

Неточности в спектральной классификации звёзд каталога Tycho-2 Spectral Type

А.А.Смирнов, А.С.Цветков, А.В.Попов

19 декабря 2006 г.

1 Введение

В настоящее время в звездно-астрономических исследованиях широко используется высокоточный каталог положений и собственных движений 2.5 млн. звезд Tycho-2 [1]. Методика его построения заключалась в использовании 167 наземных каталогов XX (и даже XIX) века в качестве первой эпохи и наблюдений спутника Hipparcos в качестве второй. Однако, в отличие от каталога Hipparcos [2], в каталоге Tycho-2 нет данных о параллаксах звезд. В 2003 году вышел каталог Tycho-2 Spectral Type [3], содержащий не только точную фотометрию, но и спектральную классификацию для 351 863 звезд каталога Tycho-2, причем для 165 039 звезд известен класс светимости. Это обстоятельство позволило вычислить для этих звезд спектральные параллаксы [4]. У каталогов Tycho-2 Spectral Type и Hipparcos есть около 107 тысяч общих звезд, по которым можно провести сравнение спектральных параллаксов с тригонометрическими параллаксами. В работе [4] было показано, что приблизительно для 95 % звезд точность полученных спектральных параллаксов составляет от 1 до 5 мсд в зависимости от спектрального класса звезды. Тем не менее, было обнаружено, что для 5 % звезд оценки параллакса сильно различаются. Предварительное исследование причин, приведших к появлению этих рассогласований, произведено в работе [5]. Настоящая работа посвящена дальнейшему изучению этого вопроса.

2 Выборка общих звёзд

Для проведения работы был составлен список общих звезд каталогов Hipparcos и Tycho-2 Spectral Type с учетом нескольких критериев отбора:

- Расстояние по данным Hipparcos должно быть менее 400 пк, так как для звезд с большим расстоянием относительная ошибка определения расстояния превышает 50%;
- В Tycho-2 Spectral Type присутствует фотометрическая информация и полная двумерная спектральная классификация, включая спектраль-

ный класс, подкласс и класс светимости. Мы ограничились рассмотрением только тех звезд, которым в каталоге назначен III или V класс светимости, так как астрофизические характеристики таких звезд хорошо известны [6], и большинство объектов рассматриваемых каталогов принадлежит именно этим классам светимости. Распределение звезд по классам светимости и спектральным классам представлены в таблице 1.

	O	B	A	F	G	K	M
III	0	490	739	495	2 854	9 570	833
V	4	1 819	3 748	8 989	5 175	1 105	35

Таблица 1: Распределение звезд выборки по спектральным классам и классам светимости.

- Пока мы исключили из рассмотрения те звезды, для которых в каталоге Hipparcos установлен флаг кратности, чтобы избежать сложностей с отождествлением фотометрических характеристик каждой компоненты.

В итоге был составлен список из 35 856 звезд, для которых мы проводили вычисления спектральных параллаксов и сравнивали их с тригонометрическими.

3 Метод получения спектральных параллаксов

Расстояние до звезд можно оценить методом спектрального параллакса по следующим формулам [9]:

$$E_{B-V} = (B - V)_{vis} - (B - V)_{tab} \quad (1)$$

$$R = 3.30 + 0.28(B - V)_{tab} + 0.04E_{B-V} \quad (2)$$

$$A_V = RE_{B-V} \quad (3)$$

$$\lg r_{Sp} = 0.2(V - M_{V_{tab}} - A_V + 5) \quad (4)$$

Здесь:

E_{B-V} — избыток цвета;

R — коэффициент, зависящий напрямую от покраснения света, распределения энергии в звёздном спектре и положения звезды в Галактике;

A_V — полное поглощение света линейно зависящее от R . При использовании формул 1 – 3, точность определения этой величины составляет примерно 0.15^m и напрямую зависит от ошибки определения $(B - V)_{tab}$;

r_{Sp} — оценка расстояния до звезды в пк;
 $V, (B - V)_{vis}$ — визуальная звездная величина и показатель цвета звезды. Обе эти величины были взяты из каталога Tycho-2, где они приводятся в своей собственной фотометрической системе;

$M_{V_{tab}}, (B - V)_{tab}$ — табличная абсолютная звездная величина и показатель цвета для звезды данного спектрального класса, полученные на основе астрофизических исследований приведённые в [6]. Эта зависимость проиллюстрирована рис. 1 и 2.

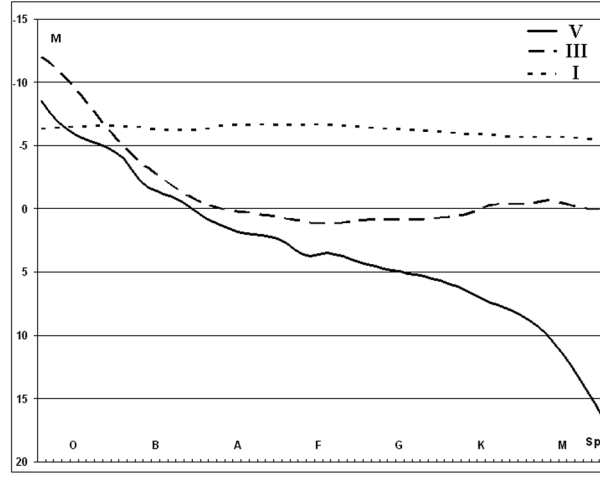


Рис. 1: Зависимость абсолютной звездной величины от спектрального класса.

