	14.0	18.7	21.8
a0iii	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a0iv	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a0v	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a2i	14.0	18.7	21.8	14.1	18.7	21.8
a2v	14.0	18.6	21.7	14.0	18.6	21.8
a3iii	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a3v	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a5iii	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a5v	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
a7iii	14.0	18.7	21.8	14.1	18.7	21.8
a7v	14.0	18.6	21.8	14.1	18.7	21.8
a47iv	14.0	18.6	21.7	14.0	18.7	21.8
f0i	14.0	18.6	21.7	14.1	18.7	21.8
f0ii	13.9	18.6	21.7	14.0	18.6	21.8
f0iii	14.0	18.6	21.8	14.1	18.7	21.8
f0v	14.0	18.7	21.8	14.1	18.8	21.9
f2ii	14.0	18.7	21.8	14.1	18.7	21.8
f2iii	14.1	18.8	21.9	14.2	18.8	21.9
f02iv	14.1	18.7	21.8	14.1	18.8	21.9
f2v	14.1	18.7	21.8	14.2	18.8	21.9
f5i	14.0	18.6	21.8	14.1	18.7	21.8
f5iii	14.1	18.7	21.8	14.2	18.8	21.9
f5iv	14.1	18.7	21.8	14.1	18.8	21.9
f5v	14.1	18.7	21.8	14.2	18.8	21.9
f6v	14.1	18.8	21.9	14.2	18.8	21.9
f8i	14.1	18.7	21.8	14.2	18.8	21.9
f8iv	14.1	18.8	21.9	14.2	18.8	22.0
f8v	14.1	18.8	21.9	14.2	18.9	22.0
g0i	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g0iii	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g0iv	14.1	18.8	21.9	14.2	18.9	22.0
g0v	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g2i	14.2	18.9	22.0	14.3	19.0	22.1
g2iv	14.1	18.8	21.9	14.2	18.9	22.0
g2v	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g5i	14.3	18.9	22.0	14.4	19.0	22.1
g5ii	14.2	18.9	22.0	14.4	19.0	22.1
g5iii	14.2	18.9	22.0	14.4	19.0	22.1
g5iv	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g5v	14.2	18.8	21.9	14.3	18.9	22.0
g8i	14.4	19.1	22.2	14.5	19.2	22.3
g8iii	14.3	18.9	22.0	14.4	19.0	22.2

g8iv	14.3	18.9	22.0	14.4	19.0	22.1
g8v	14.2	18.9	22.0	14.3	19.0	22.1
k0iii	14.3	19.0	22.1	14.4	19.1	22.2
k0iv	14.3	19.0	22.1	14.4	19.1	22.2
k0v	14.2	18.9	22.0	14.4	19.0	22.1
k0liii	14.4	19.1	22.2	14.6	19.2	22.3
k1iii	14.4	19.0	22.1	14.5	19.1	22.3
k1iv	14.4	19.0	22.1	14.5	19.2	22.3
k2i	14.6	19.3	22.4	14.8	19.4	22.5
k2iii	14.4	19.1	22.2	14.6	19.2	22.3
k2v	14.3	19.0	22.1	14.5	19.1	22.2
k3i	14.8	19.4	22.5	14.9	19.6	22.7
k34iii	14.6	19.3	22.4	14.8	19.4	22.5
k3iii	14.5	19.1	22.2	14.6	19.2	22.4
k3iv	14.5	19.1	22.2	14.6	19.3	22.4
k3v	14.5	19.1	22.2	14.6	19.3	22.4
k4i	15.0	19.6	22.7	15.2	19.8	22.9
k4iii	14.7	19.3	22.4	14.8	19.5	22.6
k4v	14.6	19.2	22.3	14.7	19.4	22.5
k5iii	14.8	19.4	22.5	15.0	19.6	22.7
k5v	14.7	19.4	22.5	14.9	19.5	22.6
k7v	14.9	19.6	22.7	15.1	19.8	22.9
m0iii	15.0	19.7	22.8	15.2	19.9	23.0
m0v	15.0	19.6	22.7	15.2	19.8	22.9
m1iii	15.1	19.8	22.9	15.3	20.0	23.1
m1v	15.1	19.8	22.9	15.3	20.0	23.1
m2i	15.5	20.1	23.2	15.7	20.3	23.4
m2v	15.3	19.9	23.0	15.5	20.1	23.3
m2iii	15.2	19.9	23.0	15.4	20.1	23.2
m3ii	15.5	20.1	23.2	15.7	20.3	23.4
m3iii	15.4	20.0	23.2	15.6	20.3	23.4
m3v	15.6	20.2	23.3	15.8	20.5	23.6
m4iii	15.7	20.4	23.5	16.0	20.6	23.7
m4v	15.8	20.4	23.6	16.1	20.7	23.8
m5iii	16.1	20.8	23.9	16.4	21.1	24.2
m5v	16.2	20.9	24.0	16.5	21.2	24.3
m6iii	16.8	21.5	24.6	17.2	21.8	24.9
m6v	16.8	21.5	24.6	17.2	21.8	24.9
m7iii	18.2	22.8	25.9	18.6	23.2	26.3
m8iii	18.9	23.5	26.6	19.4	24.0	27.1
m9iii	18.6	23.2	26.4	19.1	23.7	26.8
m10iii	18.9	23.6	26.7	19.4	24.1	27.2

Приложение Ж.

Оценка количества звезд в каталоге «Ли́ра-Б»

Из каталога Hipparcos были выбраны звезды, у которых $H_p < 7,0$. Таких звезд оказалось 13950. Для них по приведенным параллаксам были вычислены абсолютные звездные величины M_{H_p} . В тех случаях, когда не был указан класс светимости, он был приписан, исходя из абсолютных звездных величин M_V , приведенных в Приложении 2 в книге В. Страйжиса «Звезды с дефицитом металлов» (Вильнюс, «Мокслас», 1980).

В колонке каталога Hipparcos, содержащей спектральный класс и класс светимости дискретность по спектральному классу составляет половину спектрального подкласса, например, запись A7/A8 нужно трактовать как A7,5. Дискретность по классу светимости составляет половину класса светимости, так что могут встретиться следующие обозначения класса светимости:

V, IV-V, IV, III-IV, III, II-III, II, Ib-II, Ib, Iab-Ib, Iab, Ia-Iab, Ia.

Для удобства программного обращения к таблице Страйжиса, данные в ней были линейно проинтерполированы на половины спектральных подклассов и половины классов светимости. Результат интерполяции представлен в таблице Ж1

Таблица Ж1. Проинтерполированная таблица Страйжиса, дающая зависимость абсолютной звездной величины M_V от спектрального класса и класса светимости.

Sp	КЛАССЫ СВЕТИМОСТИ												
	V	IV-V	IV	III-IV	III	II-III	II	Ib-II	Ib	Iab-Ib	Iab	Ia-Iab	Ia
O5	-5.60	-5.70	-5.80	-5.90	-6.00	-6.15	-6.30	-6.45	-6.60	-6.75	-6.90	-7.05	-7.20
O5.5	-5.50	-5.63	-5.76	-5.85	-5.95	-6.13	-6.31	-6.46	-6.61	-6.76	-6.91	-7.06	-7.20
O6	-5.40	-5.55	-5.70	-5.80	-5.90	-6.10	-6.30	-6.45	-6.60	-6.75	-6.90	-7.05	-7.20
O6.5	-5.31	-5.46	-5.62	-5.74	-5.86	-6.06	-6.26	-6.41	-6.56	-6.71	-6.86	-7.03	-7.20
O7	-5.20	-5.35	-5.50	-5.65	-5.80	-6.00	-6.20	-6.35	-6.50	-6.65	-6.80	-7.00	-7.20
O7.5	-5.06	-5.21	-5.35	-5.53	-5.71	-5.93	-6.15	-6.30	-6.45	-6.60	-6.75	-6.97	-7.20
O8	-4.90	-5.05	-5.20	-5.40	-5.60	-5.85	-6.10	-6.25	-6.40	-6.55	-6.70	-6.95	-7.20
O8.5	-4.71	-4.89	-5.07	-5.27	-5.47	-5.74	-6.01	-6.19	-6.36	-6.50	-6.65	-6.92	-7.20
O9	-4.50	-4.70	-4.90	-5.10	-5.30	-5.60	-5.90	-6.10	-6.30	-6.45	-6.60	-6.90	-7.20
O9.5	-4.27	-4.47	-4.66	-4.88	-5.10	-5.43	-5.77	-5.99	-6.21	-6.38	-6.55	-6.88	-7.20
B0	-4.00	-4.20	-4.40	-4.65	-4.90	-5.25	-5.60	-5.85	-6.10	-6.30	-6.50	-6.85	-7.20
B0.5	-3.67	-3.92	-4.17	-4.45	-4.73	-5.06	-5.39	-5.69	-5.98	-6.21	-6.44	-6.82	-7.20
B1	-3.30	-3.60	-3.90	-4.20	-4.50	-4.85	-5.20	-5.55	-5.90	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B1.5	-2.91	-3.22	-3.53	-3.83	-4.12	-4.60	-5.08	-5.48	-5.89	-6.14	-6.39	-6.80	-7.20
B2	-2.50	-2.80	-3.10	-3.40	-3.70	-4.35	-5.00	-5.45	-5.90	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B2.5	-2.08	-2.38	-2.68	-3.01	-3.33	-4.12	-4.90	-5.40	-5.90	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B3	-1.70	-2.00	-2.30	-2.65	-3.00	-3.90	-4.80	-5.35	-5.90	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B3.5	-1.39	-1.67	-1.96	-2.31	-2.65	-3.70	-4.74	-5.32	-5.91	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B4	-1.15	-1.41	-1.66	-1.98	-2.31	-3.50	-4.70	-5.31	-5.92	-6.16	-6.40	-6.80	-7.20
B4.5	-0.96	-1.18	-1.40	-1.69	-1.98	-3.32	-4.66	-5.29	-5.92	-6.16	-6.40	-6.80	-7.20
B5	-0.80	-1.00	-1.20	-1.45	-1.70	-3.15	-4.60	-5.25	-5.90	-6.15	-6.40	-6.80	-7.20
B5.5	-0.65	-0.85	-1.04	-1.26	-1.48	-2.99	-4.51	-5.18	-5.85	-6.12	-6.40	-6.80	-7.20
B6	-0.50	-0.70	-0.90	-1.10	-1.30	-2.85	-4.40	-5.10	-5.80	-6.10	-6.40	-6.80	-7.20
B6.5	-0.35	-0.55	-0.75	-0.95	-1.15	-2.73	-4.31	-5.05	-5.79	-6.09	-6.40	-6.80	-7.20
B7	-0.20	-0.40	-0.60	-0.80	-1.00	-2.60	-4.20	-5.00	-5.80	-6.10	-6.40	-6.80	-7.20
B7.5	-0.06	-0.26	-0.46	-0.66	-0.85	-2.46	-4.06	-4.93	-5.81	-6.10	-6.40	-6.80	-7.20
B8	0.10	-0.10	-0.30	-0.50	-0.70	-2.30	-3.90	-4.85	-5.80	-6.10	-6.40	-6.80	-7.20
B8.5	0.30	0.10	-0.10	-0.32	-0.55	-2.14	-3.74	-4.75	-5.76	-6.08	-6.40	-6.80	-7.20
B9	0.50	0.30	0.10	-0.15	-0.40	-2.00	-3.60	-4.65	-5.70	-6.05	-6.40	-6.80	-7.20
B9.5	0.66	0.46	0.26	0.00	-0.25	-1.87	-3.49	-4.55	-5.61	-6.00	-6.40	-6.80	-7.20
A0	0.80	0.60	0.40	0.15	-0.10	-1.75	-3.40	-4.45	-5.50	-5.95	-6.40	-6.80	-7.20
A0.5	0.96	0.75	0.55	0.30	0.06	-1.62	-3.29	-4.34	-5.39	-5.90	-6.40	-6.79	-7.19
A1	1.10	0.90	0.70	0.45	0.20	-1.50	-3.20	-4.25	-5.30	-5.85	-6.40	-6.80	-7.20