Данные калибровочные кривые были получены интерполированием по опорным точкам, взятым из [6], [7], [8]. Наиболее современные и точные данные приведены в [6], но в этом источнике нет данных для звезд ранних спектральных классов класса светимости III. Опорные точки для таких звезд были взяты из [8]. Краевые опорные точки (O0–8, M5–M9) были получены экстраполированием, так как в литературе данных по ним нет. В таблице 6 представлены калибровочные данные, на основе которых проводились наши исследования. Следует учесть, что точность величины M_{tab} составляет около 0.5^m , что приводит к относительной ошибке определения спектрального параллакса в 25% [9].

Использование формул (1–4) нуждается в нескольких комментариях.

Во-первых, следует отметить, что для определения табличных величин M_{tab} и $(B - V)_{tab}$ необходимо знать спектральный класс звезды, включая класс светимости.

Во-вторых, третье слагаемое формулы 4 отвечает за межзвездное поглощение, определенное на основе "покраснения" цвета звезды при прохождении ее излучения через среду. В данном виде — это достаточно грубое приближение. Как показало дополнительное исследование, при вычисле-

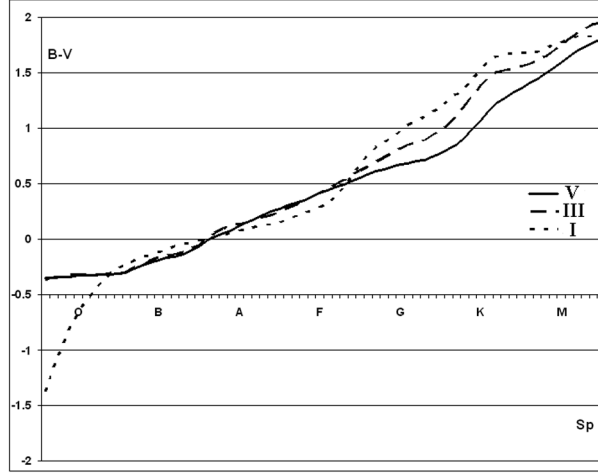


Рис. 2: Зависимость показателя цвета от спектрального класса.

нии величины межзвездного поглощения с помощью формул (1–4) иногда получаются отрицательные значения величины A_V , что, что противоречит физической сути эффекта межзвездного поглощения (т.е. вследствие поглощения, звезда становится более яркой, что, очевидно, невозможно). Появление отрицательных значений может объясняться тем, что калибровочная кривая отражает зависимость показателя цвета от спектрального класса и класса светимости лишь приблизительно. В действительности значения показателей цвета звезд имеют некое случайное распределение относительно этой кривой и могут быть как выше, так и ниже среднего значения. Реальное распределение величины A_V вычисленное таким способом для исследуемых звезд приведено на рис. 3.

При вычислении спектральных параллаксов межзвездное поглощение учитывалось только тогда, когда его величина была больше 0. В противном случае, A_V полагалось равным нулю. Мы надеемся в ближайшем будущем использовать трехмерную модель поглощения света в Галактике [9].

В-третьих, данные о визуальной звездной величине и показателе цвета $B - V$ вычислялись по формулам перевода величин B_T, V_T , приведенных в каталоге Tycho-2, в систему Джонсона-Моргана [2]:

$$V_j = V_T - 0.090(B - V)_T \quad (5)$$

$$(B - V)_j = 0.850(B - V)_T \quad (6)$$

Однако эти редукции не достаточно точны. В [10] показано, что приведенные значения отличаются от истинных, и ошибка приведения $(B - V)_T$ к системе Джонсона может достигать 0.06^m в районе $(B - V)_T \sim 0.5^m$, а

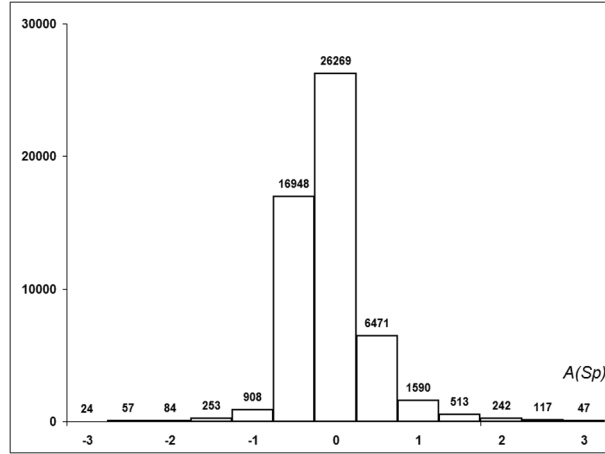


Рис. 3: Распределение величины A_V

в области красных звезд даже до 0.1^m . Редукция V_T в систему Джонсона–Моргана производится с небольшими отклонениями, но в области самых голубых и самых красных звезд достигают $\pm 0.02^m$. Такие ошибки влияют на точность спектральных параллаксов. Но, например, ошибка приведения $(B - V)_T$ к стандартной фотометрической системе в 0.1^m приведёт к ошибке определяемого расстояния всего 13%. Использование величины V_T с ошибкой перевода 0.02^m вносит еще меньшую неточность в результат.

4 Сравнение спектральных и тригонометрических параллаксов

Во всех последующих рассуждениях в качестве меры расстояния мы будем использовать десятичный логарифм расстояния, выраженный в парсеках. Если для оценки расстояния спектральным методом эта величина непосредственно дается формулой 4, то для тригонометрического расстояния она находится из простого выражения:

$$\lg r_{tr} = -\lg \pi \quad (7)$$

где π — тригонометрический параллакс, выраженный в секундах дуги.