A1.5	1.21	1.01	0.82	0.57	0.32	-1.41	-3.14	-4.19	-5.24	-5.82	-6.40	-6.83	-7.25
A2	1.30	1.10	0.90	0.65	0.40	-1.35	-3.10	-4.15	-5.20	-5.80	-6.40	-6.85	-7.30
A2.5	1.40	1.17	0.95	0.70	0.45	-1.30	-3.05	-4.10	-5.15	-5.77	-6.40	-6.85	-7.31
A3	1.50	1.25	1.00	0.75	0.50	-1.25	-3.00	-4.05	-5.10	-5.75	-6.40	-6.85	-7.30
A3.5	1.60	1.34	1.08	0.82	0.56	-1.20	-2.96	-4.01	-5.06	-5.74	-6.41	-6.87	-7.32
A4	1.70	1.44	1.18	0.91	0.63	-1.15	-2.94	-3.98	-5.03	-5.73	-6.43	-6.90	-7.37
A4.5	1.80	1.55	1.29	1.01	0.72	-1.10	-2.92	-3.97	-5.01	-5.74	-6.46	-6.95	-7.43
A5	1.90	1.65	1.40	1.10	0.80	-1.05	-2.90	-3.95	-5.00	-5.75	-6.50	-7.00	-7.50
A5.5	2.00	1.74	1.49	1.18	0.88	-1.00	-2.88	-3.94	-4.99	-5.77	-6.55	-7.05	-7.56
A6	2.10	1.83	1.56	1.26	0.96	-0.95	-2.85	-3.92	-4.99	-5.80	-6.60	-7.11	-7.61
A6.5	2.20	1.92	1.63	1.33	1.03	-0.90	-2.82	-3.91	-5.00	-5.82	-6.65	-7.15	-7.66
A7	2.30	2.00	1.70	1.40	1.10	-0.85	-2.80	-3.90	-5.00	-5.85	-6.70	-7.20	-7.70
A7.5	2.39	2.09	1.78	1.47	1.17	-0.81	-2.78	-3.89	-5.01	-5.87	-6.74	-7.24	-7.74
A8	2.48	2.17	1.87	1.55	1.23	-0.77	-2.77	-3.89	-5.01	-5.90	-6.78	-7.28	-7.77
A8.5	2.56	2.26	1.95	1.63	1.30	-0.73	-2.75	-3.88	-5.02	-5.92	-6.81	-7.31	-7.81
A9	2.65	2.34	2.04	1.70	1.36	-0.69	-2.74	-3.88	-5.02	-5.93	-6.84	-7.34	-7.84
A9.5	2.72	2.42	2.13	1.78	1.43	-0.65	-2.72	-3.87	-5.01	-5.94	-6.87	-7.37	-7.87
F0	2.80	2.50	2.20	1.85	1.50	-0.60	-2.70	-3.85	-5.00	-5.95	-6.90	-7.40	-7.90
F0.5	2.87	2.57	2.26	1.92	1.58	-0.55	-2.67	-3.83	-4.98	-5.95	-6.93	-7.43	-7.93
F1	2.95	2.63	2.32	1.98	1.65	-0.50	-2.65	-3.80	-4.95	-5.95	-6.95	-7.46	-7.96
F1.5	3.02	2.69	2.36	2.04	1.73	-0.45	-2.62	-3.77	-4.93	-5.95	-6.98	-7.48	-7.98
F2	3.10	2.75	2.40	2.10	1.80	-0.40	-2.60	-3.75	-4.90	-5.95	-7.00	-7.50	-8.00
F2.5	3.18	2.81	2.44	2.15	1.86	-0.36	-2.59	-3.73	-4.88	-5.95	-7.02	-7.51	-8.01
F3	3.26	2.87	2.47	2.19	1.92	-0.34	-2.59	-3.72	-4.86	-5.95	-7.04	-7.52	-8.01
F3.5	3.34	2.92	2.50	2.23	1.96	-0.32	-2.59	-3.72	-4.84	-5.95	-7.05	-7.53	-8.01
F4	3.43	2.98	2.54	2.26	1.99	-0.30	-2.59	-3.71	-4.83	-5.95	-7.07	-7.54	-8.00
F4.5	3.51	3.04	2.57	2.28	2.00	-0.30	-2.60	-3.71	-4.81	-5.95	-7.08	-7.54	-8.00
F5	3.60	3.10	2.60	2.30	2.00	-0.30	-2.60	-3.70	-4.80	-5.95	-7.10	-7.55	-8.00
F5.5	3.69	3.16	2.63	2.31	1.98	-0.31	-2.60	-3.69	-4.79	-5.95	-7.12	-7.56	-8.00
F6	3.77	3.22	2.67	2.31	1.94	-0.32	-2.59	-3.68	-4.77	-5.96	-7.14	-7.58	-8.02
F6.5	3.86	3.28	2.70	2.30	1.89	-0.34	-2.57	-3.66	-4.76	-5.96	-7.16	-7.59	-8.03
F7	3.94	3.34	2.74	2.29	1.83	-0.36	-2.55	-3.64	-4.74	-5.96	-7.18	-7.61	-8.05
F7.5	4.02	3.40	2.77	2.27	1.76	-0.38	-2.53	-3.62	-4.72	-5.96	-7.19	-7.63	-8.07
F8	4.10	3.45	2.80	2.24	1.69	-0.41	-2.50	-3.60	-4.70	-5.95	-7.20	-7.65	-8.10
F8.5	4.18	3.50	2.83	2.22	1.60	-0.43	-2.47	-3.57	-4.68	-5.94	-7.20	-7.67	-8.13
F9	4.25	3.55	2.85	2.19	1.52	-0.46	-2.44	-3.55	-4.65	-5.93	-7.20	-7.68	-8.16
F9.5	4.33	3.60	2.88	2.16	1.44	-0.49	-2.42	-3.52	-4.63	-5.91	-7.20	-7.69	-8.18
G0	4.40	3.65	2.90	2.13	1.36	-0.52	-2.40	-3.50	-4.60	-5.90	-7.20	-7.70	-8.20
G0.5	4.48	3.70	2.93	2.10	1.28	-0.56	-2.39	-3.48	-4.57	-5.89	-7.20	-7.70	-8.21