Различие расстояний, определяемых разными методами, хорошо иллюстрируется рис. 4 – 9. На диаграммах каждая звезда представляется одной точкой, по оси X отложен логарифм расстояния, определенный тригонометрическим методом, а по оси Y — спектральным методом. Если бы расстояния определялись обоими методами одинаково, то точки выстраивались бы вдоль прямой $y = x$.

Изучение этих диаграмм позволяет сделать три вывода.

1. С увеличением расстояния расхождение растёт в случайном отношении. Так как относительная точность определения спектрального параллакса не должна зависеть от расстояния, то, видимо, причина этого явления заключена в случайных ошибках параллаксов звезд в каталоге Hipparcos.
2. Наблюдается систематическое занижение расстояния, полученного спектральным способом, по сравнению с расстоянием, определенным по тригонометрическому параллаксу, для звезд главной последовательности и обратная картина для звезд-гигантов (особенно характерна диаграмма для спектрального класса G). Причина этого может быть в систематической ошибке спектральной классификации.
3. Существуют звезды со значительными различиями в оценке расстояния, именно они и будут предметом нашего внимания. Предварительные гипотезы этого явления могут быть связаны либо с грубой ошибкой в спектральной классификации каталога Tycho-2 Spectral Type, особенно в классе светимости, либо с погрешностью в учете поглощения света.

Рис. 4 – 9. Сравнение логарифмов расстояний, определенных методом спектрального параллакса и методом тригонометрического параллакса, для звезд разных спектральных классов V (светлые кружки) и III (темные квадраты) классов светимости.

5 Звезды с большим различием расстояний

Общая картина различия расстояний, полученных спектральным и тригонометрическим методом, представлена на рис. 10. Оказалось, что большинство звезд из нашей выборки имеет небольшие различия модуля разности логарифмов расстояний:

$$\Delta \lg r = |\lg r - \lg \pi| \quad (8)$$

Предметом наших исследований являлись звезды, для которых различия расстояний оказались большими.

Мы можем считать, что значение $|\Delta \lg r| > 0.3$ является уже критическим, поскольку оно соответствует различию расстояний примерно в 2 раза. Таких звезд оказалось 4 811, включая звёзды с $|\Delta \lg r| > 1$. Второй список состоит только из 164 звезд с $|\Delta \lg r| > 1$. Для этих звезд оценки расстояний различаются на порядок. Диаграмма логарифмов их расстояний представлена на рис. 11.

Как мы видим это в основном звезды спектрального класса G, K, частично B. Список этих звезд приведен в таблице 5, полный список звезд с $|\Delta \lg r| > 0.3$ представлен в Интернет ¹.

¹<http://astro.pu.ru/astro/win/researches/publications/tsv/tsvetkov-tycho2sp.html>

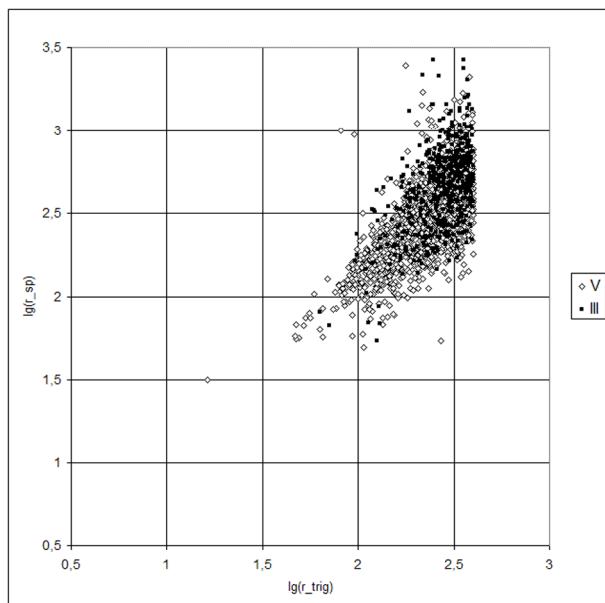


Рис. 4: Спектральный класс B

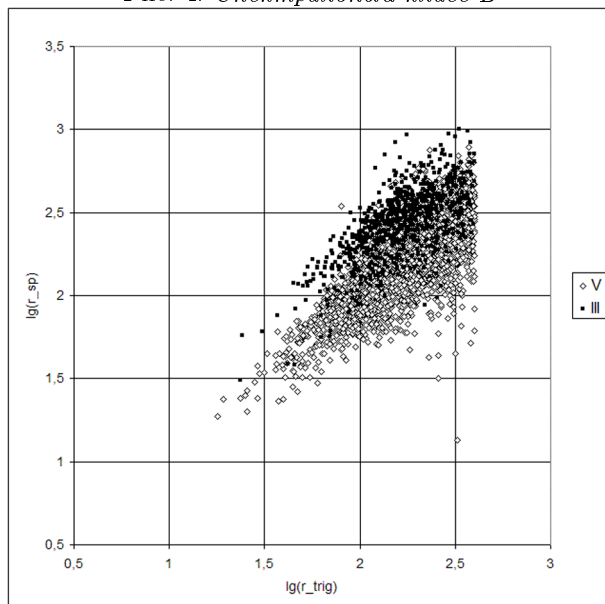


Рис. 5: Спектральный класс A

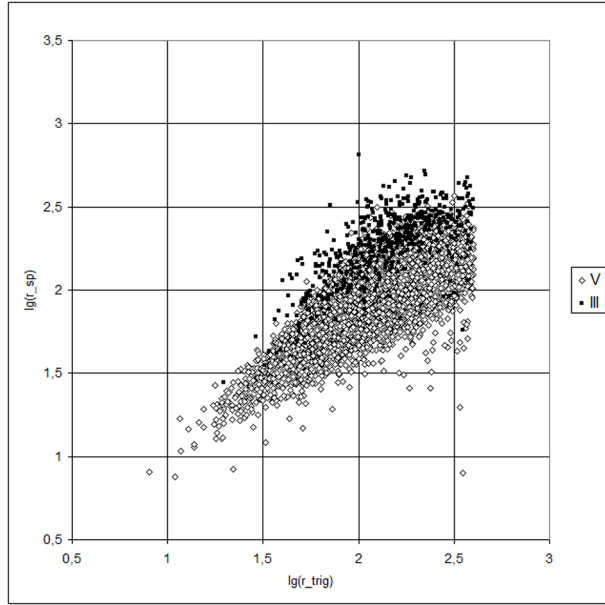


Рис. 6: Спектральный класс F

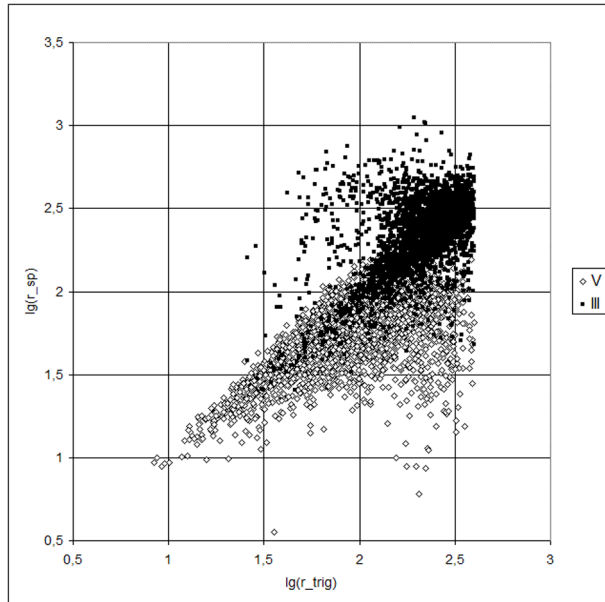


Рис. 7: Спектральный класс G

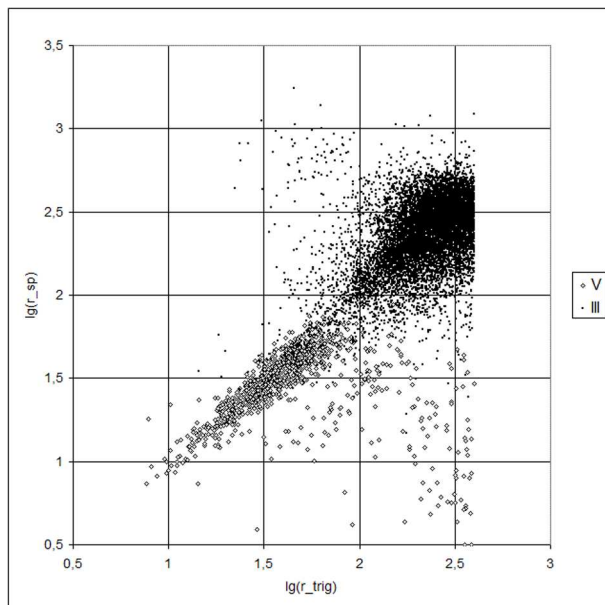


Рис. 8: Спектральный класс K

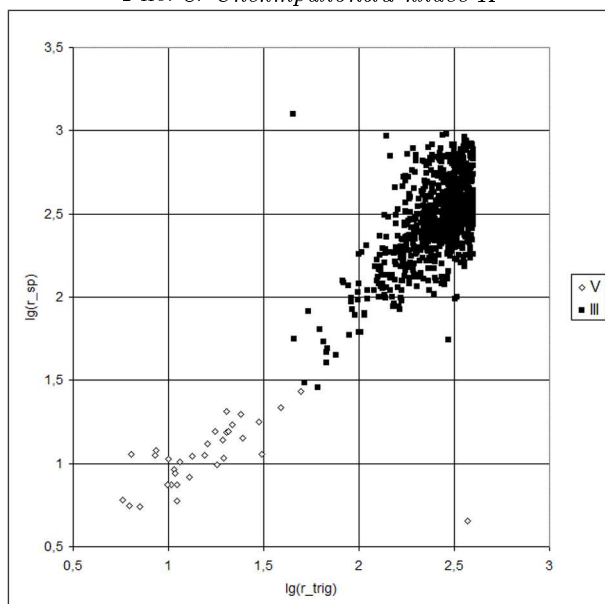


Рис. 9: Спектральный класс M

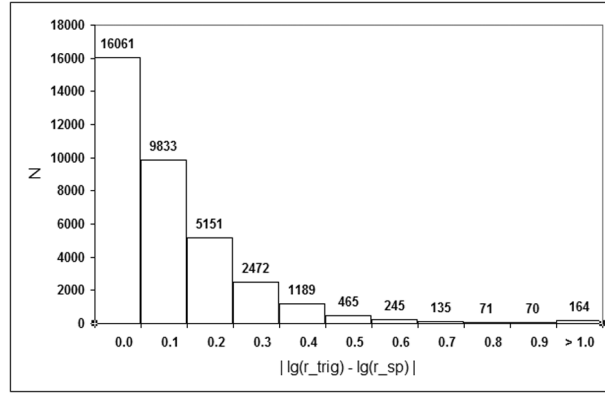


Рис. 10: Распределение звезд выборки по различию модуля логарифмов определяемых расстояний $\Delta \lg r$.