G1	4.55	3.75	2.95	2.08	1.21	-0.59	-2.39	-3.47	-4.55	-5.87	-7.20	-7.70	-8.21
G1.5	4.63	3.80	2.98	2.06	1.15	-0.62	-2.40	-3.46	-4.52	-5.86	-7.20	-7.70	-8.20
G2	4.70	3.85	3.00	2.05	1.10	-0.65	-2.40	-3.45	-4.50	-5.85	-7.20	-7.70	-8.20
G2.5	4.77	3.89	3.02	2.04	1.06	-0.67	-2.40	-3.44	-4.48	-5.84	-7.20	-7.70	-8.20
G3	4.84	3.94	3.04	2.04	1.04	-0.68	-2.40	-3.43	-4.46	-5.84	-7.21	-7.70	-8.20
G3.5	4.90	3.98	3.05	2.04	1.02	-0.69	-2.39	-3.42	-4.45	-5.83	-7.21	-7.71	-8.20
G4	4.97	4.02	3.07	2.04	1.01	-0.69	-2.39	-3.41	-4.43	-5.82	-7.21	-7.71	-8.20
G4.5	5.03	4.06	3.08	2.04	1.01	-0.69	-2.39	-3.41	-4.42	-5.81	-7.21	-7.71	-8.20
G5	5.10	4.10	3.10	2.05	1.00	-0.70	-2.40	-3.40	-4.40	-5.80	-7.20	-7.70	-8.20
G5.5	5.17	4.15	3.12	2.06	0.99	-0.71	-2.41	-3.40	-4.38	-5.78	-7.18	-7.69	-8.19
G6	5.25	4.19	3.14	2.06	0.98	-0.72	-2.43	-3.40	-4.36	-5.76	-7.16	-7.67	-8.18
G6.5	5.33	4.24	3.16	2.06	0.97	-0.74	-2.45	-3.40	-4.34	-5.73	-7.12	-7.64	-8.16
G7	5.41	4.29	3.18	2.06	0.95	-0.76	-2.47	-3.40	-4.32	-5.71	-7.09	-7.62	-8.15
G7.5	5.50	4.35	3.19	2.06	0.93	-0.78	-2.49	-3.40	-4.31	-5.68	-7.05	-7.58	-8.12
G8	5.60	4.40	3.20	2.05	0.90	-0.80	-2.50	-3.40	-4.30	-5.65	-7.00	-7.55	-8.10
G8.5	5.70	4.45	3.20	2.04	0.87	-0.82	-2.51	-3.40	-4.30	-5.62	-6.95	-7.51	-8.07
G9	5.81	4.50	3.20	2.02	0.83	-0.84	-2.51	-3.40	-4.30	-5.60	-6.90	-7.47	-8.03
G9.5	5.91	4.55	3.20	2.01	0.81	-0.85	-2.50	-3.40	-4.30	-5.57	-6.85	-7.42	-7.98
K0	6.00	4.60	3.20	2.00	0.80	-0.85	-2.50	-3.40	-4.30	-5.55	-6.80	-7.35	-7.90
K0.5	6.09	4.64	3.20	2.00	0.81	-0.85	-2.50	-3.40	-4.30	-5.52	-6.75	-7.27	-7.80
K1	6.20	4.70	3.20	2.00	0.80	-0.85	-2.50	-3.40	-4.30	-5.50	-6.70	-7.20	-7.70
K1.5	6.35	4.78	3.20	1.98	0.76	-0.87	-2.50	-3.40	-4.30	-5.48	-6.65	-7.15	-7.64
K2	6.50	4.85	3.20	1.95	0.70	-0.90	-2.50	-3.40	-4.30	-5.45	-6.60	-7.10	-7.60
K2.5	6.60	4.90	3.20	1.92	0.65	-0.92	-2.49	-3.39	-4.29	-5.42	-6.55	-7.05	-7.55
K3	6.70	4.95	3.20	1.90	0.60	-0.95	-2.50	-3.40	-4.30	-5.40	-6.50	-7.00	-7.50
K3.5	6.84	5.02	3.21	1.88	0.56	-1.00	-2.55	-3.45	-4.35	-5.40	-6.46	-6.96	-7.46
K4	7.00	5.11	3.21	1.86	0.50	-1.05	-2.60	-3.50	-4.40	-5.40	-6.40	-6.90	-7.40
K4.5	7.15	5.18	3.22	1.81	0.41	-1.10	-2.61	-3.51	-4.41	-5.36	-6.30	-6.80	-7.30
K5	7.30	5.27	3.23	1.77	0.30	-1.15	-2.60	-3.50	-4.40	-5.30	-6.20	-6.70	-7.20
K5.5	7.49	5.37	3.25	1.73	0.21	-1.20	-2.61	-3.51	-4.41	-5.27	-6.12	-6.62	-7.12
K6	7.70	5.48	3.27	1.70	0.14	-1.25	-2.64	-3.53	-4.43	-5.25	-6.07	-6.57	-7.06
K6.5	7.91	5.60	3.29	1.68	0.07	-1.30	-2.67	-3.57	-4.46	-5.25	-6.03	-6.53	-7.02
K7	8.10	5.71	3.32	1.66	0.00	-1.35	-2.70	-3.60	-4.50	-5.25	-6.00	-6.50	-7.00
K7.5	8.25	5.80	3.35	1.63	-0.08	-1.40	-2.72	-3.63	-4.53	-5.25	-5.96	-6.47	-6.98
K8	8.37	5.88	3.39	1.61	-0.17	-1.45	-2.73	-3.65	-4.56	-5.24	-5.92	-6.45	-6.97
K8.5	8.48	5.95	3.43	1.58	-0.27	-1.51	-2.74	-3.66	-4.58	-5.23	-5.88	-6.42	-6.96
K9	8.59	6.03	3.48	1.55	-0.37	-1.56	-2.75	-3.68	-4.60	-5.22	-5.84	-6.40	-6.95
K9.5	8.73	6.13	3.54	1.53	-0.49	-1.63	-2.77	-3.69	-4.60	-5.21	-5.82	-6.37	-6.93
M0	8.90	6.25	3.60	1.50	-0.60	-1.70	-2.80	-3.70	-4.60	-5.20	-5.80	-6.35	-6.90

M0.5	9.13	6.40	3.67	1.48	-0.71	-1.78	-2.84	-3.72	-4.59	-5.19	-5.80	-6.33	-6.86
M1	9.40	6.58	3.75	1.48	-0.80	-1.85	-2.90	-3.75	-4.60	-5.20	-5.80	-6.30	-6.80
M1.5	9.71	6.77	3.84	1.50	-0.85	-1.90	-2.96	-3.81	-4.65	-5.23	-5.80	-6.27	-6.74
M2	10.00	6.97	3.93	1.52	-0.90	-1.95	-3.00	-3.85	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M2.5	10.24	7.14	4.03	1.52	-0.99	-1.99	-3.00	-3.85	-4.71	-5.25	-5.80	-6.25	-6.69
M3	10.50	7.32	4.13	1.57	-1.00	-2.00	-3.00	-3.85	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M3.5	10.88	7.56	4.25	1.70	-0.85	-1.95	-3.05	-3.87	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M4	11.50	7.93	4.36	1.88	-0.60	-1.85	-3.10	-3.90	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M4.5	12.44	8.46	4.48	2.07	-0.34	-1.73	-3.11	-3.91	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M5	13.50	9.05	4.61	2.25	-0.10	-1.60	-3.10	-3.90	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M5.5	14.46	9.60	4.73	2.42	0.11	-1.49	-3.09	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M6	15.29	10.08	4.87	2.58	0.29	-1.40	-3.08	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M6.5	16.01	10.51	5.00	2.72	0.44	-1.32	-3.07	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M7	16.62	10.88	5.14	2.85	0.56	-1.25	-3.07	-3.88	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M7.5	17.15	11.22	5.28	2.97	0.67	-1.20	-3.07	-3.88	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M8	17.61	11.51	5.42	3.09	0.75	-1.16	-3.07	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M8.5	18.01	11.79	5.56	3.20	0.83	-1.13	-3.08	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M9	18.36	12.04	5.71	3.30	0.89	-1.10	-3.09	-3.89	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M9.5	18.69	12.27	5.85	3.40	0.95	-1.07	-3.09	-3.90	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70
M10	19.00	12.50	6.00	3.50	1.00	-1.05	-3.10	-3.90	-4.70	-5.25	-5.80	-6.25	-6.70

В проинтерполированной таблице Страйжиса 131 строка и 13 колонок данных; всего 1703 ячейки.

Для всех звезд в количестве 13950, выбранных из каталога Hipparcos, был произведен подсчет их количества при каждом сочетании спектрального класса, класса светимости и направления в Галактике. В качестве направлений в Галактике были выбраны центры площадок, для которых Арену, Грено и Гомец [1992] подготовили данные для создания трехмерной модели межзвездного поглощения в Галактике. Они разбили всю небесную сферу на 199 площадок (площадки AGG) и для каждой из них задали формулу и определили параметры этой формулы. Параметрами являются галактические координаты сторон площадок и четыре числа α , β , γ и r_0 . Если расстояние до звезды равно d , то

$$A_v = \alpha d + \beta d^2 \text{ при } d \leq r_0 \text{ и}$$

$$A_v = \alpha r_0 + \beta r_0^2 + \gamma(d - r_0) \text{ при } d > r_0$$

Мы рассчитали для каждой из этих 199 площадок число звезд до $H_p = 7,0$ из каталога Hipparcos для каждого сочетания спектрального класса и класса светимости. Результаты были собраны в 199 файлов, каждый из которых имел вид таблицы из 14 колонок (14 вариантов классов светимости) и 131 строки (это 131 вариант спектрального класса). Формат таких таблиц совпадал с форматом проинтерполированной таблицы Страйжиса. Очевидно, что в каждой ячейке этих таблиц стоит либо ноль, либо число звезд примерно одинаковой абсолютной величины.

Для расчета ожидаемого количества звезд используются предельные величины для каждого сочетания спектрального подкласса и класса светимости.

Таблицы предельных величин, приведенные в Приложении «Е», для каждого из пяти основных классов светимости: V, IV, III, II и Iab, и для двух вариантов измерений (одно измерение с отношением сигнала к шуму 100 и 100 измерений с отношением сигнала к шуму 100) были проинтерполированы на те спектральные подклассы, которых не было в исходных таблицах Пиклса, а затем проинтерполированы и на половинные значения классов светимости. Интерполяция между спектральными подклассами производилась взвешенным методом наименьших квадратов (Weighted Least-Squares), реализованном в составе вычислительных средств графо-вычислительного пакета AXUM-5 (продукт Math-Soft inc.). Интерполяция между классами светимости производилась линейно. В результате для каждого из двух вариантов измерений были получены таблицы, содержащие 131 строку (131 вариант спектрального класса) и 70 столбцов (по пять столбцов на каждый из 14 вариантов полос фотометрической системы «Лира-Б»).

Далее расчет велся последовательно для каждой полосы фотометрической системы (для каждого фильтра). В вычислительной программе организован тройной цикл по площадкам AGG (от 1 до 199), по спектральным подклассам (от 1 до 131) и по комбинациям классов светимости и фильтров (от 1 до 65, по 5 колонок для каждого из 13 фильтров; из двух вариантов панхроматического фильтра рассматривался только вариант с толщиной подложки 30 мкм). Результаты для каждого фильтра записываются в 199 файлов.

Сначала для каждого сочетания площадки AGG, спектрального подкласса и подкласса светимости производился выбор параметров площадки AGG и предельной звездной величины, а затем вызывалась подпрограмма, которая считывала количество звезд каталога Hipparcos в направлении данной площадки и абсолютную звездную величину из таблицы Страйжиса для данного сочетания спектрального подкласса и подкласса светимости. Теперь можно было вычислить предельное расстояние d_7 для абсолютной звездной величины, соответствующей видимой величине $V = 7^m$ (по которой «обрезана» наша выборка из каталога Hipparcos) и предельное расстояние d_{lim} , соответствующее предельной видимой величине $V = V_{\text{lim}}$, из таблиц, помещенных в Приложение «Е». Для этого решалось одно из двух трансцендентных уравнений:

$$\lg d - 0,2(V_{\text{lim}} - M_V + 5) - 0,2(\alpha d + \beta d^2) = 0 \quad \text{при } d \leq r_0 \text{ или}$$

$$\lg d - 0,2(V_{\text{lim}} - M_V + 5) - 0,2(\alpha r_0 + \beta r_0^2 + \gamma d - \gamma r_0) = 0 \quad \text{при } d > r_0 .$$

Уравнения решались методом подбора.

Когда определены предельные расстояния d_7 и d , то можно проводить экстраполяцию, согласно следующему алгоритму, поясняемому рисунком «Ж1».

некоторую площадку AGG. Приходящее к нам излучение звезд, находящихся в площадке, заключено в пределах телесного угла, охватывающего эту площадку.

Пусть плотность звезд в центре нашей «цилиндрической» галактики равно ρ_C . На луче зрения, соединяющем Солнце и центр выбранного малого участка, выберем произвольную точку А на расстоянии d от Солнца. Эта точка имеет галактические координаты B и L . Точка А проектируется на галактическую плоскость в точку Р. Расстояние $OP = d' = d \cos B$, а расстояние $CP = R = \sqrt{(d')^2 + R_0^2 - 2d'R_0 \cos L}$. В точке Р плотность звезд составит $\rho_P = \rho_C \exp(-R/S_R)$, а в точке А, находящейся на высоте $h = d' \sin B$ над плоскостью галактики,

$$\begin{aligned} \rho_A(L, B, d) &= \rho_P(L, R, d) \times \left(0,9e^{-\frac{h}{S_h}} + 0,1e^{-\frac{h}{S_h}} \right) = \\ &= \rho_C \times e^{-\frac{R}{S_R}} \times \left(0,9e^{-\frac{h}{S_h}} + 0,1e^{-\frac{h}{S_h}} \right) \end{aligned}$$

Полное число звезд в телесном угле, охватывающем выбранную площадку AGG, в объеме от Солнца до расстояния d выразится как тройной интеграл по расстоянию, галактической широте и галактической долготе. С учетом перевода ΔB и ΔL в линейную меру получим:

$$\begin{aligned} \int_{L_1}^{L_2} \int_{B_1}^{B_2} \int_0^d \rho_A dL dB d^2 \cos B dd &= \\ &= \rho_C \int_{L_1}^{L_2} \int_{B_1}^{B_2} \int_0^d e^{-\frac{R}{S_R}} \times \left(0,9e^{-\frac{h}{S_h}} + 0,1e^{-\frac{h}{S_h}} \right) dL dB d^2 \cos B dd \end{aligned}$$

Очевидно, что, интегрируя до расстояния d_7 , мы должны получить число звезд N_7 , находящихся в каталоге Hipparcos, обрезанном по 7-й величине, а интегрируя до расстояния d_{lim} , получим искомое число звезд данного спектрального класса и класса светимости до соответствующей предельной звездной величины.

$$N_{\text{lim}} = N_7 \frac{\rho_C \int_{L_1}^{L_2} \int_{B_1}^{B_2} \int_0^{d_7} e^{-\frac{R}{S_R}} \times \left(0,9e^{-\frac{h}{S_R}} + 0,1e^{-\frac{h}{S_R}} \right) dL dB d^2 \cos B dd}{\rho_C \int_{L_1}^{L_2} \int_{B_1}^{B_2} \int_0^d e^{-\frac{R}{S_R}} \times \left(0,9e^{-\frac{h}{S_R}} + 0,1e^{-\frac{h}{S_R}} \right) dL dB d^2 \cos B dd}$$

Заметим, что неизвестная плотность в центре Галактики ρ_C сокращается.

В результате вычислений было получено количество звезд в каждой из площадок AGG с подразбиением на комбинации спектрального класса и класса светимости.

Для наглядного представления результатов для каждой полосы фотометрической системы «Ли́ра-Б» сначала были объединены данные для всех площадок, затем были сложены воедино все спектральные подклассы класса О, все подклассы класса В и так далее. В классе М отдельно были сложены подклассы от М0 до М4 и подклассы от М5 до М9. И, наконец, под именем «класс светимости V» были объединены подклассы светимости V, IV-V и IV, под именем «класс светимости III» были объединены подклассы III-IV, III и II-III, и под именем «класс светимости I» были объединены все остальные подклассы, то есть II, Ib-II, Ib, Iab-Ib, Iab, Ia-Iab и Ia. Найденные количества звезд были разделены на площадь небесной сферы, чтобы получить среднее количество звезд на квадратный градус.

Результат сложения по группам спектральных классов и классов светимости показан в таблице Ж2. В таблице 14 блоков. Каждый блок имеет заголовок с названием полосы. Числовые данные в ячейках – это среднее количество звезд на квадратный градус. В первом столбце – наименование спектрального класса, в столбцах 2, 3, 4 и 5 количество звезд на квадратный градус, соответственно, для классов светимости V, III, I, и их сумма для случая наблюдений с отношением сигнала к шуму более 100; в столбцах 6, 7, 8 и 9 аналогичные данные для случая наблюдений с отношением сигнала к шуму более 10.

Таблица Ж2

Полоса «195»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,281	0,002	0,022	0,305	1,200	0,010	0,030	1,240
B	0,808	0,182	0,100	1,089	38,226	8,087	1,046	47,359
A	0,207	0,029	0,003	0,239	21,421	2,277	0,143	23,841
F	0,006	0,002	0,000	0,009	1,781	0,345	0,018	2,144
G	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,001	0,000	0,017
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
M1-M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
M5-M9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,002

Полоса «218»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,439	0,003	0,024	0,466	1,206	0,010	0,030	1,245
B	1,324	0,295	0,159	1,779	50,446	11,895	1,094	63,434
A	0,407	0,057	0,006	0,470	30,487	4,049	0,192	34,728
F	0,031	0,008	0,001	0,041	5,293	1,035	0,066	6,395
G	0,001	0,000	0,000	0,001	0,154	0,031	0,004	0,190
K	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
M1-M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001
M5-M9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,000	0,003

Полоса «270»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,567	0,004	0,028	0,599	1,207	0,010	0,030	1,247
B	2,081	0,533	0,346	2,961	61,586	17,042	1,147	79,775
A	0,937	0,141	0,014	1,093	54,278	7,781	0,279	62,338
F	0,206	0,039	0,006	0,250	23,811	3,012	0,338	27,161
G	0,020	0,010	0,002	0,033	3,070	0,704	0,082	3,856
K	0,001	0,005	0,000	0,006	0,147	0,465	0,011	0,623
M1-M4	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,000	0,047
M5-M9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,100	0,000	0,101

Полоса «350»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,516	0,005	0,027	0,549	1,207	0,010	0,030	1,247
B	2,739	0,768	0,429	3,937	107,758	32,967	1,172	141,897
A	2,466	0,409	0,045	2,920	140,987	22,663	0,869	164,518
F	1,657	0,279	0,042	1,978	157,247	17,041	2,938	177,226
G	0,396	0,295	0,032	0,723	56,813	18,528	2,175	77,515
K	0,060	0,492	0,014	0,565	10,106	32,454	0,663	43,224
M1-M4	0,001	0,056	0,002	0,059	0,275	3,253	0,082	3,609
M5-M9	0,000	0,067	0,001	0,068	0,000	4,050	0,045	4,095

Полоса «374»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,490	0,005	0,027	0,522	1,204	0,010	0,030	1,244
B	3,329	0,970	0,450	4,748	126,038	41,510	1,174	168,721
A	3,775	0,631	0,068	4,473	189,717	32,874	0,999	223,590
F	2,382	0,419	0,073	2,874	197,298	22,965	3,631	223,894
G	0,547	0,417	0,046	1,011	74,339	23,300	2,470	100,108
K	0,087	0,767	0,023	0,877	13,473	45,709	0,978	60,161
M1-M4	0,001	0,102	0,004	0,108	0,479	5,184	0,126	5,7848
M5-M9	0,000	0,123	0,002	0,125	0,000	6,468	0,074	6,5491

Полоса «440»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,820	0,008	0,029	0,857	1,210	0,010	0,030	1,250
B	11,644	3,453	0,811	15,907	361,495	100,649	1,181	463,324
A	19,343	3,223	0,197	22,763	771,351	140,142	1,077	912,570
F	17,114	2,565	0,482	20,161	934,004	114,903	6,169	1055,076
G	6,222	4,799	0,520	11,541	513,424	179,546	6,703	699,673
K	1,902	13,538	0,431	15,871	204,627	498,656	7,430	710,713
M1-M4	0,082	1,958	0,075	2,115	20,217	58,577	1,216	80,010
M5-M9	0,000	0,856	0,038	0,894	0,000	19,100	0,903	20,002