Наиболее сложным и тонким местом в классификации звездных спектров является определение класса светимости [11], [12].

Так как звезды с такими большими различиями в оценке расстояний имеют в основном поздние спектральные классы, то разумно предположить, что для этих звезд неточно определен класс светимости: звездам в верхнем левом углу диаграммы приписан класс светимости III (гиганты) вместо V (главная последовательность), а звездам в правом нижнем углу – V вместо III.

6 Коррекция классов светимости звезд каталога Tycho–2 Spectral Type

Исходя из гипотезы о неверном назначении класса светимости, мы внесли изменения в спектральную классификацию разных выборок звёзд. В таблице 2 представлены сведения о числе звёзд, для которых изменение класса светимости привело к существенному уменьшению невязки $|\Delta \lg r|$.

Диапазоны $ \Delta \lg r $	Общее число звезд	Уменьшено заменой класса светимости		Не уменьшается заменой класса светимости	
[0.3; 0.4]	2 472	1 056	42.72 (%)	1 416	57.28 (%)
[0.4; 0.5]	1 189	649	54.58	540	45.42
[0.5; 0.6]	465	305	65.59	160	34.41
[0.6; 1.0]	521	459	88.10	62	11.90
> 1.0	164	159	96.95	5	3.05

Таблица 2: Действие изменения класса светимости на $|\Delta \lg r|$.

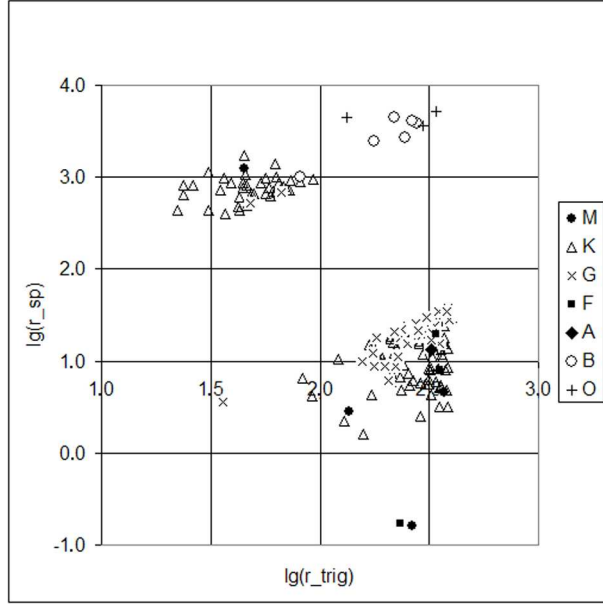


Рис. 11: Сравнение расстояний, определенных разными методами, для звёзд, у которых $|\Delta \lg r| > 1$

Из таблицы 2 видно, что с возрастанием $|\Delta \lg r|$ процент ”исправляемых” спектральных расстояний растёт почти линейно.

В нашей статье мы рассмотрим подробнее два последних случая: первый — звёзды с $|\Delta \lg r| > 1.0$, второй — с $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$.

Для 164 звёзд с $|\Delta \lg r| > 1$ изменения класса светимости, а также значения логарифма расстояния, вычисленные на основе исправленного спектрального класса, показаны в таблице 5. Как мы видим, изменение класса светимости соответствующим образом привело к значительному уменьшению величины $|\Delta \lg r|$ для 159 звёзд спектральных классов с А по М. Если первоначальное среднее значение величины $|\Delta \lg r|$ для этих 159 звёзд составляло 1.32 ± 0.34 , то после внесения исправлений оно стало 0.20 ± 0.20 .

Лишь для пяти О–В звёзд отклонения остались значительными. Мы можем объяснить это тем, что светимости этих звёзд сильно отличаются от табличных значений в [6], поскольку звёзды этих классов достаточно редкие объекты с нестандартными характеристиками. Для О–В звёзд мы можем сказать, что их табличные значения светимости сильно завышены, реально абсолютные звёздные величины больше на 5^m и по данным Hipparcos находятся ближе. У О–В звёзд, для которых замена класса светимости не привела к улучшению оценки расстояния, две последних ячейки в таблице 5 оставлены пустыми. Еще одно возможное объяснение может заключаться в том, что свет этих звёзд, находящихся в галактической плоскости (у четырех звёзд $|b| < 4^\circ$, у одной звезды $|b| = -25^\circ$) испытывает значительное

поглощение, которое не адекватно описывается формулами (1–4).