Полоса «550»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,220	0,003	0,024	0,247	1,204	0,010	0,030	1,244
B	3,560	1,049	0,369	4,979	126,038	41,510	1,175	168,721
A	6,855	1,206	0,091	8,152	189,716	32,873	1,000	223,590
F	7,693	1,186	0,225	9,104	197,298	22,965	3,631	223,894
G	3,356	3,568	0,376	7,300	74,339	23,300	2,469	100,108
K	1,362	12,158	0,465	13,984	13,473	45,709	0,978	60,160
M1-M4	0,104	2,198	0,095	2,398	0,478	5,183	0,126	5,788
M5-M9	0,000	0,860	0,052	0,912	0,000	6,647	0,074	6,541

Полоса «700»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,038	0,001	0,014	0,052	1,210	0,010	0,030	1,251
B	1,193	0,374	0,131	1,698	729,448	190,333	1,183	920,963
A	2,490	0,470	0,043	3,003	2631,340	492,807	1,083	3125,231
F	3,458	0,572	0,107	4,137	4415,506	571,890	6,416	4993,813
G	1,788	2,460	0,241	4,489	2809,285	846,809	7,509	3663,605
K	0,978	9,684	0,420	11,082	1924,944	2674,975	8,240	4608,160
M1-M4	0,117	2,644	0,115	2,877	1028,459	99,263	1,421	1129,144
M5-M9	0,000	1,868	0,081	1,949	0,000	27,347	0,974	28,322

Полоса «785»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,079	0,001	0,019	0,099	1,192	0,010	0,030	1,232
B	2,222	0,687	0,231	3,140	117,543	39,970	1,162	158,674
A	5,021	0,931	0,072	6,024	262,755	52,321	1,023	316,100
F	8,314	1,241	0,220	9,775	562,577	65,290	6,026	633,894
G	4,760	5,486	0,561	10,807	429,405	221,871	7,117	658,393
K	2,886	22,976	0,973	26,835	333,459	923,049	8,150	1264,658
M1-M4	0,748	8,307	0,317	9,371	159,807	91,636	1,421	252,863
M5-M9	0,000	8,517	0,588	9,104	0,000	26,894	0,974	27,868

Полоса «825»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,053	0,001	0,017	0,071	1,183	0,010	0,030	1,223
B	1,837	0,571	0,183	2,590	96,918	31,252	1,152	129,323
A	4,211	0,787	0,059	5,057	218,457	41,685	0,975	261,118
F	7,027	1,051	0,196	8,274	495,504	50,460	5,668	551,633
G	4,083	4,988	0,502	9,573	378,781	186,735	6,744	572,261
K	2,541	21,322	0,889	24,753	301,105	787,277	8,072	1096,454
M1-M4	0,694	8,515	0,304	9,513	170,448	90,651	1,420	262,519
M5-M9	0,000	9,922	0,538	10,460	0,000	26,902	0,974	27,877

Полоса «930»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,023	0,001	0,009	0,032	1,132	0,010	0,030	1,172
B	0,995	0,320	0,096	1,410	58,954	19,043	1,120	79,117
A	2,339	0,462	0,040	2,840	142,116	26,752	0,859	169,727
F	4,047	0,655	0,117	4,819	323,852	32,960	5,127	361,939
G	2,454	3,304	0,303	6,061	249,293	137,922	6,137	393,352
K	1,594	15,480	0,673	17,747	205,032	601,929	7,932	814,894
M1-M4	0,532	7,512	0,275	8,319	135,122	87,662	1,419	224,203
M5-M9	0,000	12,215	0,564	12,779	0,000	27,004	0,974	27,979

Полоса «1000»								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	0,011	0,000	0,004	0,016	1,048	0,009	0,030	1,087
B	0,555	0,178	0,052	0,785	37,514	11,895	1,061	50,471
A	1,312	0,261	0,025	1,598	89,718	17,093	0,694	107,505
F	2,238	0,381	0,072	2,691	207,955	22,326	4,191	234,473
G	1,340	2,139	0,185	3,664	157,958	92,628	5,185	255,770
K	0,899	10,156	0,446	11,501	124,344	405,409	7,623	537,376
M1-M4	0,297	5,385	0,230	5,913	84,047	81,344	1,412	166,803
M5-M9	0,000	10,469	0,634	11,103	0,000	26,851	0,974	27,825

Полоса «Панхром», толщина подложки 14 нм								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	1,177	0,010	0,030	1,217	1,211	0,010	0,030	1,251
B 4	49,880	14,753	1,121	65,754	729,448	190,333	1,183	920,963
A 8	83,390	14,382	0,703	98,475	2631,341	492,807	1,083	3125,231
F 1	115,611	13,405	2,706	131,722	4415,506	571,891	6,417	4993,814
G 6	62,764	36,237	3,255	102,256	2809,285	846,809	7,510	3663,605
K 3	31,743	132,603	4,350	168,695	1924,944	2674,975	8,240	4608,160
M1-M4	5,947	33,421	0,940	40,308	1028,459	99,263	1,422	1129,1444
M5-M9	0,000	19,853	0,964	20,816	0,000	27,348	0,974	28,3292

Полоса «Панхром», толщина подложки 30 нм								
спектр. класс	100 наблюдений; S / N = 100				100 наблюдений; S / N = 10			
	V	III	I	всего	V	III	I	всего
O	1,175	0,010	0,030	1,215	1,211	0,010	0,030	1,251
B 5	50,973	14,900	1,110	66,983	735,086	190,660	1,183	926,928
A 8	87,579	15,155	0,704	103,439	2793,990	505,618	1,083	3300,691
F 2	126,297	14,654	3,057	144,008	4723,772	594,344	6,420	5324,536
G 7	70,558	40,357	3,583	114,498	3039,626	895,694	7,510	3942,830
K 3	36,752	149,253	5,100	191,105	2235,905	2813,385	8,241	5057,532
M1-M4	7,642	38,005	1,167	46,815	1300,488	99,583	1,422	1401,493
M5-M9	0,000	21,744	0,973	22,717	0,000	27,389	0,975	28,364

Рисунки, иллюстрирующие результаты расчетов, приведены в основном тексте диссертации в главе 6, раздел 6.2, подраздел 6.5.2.

Список литературы

В списке литературы приняты следующие сокращения названий журналов и периодических изданий:

АЖ – Астрономический журнал

АЦ – Астрономический циркуляр

Известия КрАО – Известия Крымской Астрофизической обсерватории

ПАЖ – Письма в Астрономический журнал

A&Ap – Astronomy and Astrophysics

A&Ap.Suppl. – Astronomy and Astrophysics, Supplement Series

AN – Astronomische Nachrichten.

AJ – Astronomical Journal

ApJ – Astrophysical Journal

ApJS – Astrophysical Journal Supplement

BAAS – Bulletin of the American Astronomical Society

Bol. Obs. Ton. Tac. – Boletín de los observatorios Tonanzintla y Tacubaya

IBVS – Commission 27 of the I.A.U. Information Bulletin on Variable Stars

MNRAS – Monthly Notices of the Royal Astronomical Society

PASP – Publications of the Astronomical Society Pacific

Z. f. Astrophys. – Zeitschrift für Astrophysik

Номер тома везде выделен подчеркнутым полужирным шрифтом.

После номера тома везде, где это требуется, стоит номер страницы.

CCD Sensors Technical Note. Glossary of Terms,

<http://www.e2v.com/e2v/assets/File/documents/imaging-space-and-scientific-sensors/Papers/ccdtn106.pdf>.

- Абелль (G. O. Abell), 1959. // Astron. Soc. Pacif. Lea.ets 8, **121**.
- Адельман-МакКарти и др., (J. K. Adelman-McCarthy, M.A.Agueros, Allam, et al.), 2007. // ApJS. Ser. **172**, 634.
- Ажусенис, Страйжис, 1966а. // Бюллетень Вильнюсской обсерватории. **16**. 3.
- Ажусенис, Страйжис, 1966b. // Бюллетень Вильнюсской обсерватории. **17**. 3.
- Ажусенис, Страйжис, 1969. // АЖ. **46**. 402.
- Алексеев и др., (V. A. Alekseev, V. V. Bokov, V. N. Egorov, et al.), 1991. // Sov. J. Opt. Technol. (Опт.-механ. промышл.) **58**. 390.
- Алексеева Г.А., Архаров А.А., Галкин В.Д., Гаген-Торн Е.И., Никанорова И.Н., Новиков В.В., Новопащенко В.Б., Пахомов В.П. Рубан Е.В., Щеголев Д.Е., 1996. // Baltic Astronomy. **5**. 603 (Пулковский спектрофотометрический каталог).
- Аллен (Allen C.W), 1977. / Астрофизические величины. М., "Мир".
- Амбарцумян, Миронов и Захаров (Ambartsoumian A.R., Mironov A.V., Zakharov A.I.), 2003. // Baltic Astronomy. **12**. P.629–630.
- Апгрэн и Вайс (Urgren A.R., Weis E.W.), 1977. // AJ. **82**. 978.
- Арену, Грено, Гомец (F. Arenou, M. Grenon, A Gomez), 1992. // A&Ap. **258**. 104.
- Батес (Bates D.R.), 1984. // Planetary and Space Science, **32**. 785–790.
- Белетик и др., (J. E. Beletic, J. W. Beletic, and P. Amico), 2006. / Scientific Detectors for Astronomy. 2005, ed. J. E. Beletic (Berlin–Dordrecht: Springer, 2006).
- Бесселль (Bessell M.S.), 1990. // PASP, **102**. 1181.
- Бламонт, Сагдеев (Blamont J. and Sagdeev R.Z.), 1984. // Naturwissenschaften. **71**. 295.

- Бокер и др. (T. Boeker, R. P. van der Marel, S. Laine, et al.), 2002. // AJ. **123**. 1389.
- Бузер, Куруц (Buser R., Kurucz R.L.), 1992. // A&Ap, **264**. 557.
- Ван Бурен (van Bueren H.G.), 1955. // Bull. Astron. Inst. Netherl. **11**. 385.
- Вигру (Vigroux E.), 1953. // Annal. Phys. **8**. 709.
- Ворошилов Ю.В., 1989. // АЦ, №1540, 9.
- Ворошилов Ю.В., Метлов В.Г., 1989. // АЦ, №1541, 7.
- Гал и др. (R. R. Gal, R. R. de Carvalho, S. C. Odewahn, et al.), 2004. // AJ. **128**. 3082
- Галеев А.И., Бикмаев И.Ф., Мусаев Ф.А., Галазутдинов Г.А., 2004. // АЖ, **81**. 541.
- Галкин В.Д., 1986. Исследование теллурического спектра в области длин волн 5000–11000 А. Кандидатская диссертация. // Ленинград, Пулковско.
- Галкин В.Д., Архаров А.А., 1981. // АЖ, **58**. 636.
- Галлуе (Gallouet L.), 1964. // Ann. d'Astrophys. **27**. 23.
- Ганн и др. (J. E. Gunn, M. Carr, C. Rockosi, et al.), 1998. // AJ. **116**. 3040.
- Гершберг Р.Е., 2002. Активность солнечного типа звезд главной последовательности.// Монография. Одесса. Астропринт. 2002.
- Гершберг Р.Е., Кацова М.М., Ловкая М.Н., Теребиж А.В., Шаховская Н.И., 1999. // ApJS. **139**. 555.
- Гилл Ф., Мюррей У., Райт М., 1985. Практическая оптимизация. // М: Мир, стр.188.
- Глизе, Ярайс (Gliese W., Jahreiss H.), 1999. / Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars (CNS3), // CDS, catalogue V/70A.
- Глушкова Е.А., Терещенко В.М., Харитонов А.В., 1984. // АЦ, №1310.
- Глушкова Е.А., Терещенко В.М., 1987. // АЦ, №1500.;
- Глушнев И.Н., Харитонов А.В., Князева Л.Н., Шенаврн В.И., 1992. // A&Ap.Suppl. **92**. 1.

- Голубицкий Б.М., Москаленко Н.И., 1968. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана, **3**. С 346–359.
- Гоуда и др. (N. Gouda, T. Tsujimoto, Y. Kobayashi, et al.), 2003. // Proc. SPIE. 4850, 1161.
- Грегг и др. (M. D. Gregg, D. Silva, J. Rayner, G. Worthey, F. Valdes, A. Pickles, J. Rose, B. Carney, W. Vacca), 2005. / The HST/STIS Next Generation Spectral Library. Proceeding of “The 2005 HST Calibration Workshop”. Eds. A. M. Koekemoer, P. Goudfrooij, & L. L. Dressel. Space Telescope Science Institute.
- Гребель, Робертс (Grebel E.K. and Roberts J.), 1995a. // A&Ap.Suppl. **109**. 293.
- Гребель, Робертс (Grebel E.K. and Roberts J.), 1995b. // A&Ap. Suppl. **109**. 313.
- Грехем, Уорли (A. W. Graham and C. C. Worley), 2008. // MNRAS. **388**. 1708.
- Гущин Г.П., 1963. Исследование атмосферного озона. Ленинград, Гидрометеиздат.
- Дженкнер и др., (H. Jenkner, B. M. Lasker, C. R. Sturch, et al.), 1990. // AJ. **99**. 2082
- Джонсон, Морган (Johnson H.L., Morgan W.W.), 1951. // ApJ, **114**. 522
- Джонсон, Морган (Johnson H.L., Morgan W.W.), 1953. // ApJ, **117**. 313
- Джонсон и др. (Johnson H.L., Mitchell R.I., Latham A.S.), 1967. // Comm. Lunar and Planet. Lab. Univ Arizona, **6**. No. 92, 85.
- Джонсон, Митчелл (Johnson H.L., Mitchell R.I.), 1968. // ApJ, **153**. 313.
- Джонсон, Нуклес (Johnson H.L., Knuckles C.F.), 1955. // ApJ. **122**. 209.
- ESA: 1997. The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200. Vol.1–17.
- ESA: 2000. GAIA: Composition, Formation and Evolution of the Galaxy, Technical Report, ESA-SCI (2000). 4.

- Захаров А.И., Колесниченко Г.Н., Миронов А.В., Николаев Ф.Н., 2008. // Информационно-измерительные и управляющие системы. **6**. № 6, 24–29.
- Захаров А.И., Миронов А.В., Крутяков А.Н., 2000. / "Переменные звезды — ключ к пониманию строения и эволюции Галактики". Международная конференция, посвященная 90-летию со дня рождения Б.В.Кукаркина. 25-29 октября 1999 года, 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.
- Захаров А.В., Миронов А.В., Крутяков А.Н., 2004. // Труды ГАИШ. **70**. – М.: Изд. «Янус-К». С.289–303.
- Захаров, Миронов, Николаев и др., 2013. (Zakharov, A.I., Mironov, A.V., Nikolaev, F.N., Prokhorov, M.E., Tuchin, M.S.) 2013. // Astron. Nachr. **334**. 822–826.
- Захаров А.И., Миронов А.В., Прохоров М.Е., Бирюков, А.В. О.Ю.Стекольников, М.С.Тучин, 2013. АЖ. **90**. №3. С.223–241.
- Захаров, Миронов, Прохоров и др. (Zakharov, A.I., Mironov, A.V., Prokhorov, M.E., Nikolaev, F.N., Tuchin, M.S., Biryukov, A.V.). 2013. // Astron.Nachr. **334**. 827–830.
- Зданавичус К., 1967, канд. диссертация, Вильнюс.
- Зданавичус К., 1970, Бюл. Вильнюсск. астрон. обсерв. №28, 24.
- Зданавичус К., 1975. Бюл. Вильнюсск. астрон. обсерв. №41, 3.
- Зуев В.Е., Комаров В.С., 1986. Современные проблемы атмосферной оптики. Том 1. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. // Ленинград, Гидрометеиздат.
- Зуев В.Е., Креков Г.М., 1986, Современные проблемы атмосферной оптики. Том 2. Оптические модели атмосферы. // Ленинград, Гидрометеиздат.

- Ибукияма, Аримото (Ibukiyama A., Arimoto N.). 2002. // A&Ap. **394**. 927.
- Инн, Танака (Inn E., Tanaka Y.), 1959, Ozone absorptiоne coefficients in the ultraviolet and visible regions. / Amer. Chemic. Soc., Ozone Chemistry and Technology. // Wash. P.263–268.
- Калберла, Керп (P. M. W. Kalberla and J. Kerp), 2009. // Ann. Rev. Astron. and Astrophys. **47**. 27.
- Караченцев и др. (I. D. Karachentsev, V. E. Karachentseva, W. K. Huchtmeier, et al.), 2004. // AJ. **127**. 2031.
- Карпов, Малков, Миронов (Karpov, S. V.; Malkov, O. Yu.; Mironov, A. V.) 2012. // Astrophysical Bulletin, **67**. Issue 1. 82–89.
- Кендалл, Стьюарт (Kendall M. and Stuart A.), 1977. / In The Advanced Theory of Statistics, Vol.1, Chapter 16, // Charles Griffin, London.
- Кейрел де Стробель, Фриель (Cayrel de Strobel G. and Friel E.D.), 1998. / Proceedings of the Second Annual Lowell Observatory Fall Workshop Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates, ed. J.C Hall, // Lowell Observatory. P.93
- Кильпио, Малков, Миронов (Kilpio, E. Yu.; Malkov, O. Yu.; Mironov, A. V). 2012. / 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, **6**. 2012. 31–38.
- Крутяков, Миронов, Захаров. (Krutyakov A.N., Mironov A.V., Zakharov A.I.) 2000. / 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 года. // Изд-во СПбГУ, 2000. 12–15.

- Кобелев В.В., Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Фролов М.С., 1979. // АЦ. №1056. 6–7.
- Козырева В.С., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф., 1981. // АЖ, **58**. 1241.
- Кондратьев К.Я., 1954. Лучистая энергия Солнца. 1954. // Гидрометеиздат. Л.
- Колпаков Ю.К., Магницкий А.К. 1976. .. Приборы и техника эксперимента. **4**. 130.
- Колыхалова О.М., Миронов А.В., Мошкалев В.Г., 1978. // Переменные звезды. **21**. №1. 105–106,
- Корнилов В.Г., 1978. АЦ, №1005.
- 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. Труды ГАИШ, **63**. М.: Изд-во Московского ун-та, 1991. 400 стр. (Тянь-Шаньский фотометрический каталог).
- Корнилов В.Г., Крутяков А.Н., Миронов А.В., 1990. В сб. "Современные технологии в автоматизированных системах научных исследований, обучения и управления". Под ред. В.А.Садовниченко, // М.:Изд. Московского университета. 1990. С.125–128.
- Корнилов, Миронов, Захаров (Kornilov V.G., Mironov A.V., Zakharov A.I.), 1996. // Baltic Astronomy.**5**. No.1–2. 379–390.
- Корнилов В.Г., Миронов А.В., Халиуллин Х.Ф., Черепашук А.М., 1979.// АЦ. №1053. 1–3.
- Корнилов (Kornilov, V.), 2011a. // MNRAS. **417**. 1105.
- Корнилов В.Г., 2011b. // ПАЖ. **37**, 44.
- Корнилов В.Г., Крылов А.В., 1990. // АЖ. **67**, 173.
- Корнилов В.Г., Семенцов В.Н., 1992. // АЖ. **69**.1315