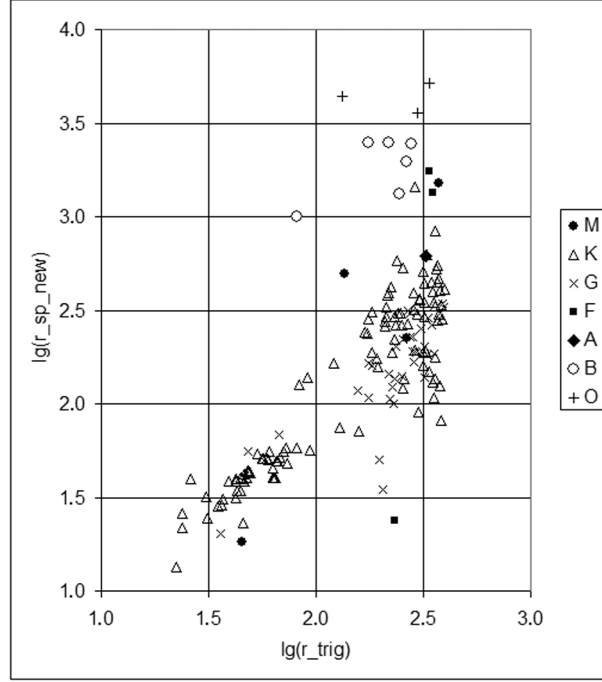


Рис. 12: Диаграмма для звёзд с $|\Delta \lg r| > 1$ после внесения исправлений в класс светимости

Диаграмма сравнений логарифмов расстояний, определенных методом спектрального параллакса по исправленным данным, с тригонометрическим расстоянием представлена на рис. 12.

Исправление спектральной классификации кардинально изменило вид рис. 12 по сравнению с рис. 11. Звезды выстроились вдоль прямой $y = x$ с весьма небольшим разбросом.

В группе звезд $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$ изменения класса светимости также дали весьма эффективное уменьшение расхождения между тригонометрическим и спектральным параллаксом. Таблица 4 отражает статистику проведенных изменений. Мы видим, что большинство изменений касается спектральных классов G, K. Т.е. наиболее вероятные ошибки в определении класса светимости связаны именно с неверным назначением звездам главной последовательности класса светимости III, и наоборот приписыванием красным гигантам класса светимости V. Это обстоятельство может служить сильным подтверждением нашей гипотезы.

Таблица 3 показывает уменьшение $|\Delta \lg r|$ индивидуально для звезд каждого спектрального класса. Как мы видим, наилучшего результата удалось достичь для спектрального класса G, в той области диаграммы Герцшпрунга-Рессела, в которой начинается сильное разделение ветвей гигантов и глав-

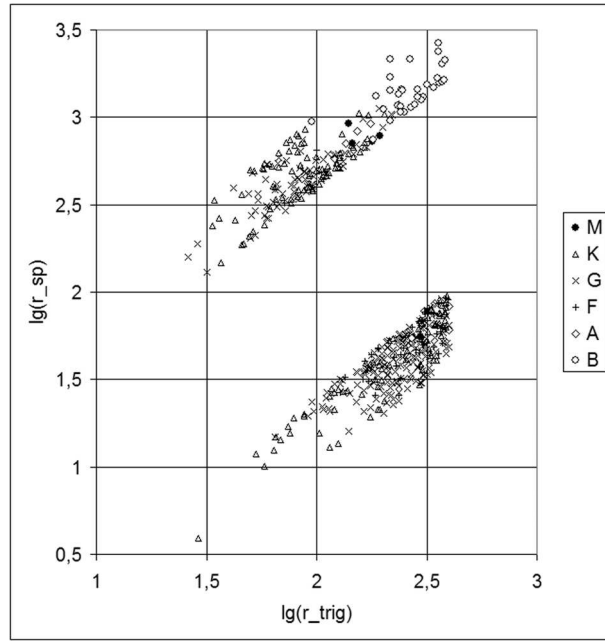


Рис. 13: Сравнение расстояний, определенных разными методами, для звёзд у которых $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$.

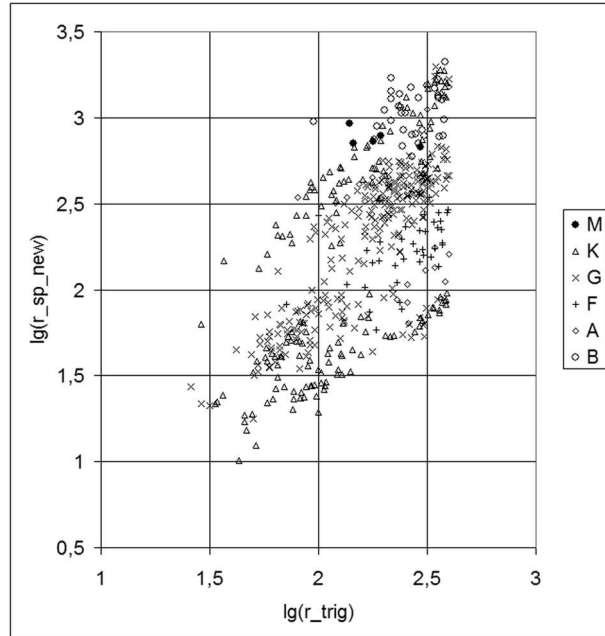


Рис. 14: Диаграмма для звёзд с $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$ после внесения исправлений в класс светимости.

Температурный класс звезды	Среднее значение $ \Delta \lg r $ до изменения класса светимости	Среднее значение $ \Delta \lg r $ для звёзд после после изменения класса светимости
A	$0,73 \pm 0,09$	$0,44 \pm 0,09$
B	$0,74 \pm 0,12$	$0,50 \pm 0,14$
F	$0,73 \pm 0,10$	$0,22 \pm 0,16$
G	$0,75 \pm 0,11$	$0,19 \pm 0,12$
K	$0,77 \pm 0,12$	$0,44 \pm 0,16$

Таблица 3: Среднее значение величины $|\Delta \lg r|$ до и после изменения класса светимости. Только для звезд первичной выборки $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$, для которых удалось "исправить" значение логарифма расстояния, полученного методом спектрального параллакса.

Температурный класс звезды	Замена класса светимости приводит к уменьшению $ \Delta \lg r $				Замена класса светимости не приводит к уменьшению $ \Delta \lg r $	
	$III \rightarrow I$	$III \rightarrow V$	$V \rightarrow I$	$V \rightarrow III$	III	V
B		16	1			16
A		5	2	9		1
F	1	2		36		
G	3	81		168	11	
K	25	73		36	30	
M	1			4		

Таблица 4: Изменения в классах светимости для выборки звезд, у которых: $0.6 \leq |\Delta \lg r| < 1$.

ной последовательности [13].

Рис. 13 – 14 иллюстрируют различие логарифмов расстояний определенных методами тригонометрического и спектрального параллакса до и после коррекции классов светимости звезд.

Рис. 14 представляет особый интерес. На нем видно, что звезды разных спектральных классов концентрируются к разным прямым, имеющий общий наклон в 45° , но смещенных относительно друг друга. Этот факт может служить указанием на неточность калибровочных данных в таблице 6.

7 Уточнение спектральной классификации звезд с большим различием $|\Delta \lg r|$

Интересно, а как выглядят спектры звезд, обладающих $|\Delta \lg r| > 1$? Воспользовавшись базой данных ESA [14] мы выяснили, что для 14 звезд из нашего набора уже были получены спектры для их последующего применения в широком диапазоне задач. Проанализировав названия программ наблюдений и спектры этих звезд, можно сделать вывод, что это объекты либо "незамеченные" спутником HIPPARCOS кратные системы, либо пекулярные объекты, не попадающие под стандартную спектральную классификацию. Как правило это звезды с особыми оболочками или сверхмассивные объекты с подозрением на соседа — черную дыру.

Основываясь на полученных результатах можно сделать следующее утверждение: не для всех звезд, у которых $|\Delta \lg r| > 1$ неточно определен класс светимости, есть также такие звезды, которые вызывают сильный астрофизический интерес, как объекты с особыми свойствами.

Для проверки нашей гипотезы о неверном назначении класса светимости и оценки доли пекулярных объектов составлен список звезд, спектры которых планируется перенаблюдать в Специальной Астрофизической обсерватории РАН.

8 Вывод

Основным результатом данной работы следует считать то, что сравнение спектральных и тригонометрических параллаксов звезд позволяет астрометрическими методами обнаружить те звезды, для которых спектральные характеристики, главным образом классы светимости, определены с большими ошибками. В целом, этот вывод вполне понятен, так как известно, что определение класса светимости звезды производится с разной точностью для звезд, расположенных в различных местах диаграммы Герцшпрунга–Рессела.

Тем не менее, для большинства (95%) звезд каталога Tycho-2 Spectral Type, данные о классе светимости верные.

Дальнейшие исследования в этом направлении могут быть связаны как с более точным учетом межзвездного поглощения и калибровкой таблиц светимости звезд известных спектральных классов, так и с проведением прямых астрофизических наблюдений для проблемных звезд.

Список литературы

- [1] *Hog E. et al.* The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars, A.&A., 2000, 355, L27.
- [2] *ESA*, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200, 1997.
- [3] *Wright C.O., Egan M.P., Kraemer K.E., Price S.D.*, The Tycho-2 Spectral Type Catalog, Astron. J., 2003. 125, 359.
- [4] *Попов А.В., В.В.Витязев, А.С.Цветков*, Спектральные параллаксы звезд каталога Tycho-2 Spectral Type, Вестн. СПбГУ 2006 в печати.
- [5] *Смирнов А.А.*, Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Type с данными каталога Hipparcos, Труды 35-й Международной студенческой конференции "Физика Космоса", Екатеринбург: Издательство Уральского Университета, 2006 г.
- [6] *J.Binney, M.Merrifield*, Galactic Astronomy, Princeton University Press, Princeton, 1998.
- [7] *Mihalas and Binney*, Galactic Astronomy, W.H.Freeman and Company, 1981.
- [8] *Arthur N.Cox, Editor Springer-Vereag NY*, Allen's astrophysical Quantities, fourth Edition, Berlin Heidelberg, 2000.
- [9] *F.Arenou, M.Grenon, A.Gomez*, A three-dimensional model of the galactic interstellar extinction, Astron. & Astrophys. 258,p. 104-111, 1992.
- [10] *Kharchenko N.V.*, All-sky Compiled Catalogue of 2.5 million stars (ASCC-2.5, 2nd version), Kinematics and Physics of Celestial Bodies, 17,409, 2001.
- [11] *B.Merín, B.Monstensinos*, Determination of Spectral Types of the Stars in the EXPORT Sample, Disk, Planetesimals, and Planets, ASP Conference Series, Vol.219, 2000.
- [12] *Jaschek, C., & Jaschek, M.*, The Classification of Stars, Cambridge University Press, 1990.
- [13] *A.E. Gomez et al.*, The Luminosity Calibration of the HR Diagram Revisited by Hipparcos, Proceedings from the Hipparcos Venice '97 symposium, 1997.
- [14] http://archive.eso.org/eso/eso_archive_main.html

Таблица 5: Звезды с величиной $|\Delta \lg r| > 1$, их исправленные спектральные классы, и логарифмы расстояния, полученные методом спектрального параллакса.