- Крусанова, Миронов, Захаров (Krusanova N.L., Mironov A.V., Zakharov A.I.), 2013. // *Peremennye Zvezdy (Variable Stars)*. **33**. 8.
- Ксу, Страуд, (Xu J.P. and Stroud R.), 1992. *Acousto-Optic Devices: Principles, Design, and Applications*, Wiley Ser. in Pure and Appl. Opt. New-York: Wiley, 1992.
- Кузинс (Cousins A.W.J), 1980a. // *South Africa Astron. Observ. Circ.*, 1. P.166–168.
- Кузинс (Cousins A.W.J), 1980b. // *South Africa Astron. Observ. Circ.*, 1. P.234–256.
- Куруц (Kurucz R.L.), 1979. *ApJS*. // **40**. 1.
- Куруц (Kurucz R.L.), 1993. Model atmospheres and fluxes, published on CDROM's 13.
- Кусакин А.В., Миронов А.В., Мошкалева В.Г., 1991. // *ПАЖ*. **17**. №3. 261–267.
- Кусакин А.В., Миронов А.В., Фролов М.С., 1984. // *АЦ* №1309, 1984, 7–8.
- Кутри и др., (Cutri R.M., Skrutskie M.F., Van Dyk S., Beichman C.A., Carpenter J.M., Chester T., Cambresy L., Evans T., Fowler J., Gizis J., Howard E., Huchra J., Jarrett T., Kopan E.L., Kirkpatrick J.D., Light R.M, Marsh K.A., McCallon H., Schneider S., Stiening R., Sykes M., Weinberg M., Wheaton W.A., Wheelock S., Zacarias N.), 2004. // *The 2MASS All-Sky Catalog of Point Sources*. CDS II/246.
- Ламберт, Редди (Lambert D.L., Reddy B.E.), 2004. // *MNRAS*, **349**. 757.
- Лартер, Гонфалоне (N. Larter and A. Gonfalone), 1996. *International space station. A guide for European users*, ed. B. Battrick (Paris: Europ. Space Agency,).
- Ласкер и др.(B. M. Lasker, C. R. Sturch, B. J. McLean, et al.), 1990a. // *AJ*. **99**. 2019.

- Ласкер и др. (B. M. Lasker, C. R. Sturch, B. J. McLean, et al.), 1990b. // AJ, **99**. 2173.
- Ласкер и др. (B. Lasker, M.G.Lattanzi, B. J. McLean, et al.), 2008. // AJ, **136**. 735.
- Лежен и др. (Th. Lejeune, F. Cuisinier, R. Buser), 1997. // A&Ap.Suppl. **125**. 229.
- Лежен и др. (Th. Lejeune, F. Cuisinier, R. Buser), 1998. // A&Ap.Suppl. **130**. 65.
- ЛИРА, 1999. «Долговременная программа прикладных научных исследований и экспериментов, планируемая для проведения на Российском Сегменте Международной Космической Станции. Техническое задание на космический эксперимент "Многоцветный фотометрический обзор неба».
- Локвуд, Тьюг, Уайт (Lockwood G.W., Tüg H., White N.M.), 1992. // ApJ, **390**. 668.
- Любимков Л.С., 1995. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. // Одесса. "Астропринт".
- Лютый В.М., 1972. Переменные звезды, // **18**. 417.
- Макарова Е.А., Казачевская Т.В., Харитонов А.В., 1994. // Solar Physics, **152**. 195.
- Макарова Е.А., Князева Л.Н., Харитонов А.В., 1989. // АЖ, **66**. 583.
- Макарова Е.А., Харитонов А.В., Казачевская Т.В., 1991. Поток солнечного излучения. // М.: «Наука». Гл. ред. физ.-мат. лит.
- Максутов Д. Д. 1979. Астрономическая оптика // М.: Наука.
- Малков, Миронов, Сичевский (Malkov, Oleg; Mironov, Aleksej; Sichevskij, Sergej), 2011. // Astrophysics and Space Science. **335**. No. 1. 105–111.
- Мартин и др. (D. C. Martin, J. Fanson, D. Schiminovich, et al.), 2005. // Astrophys. J. (Letters) **619**. L1.

- Мартинец, Клотц (P. Martinez and A. Klotz), 1998. A practical guide to CCD astronomy (Cambridge: Cambridge Univ. Press).
- Мартынов Д.Я., 1977. Курс практической астрофизики. Изд.3-е. // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры.
- Марсаков В.А., Шевелев Ю.Г., 1995. // Bull. Inf. CDS, **47**. 13.
- Международная космическая станция. Средства связи.// [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Международная космическая станция](http://ru.wikipedia.org/wiki/Международная_космическая_станция).
- Мейштас Е., Зданавичус К., Страйжис В., Гурклите А., 1975. // Бюллетень Вильнюсской обсерватории, №2, 3.
- Мермийо (Mermilliod J.C.), 1987. // A&Ap.Suppl. **71**. 413. CDS Cat.II/122B.
- Мермийо (Mermilliod J.C.), 1991. Photoelectric Catalogue of Homogeneous Measurements in the UBV system, // Strasbourg Stellar Data Center, S2168.
- Мермийо (Mermilliod J.C.), 1994. // Bull. Inf. CDS 45, 3. CDS Cat. II/193.
- Миронов А.В., 1997. Прецизионная фотометрия. Практические основы прецизионной фотометрии и спектрофотометрии звезд. (Учебное пособие.). // М. Изд-во ТОО “ЭДЭМ”. 1997.Стр. 1-157.
- Миронов А.В., 1998а. 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.
- Миронов А.В., 1998b. // Astron. and Astrophys. Transactions, **15**. 167. (Тезисы).
- Миронов А.В., 2004. ”Физика Космоса”: Труды 33 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 2-6 февраля, 2004 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2004.— С.107–118.

- Миронов А.В., 2008. Основы астрофотометрии. Практические основы фотометрии и астрофотометрии звезд. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008 — 260 с.
- Миронов, Захаров (Mironov A., Zakharov A.), 2002. // *Astrophys. and Space Sci.*, **280**. Issue 1/2. 71–76.
- Миронов А.В., Захаров А.И., 2007. // *Известия КрАО*. **103**. № 3. 218–224.
- Миронов, Захаров, Амбарцумян (Mironov A., Zakharov A., Ambartsumyan A.), 2007. / 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. **36**. 81–83.
- Миронов, Захаров, Николаев (Mironov A.V., Zakharov A.I., Nikolaev F.N.), 2003. // *Baltic Astronomy*. **12**. 589-594.
- Миронов А.В., Захаров А.И., Прохоров М.Е., 2008. / ”Физика Космоса”: Труды 37 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 28 янв.-1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2008. С.105–117.
- Миронов А.В., Захаров А.И., Прохоров М.Е., 2010а./ ”Физика Космоса”: Труды 39 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 1–5 февр. 2010 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2010. С.85–107.
- Миронов, Захаров, Прохоров и др., (Mironov, Alexey V.; Zakharov, Andrey I.; Prokhorov, Mikhail E.; Nikolaev, Fedor N.; Tuchin, Maxim S.), 2010b / “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.

- Миронов А.В., Кардашев Н.С., Гиндилис Л.М., Захаров А.И.,
Кацова М.М., Куимов К.В., Расторгуев А.С., Рудницкий Г.М.,
Тимофеев М.Ю., Сурдин В.Г., Черепашук А.М., Филиппова Л.Н.,
2006. // Бюллетень САО РАН. **60-61**. 62–78.
- Миронов А.В., Крылова М.И., 1998. / Труды IV съезда
Астрономического общества. // Москва: СП. С.153-156.
- Миронов А.В., Пастухова Е.Н., 1980. АЦ. №1119. С.5–7.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Колыхалова О.М., 1981. // Переменные
звезды. Приложение. Т.**4**. №19. С.7–11.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., 1995. // АЖ. **72**. 80–88.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., 1996. // АЖ. **73**. 772–782.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Шугаров С.Ю., 1983а. // АЦ. №1279.
С.6–8.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Шугаров С.Ю. (Mironov A.V.,
Moshkalev V.G., Shugarov S.Ju.), 1983b. // Comiss.27 IAU
Inf.Bull.Var.Stars. No.2438. P.1–3.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Трунковский Е.М., Черепашук А.М.,
1984. // ПАЖ. **10**. 429-433.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф., Черепашук А.М.,
1978.// АЦ. №1003. С. 6–7.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Халиуллин Х.Ф., 1984. // АЦ. №1351.
С.1–4.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В., Колыхалова О.М.,
1995. // Известия Национальной академии наук Республики
Казахстан. Серия физико-математическая. №4, часть I. С 54–64.
- Миронов А.В., Мошкалев В.Г., Харитонов А.В., 1998. // АЖ. **75**. 903-912.
- Миронов А.В., Харитонов А.В., 1998а. // Известия Академии Наук.
Серия физическая. **62**. №.6. 1198.

- Миронов А.В., Харитонов А.В. (Mironov A.V., Kharitonov A.V.), 1998b. / Proceedings of "Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates" Held 5-7 Oct. 1997 at Lowell Observatory. P.149-152.
- Миронов А.В., Харитонов А.В., 2001. – М. Труды ГАИШ. **71**. 94–101.
- Моне и др., (D. G. Monet, S. E. Levine, B. Casian, et al.), 2003. // AJ. **125**. 984.
- Моррисон и др. (J. E. Morrison, S. Roeser, B. McLean, et al.), 2001. // AJ. **121**. 1752.
- Москаленко Н.И., 1968. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. **4**, 777.
- Москаленко Н.И., 1969. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. **5**, 1179.
- Мошкалева В.Г., Халиуллин Х.Ф., 1985. // АЖ, **62**. 393.
- Неккель, Лабс (Neckel H., Labs D.), 1984. // Solar Physics, **90**. 205.
- Никонов В.Б., Куликовский П.Г., 1939, // АЖ, **16**. 54.
- Нордстрем и др. (Nordstrom B., Mayor M., Andersen J., Holmberg J., Pont F., Jorgensen B.R., Olsen E.H., Udry S., Mowlavi N.), 2004. // A&Ap. **419**. 989.
- Ньюберг, Янни (Newberg J.H. and Yanny B), 1997. // ApJS, **113**. 89.
- Ньюберг, Янни (Newberg J.H. and Yanny B), 1998. // ApJ, **499**. L57.
- Оксенбайн, Бишофф (Ochsenbein F., Bishoff M.), 1975. The catalog of stellar identifications. Bull. Inf. CDS, **8**, 2.
- Паудель и др. (S. Paudel, T. Lisker, H. Kuntschner), 2011. // MNRAS. **413**. 1764.
- Перриман (M. A. C. Perryman), 2005. In: Proceedings of the Gaia Symposium "The Three-Dimensional Universe with Gaia", eds. C. Turon, K. S. O'Flaherty, M. A. C. Perryman, ESA SP-576 (Europ. Space Agency). P. 15.
- Пиклс (Pickles A.J.), 1998. // PASP. **110**. 863.

- Попов Г. М., 1988. Современная астрономическая оптика // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит-ры).
- Прохоров М.Е., Миронов А.В., Захаров А.И., 2008. "Физика Космоса": Труды 37 международной студенческой научной конференции, Екатеринбург, 28 янв.-1 февр. 2008 г. — Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2008. С.141–163.
- Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В., 2009. // Труды ИПА РАН. Вып. 20.— СПб.: Наука, 2009. С.336–340.
- Рассел и др. (J. L. Russel, B. M. Lasker, B. J. McLean, et al.), 1990. // AJ. **99**. 2059.
- Райт и др. (Wright, J.T., Marcy, G.W., Butler, R.P., Vogt, S.S.), 2004. // ApJS, **152**. 261.
- Райт и др. (E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, et al.), 2010. // AJ. **140**. 1868.
- Рейд и др. (Reid, C. Brewer, R. J. Brucato, et al.), 1991. // PASP. **103**. 661.
- Роха-Пинто, Масьель (Rocha-Pinto H.J. and Maciel W.J.), 1998. // MNRAS, **298**. 332.
- Самусь и др. (N. N. Samus, O. V. Durlevich, E. V. Kazarovets, et al.), 2011. General Catalog of Variable Stars. GCVS database, vers. 2011. Jan., CDS B/gcvs.
- Сичевский, Миронов, Малков (Sichevskiy, S.G., Mironov, A.V., Malkov, O.Yu.), 2013. // AN. **334**. 832–834.
- Скарлата и др. (S. Scarlata, M. Stiavelli, M. A. Hughes, et al.), 2004. // AJ. **128**. 1124.
- Скрутский и др. (M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al.), 2006. // AJ. **131**. 1163. (Sloan Digital Sky Survey, SDSS)
- Содерблом (Soderblom, D.R.), 1985. // AJ, **90**. 2103.
- Содерблом (Soderblom, D.R.), 1986. // Icarus, **67**. 184.

- Стефанов и др., (Stefanov K.D., Tsukamoto T., Miyamoto A. et al.) 1999. // Nucl. Instrum. Methods A **436**. 182.
- Страйжис В., 1973. Бюллетень Вильнюсской обсерватории, **36**. 3.
- Страйжис В., 1977. Многоцветная фотометрия звезд. Фотометрические системы и методы. // Изд-во «МОКСЛАС», Вильнюс.
- Страйжис и др., 1981. (В.Страйжис, Г.Курилене, З.Свидерскене.) // Бюллетень Вильнюсской обсерватории, **57**. 9.
- Страйжис, Вальяуга (Straižys V., Valiauga G.), 1994. // Baltic Astronomy. **3**. No.3. 282.
- Страйжис, Казлаускас (Straižys V., Kazlauskas A.), 1993. // Baltic Astronomy. **2**. 1. (General photometric catalog of stars observed in the Vilnius system).
- Стюарт (Stewart D.), 1965. // Proc. Inst. Mech. Eng. **180**(15). 371.
- Сухов П.П., Чайчук Р.А., 1984. // Новая техника в астрономии, Л. С.20.
- ТЕСИС: о проекте, http://www.tesis.lebedev.ru/about_tesis.html.
- Терещенко В.М., 1977. // АЖ, **54**. 566.
- Терещенко В.М., 1988. // АЖ, **65**. 1106.
- Тейлор (Taylor B.J.), 1984. // ApJS, **54**. 167.
- Турон (Turon C.), 1999. Post Hipparcos Cosmic Candles. / Heck A., Caputo F. (eds), // Kluwer Academic Publishers. P.1.
- Тьюг, Шмидт-Калер (Tug H., Schmidt-Kaler T.), 1982. // A&Ap, **105**. 400.
- Уамстекер (W. Wamsteker), 1999. // ASP Conf. Ser. **164**. 261.
- Уотсон (C. L. Watson), 2006. / The Society for Astronomical Sciences 25-th Annual Symposium on Telescope Science, eds B. D. Warner, J. L. Foote, D. Mais, D. P.47.
- Уэлш, Стетсон (Welsh D.L., Stetson P.B.), 1993. // AJ, **105**. 1813.
- Фельтцинг и др. (Feltzing S., Holmberg J., Hurley J.R.), 2001. // A&Ap. **377**. 911.
- Флуks и др. (Fluks, M.A., Plez, B., Thé, P.S., de Winter, D., Westerlund, B.E., Steenman, H.C.), 1994. // A&Ap.Suppl. **105**. 311.

- Фриель и др. (Friel E., Cayrel de Strobel G., Chmielewski Y., L  bre A., Bentolila C.), 1993. // A&Ap, **274**. 825.
- Фролов и др. (Frolov M.S., Pastukhova E.N., Mironov A.V., Moshkalev V.G.), 1980. Comiss.27 IAU Inf.Bull.Var.Stars, No.1894, 1980, Dec.19, P.1–4.
- Фролов, Кусакин, Миронов, Мошкалев (Frolov M.S., Kusakin A.V., Mironov A.V., Moshkalev V.G.), 1990. Comiss.27 IAU Inf. Bull. Var. Stars, No.3531, 1990, Oct.24. P.1.
- Халиуллин, Миронов, Мошкалев (Khaliullin Kh., Mironov A.V., Moshkalyov V.G.), 1985. // Astrophys. and Space Sci., **111**. No.2. 291-323. (The New Photometric WBVR System).
- Хардорп (Hardorp J.), 1978. //A&Ap, **63**. 383.
- Хардорп (Hardorp J.), 1980a. //A&Ap, **88**. 334.
- Хардорп (Hardorp J.), 1980b. //A&Ap, **91**. 221.
- Хардорп (Hardorp J.), 1981. //A&Ap, **96**. 123.
- Хардорп (Hardorp J.), 1982. //A&Ap, **105**. 120.
- Хардорп, Тьюг, Шмидт-Калер (Hardorp J., Tueg H., Schmidt-Kaler T.), 1982. // A&Ap, **107**. 311.
- Хардорп, Томкин (Hardorp J., Tomkin J.), 1983. // A&Ap, **127**. 277.
- Харитонов А.В., Глушнева И.Н., Князева Л.Н., 1994. // АЖ, **71**. 657.
- Харитонов А.В., Князева Л.Н., 1997. Частное сообщение.
- Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н., 1978. Сводный спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: «Наука».
- Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н., 1988. Спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: «Наука», 1988. (Алма-Атинский спектрофотометрический каталог, полная версия).

- Харитонов А.В., Терещенко В.М., Князева Л.Н., 2011,
Спектрофотометрический каталог звезд. Издание третье,
дополненное и переработанное. Под ред. В.М.Терещенко. Алматы:
«Казак университеті», 2011.
- Хейес (Hayes D.S.), 1985. Calibration of Fundamental Stellar Quantities.
IAU Symp. No.111. Eds. Hayes D.S. et al. // Dordrecht: Reidel D., 25.
- Хёг и др., (Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T.,
Wycoff G., Bastian U., Schwkendiek P., Wicenec, A.), 2000. The
Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars. // A&Ap, **355**.
L27.
- Хэнсон (Hanson R.B.), 1975. // AJ, **80**. 379.
- Холопов П.Н., 1981. Звездные скопления.// М., Наука.
- Хоуэлл (S. B. Howell), 2006. / Handbook of CCD Astronomy // Cambridge:
Cambridge Univ. Press.
- Хоффлейт, Уоррен (Hoffleit D., Warren Jr W.H.), 1991. The Bright Star
Catalogue, 5th Revised Ed. (Preliminary Version.)
Astronomical Data Center, NSSDC/ADC. V.50
- Хргиан А.Х., 1973. Физика атмосферного озона. // Ленинград,
Гидрометеиздат.
- Цуканова Г. И., Бахолдин А.В., 2012. // Оптич. журн. **5**.15.
- Чен и др. (Chen, Y-Q., Zhao, G. Chinese J.), 2001.// A&Ap, **2**. 151.
- Черепашук, Халиуллин, Корнилов, Миронов (Cheremashchuk A.,
Khaliullin Kh., Kornilov V., Mironov A.), 1994. // Astrophys. and
Space Sci. **217**. No.1–2. P.83–85.
- Шаров А.С., 1956. // АЖ, **33**. 445.
- Щиголев Б.М., 1963. Математическая обработка наблюдений, // М.:
Физматгиз.
- Шустер (Schuster W.J.), 1976. // Rev. Mex. Astron. Astrof., **1**, 327.

Энге (Enge H.A.), 1966. Introduction to Nuclear Physics, Addison–Wesley, Reading, Massachusetts, USA.

Эпштейн и др., (N. Epchtein, B. de Batz, E. Copet, et al.), 1994. // Astrophys. and Space Sci. 217. 3.

Юнгблат (Youngbluth O., Jr.), 1970. // Apply Optics. 9. 321.