HIP — номер звезды по каталогу Hipparcos;
 $\lg r_{tr}$ — логарифм расстояния, полученного по тригонометрическому параллаксу;
 $\lg r_{Sp}$ — логарифм расстояния, полученного методом спектрального параллакса;
 $B - V$ — показатель цвета из каталога Tycho-2;
 V — видимая звездная величина из каталога Tycho-2;
 SP — спектральный класс из каталога Tycho-2 Spectral Type;
 SP_{cor} — исправленный спектральный класс;
 $\lg r_{Sp_{cor}}$ — логарифм расстояния, полученного методом спектрального параллакса на основе исправленного спектрального класса.

HIP	$\lg r_{tr}$	$\lg r_{Sp}$	$B - V$	V	SP	SP_{cor}	$\lg r_{Sp_{cor}}$
1042	2.530	1.296	1.086	7.80	F2 V	F2 I	3.245
1409	2.136	0.455	0.025	7.88	M3 V	M3 III	2.692
2618	2.541	1.537	1.180	9.49	G3 V	G3 III	2.420
3719	2.357	1.056	1.074	6.93	G7 V	G7 III	2.088
4003	1.771	2.885	0.910	9.93	K2 III	K2 V	1.705
4649	2.322	0.776	1.492	7.51	K4 V	K4 III	2.416
4920	2.567	1.250	1.400	9.49	K2 V	K2 III	2.650
5017	2.504	0.901	1.502	8.18	K4 V	K4 III	2.542
5930	2.529	0.769	1.556	7.71	K2 V	K2 III	2.173
7400	2.082	1.024	0.978	6.70	K1 V	K1 III	2.214
7614	2.559	1.072	1.339	8.41	K5 V	K5 III	2.722
7738	2.380	1.354	1.155	9.10	K3 V	K3 III	2.765
8213	2.457	1.264	1.111	8.00	G5 V	G5 III	2.222
8400	2.593	1.444	0.989	8.62	G8 V	G8 III	2.519
8725	2.474	3.554	0.122	9.40	O8 V		
9084	2.550	1.187	1.352	8.73	G8 V	G8 III	2.269
9161	2.346	0.938	1.480	8.00	G8 V	G8 III	2.023
9481	2.372	0.681	1.616	7.53	K5 V	K5 III	2.421
9799	2.260	1.070	1.161	7.54	K0 V	K0 III	2.272
10877	2.403	1.332	1.207	9.15	K2 V	K2 III	2.726
11190	2.325	1.261	1.208	8.67	K0 V	K0 III	2.464
12053	2.396	1.282	1.069	8.25	K0 V	K0 III	2.482
12059	2.359	1.043	1.213	7.29	G5 V	G5 III	2.003
13338	2.366	1.262	1.143	8.43	K0 V	K0 III	2.463
13799	2.285	1.033	1.435	8.43	K0 V	K0 III	2.241
15578	1.648	2.932	1.135	9.93	K3 III	K3 V	1.536
15742	2.371	1.350	1.109	8.42	G5 V	G5 III	2.308

<i>HIP</i>	$\lg r_{tr}$	$\lg r_{Sp}$	$B - V$	V	SP	SP_{cor}	$\lg r_{Sp_{cor}}$
17454	2.506	1.441	1.149	9.35	K0 V	K0 III	2.643
17706	1.753	2.993	0.900	10.24	K3 III	K3 V	1.706
17736	1.664	2.913	0.921	9.84	K3 III	K3 V	1.626
20487	2.352	1.351	1.091	8.75	K1 V	K1 III	2.623
20651	2.330	0.870	1.553	8.23	K4 V	K4 III	2.513
20756	2.239	0.637	1.499	6.85	K5 V	K5 III	2.373
21344	2.341	1.318	1.153	8.22	G2 V	G2 III	2.161
21583	2.246	0.949	1.204	6.96	G8 V	G8 III	2.029
21988	1.349	2.640	0.899	8.00	K5 III	K5 V	1.130
22253	1.803	3.002	1.221	10.58	K2 III	K2 V	1.608
22271	1.656	3.240	0.769	10.85	K7 III	K7 V	1.599
24454	1.419	2.908	1.085	10.04	K2 III	K2 V	1.601
28485	2.369	1.256	0.888	6.98	G3 V	G3 III	2.135
28711	2.120	3.645	0.333	10.96	O9 V		
29009	2.499	0.752	1.559	7.65	K3 V	K3 III	2.276
29458	2.550	1.142	1.393	8.92	K2 V	K2 III	2.542
29986	2.289	0.986	1.490	8.42	K0 V	K0 III	2.196
32431	2.506	1.152	0.810	6.51	G8 V	G8 III	2.142
33545	2.511	1.127	1.353	7.04	A8 V	A8 I	2.792
33856	2.572	1.387	1.775	3.47	K4 III	K4 I	2.671
35203	1.784	2.844	0.814	9.85	K1 III	K1 V	1.743
36655	2.445	3.587	0.151	9.47	B0 III	B0 V	3.387
38421	2.247	3.393	-0.170	11.71	B8 V		
38646	1.683	2.716	0.785	9.38	G8 III	G8 V	1.745
38716	2.530	3.712	0.158	10.65	O9 V		
38913	2.544	0.913	1.385	7.79	K5 V	K5 III	2.597
39543	2.554	1.125	1.284	8.41	K2 V	K2 III	2.521
41511	2.564	1.539	1.033	9.40	K0 V	K0 III	2.738
41698	2.506	0.944	1.533	8.51	K3 V	K3 III	2.467
42486	2.578	1.540	0.822	8.30	G5 V	G5 III	2.481
42919	1.630	2.644	0.833	8.92	K0 III	K0 V	1.588
43771	1.493	2.634	1.000	8.67	K2 III	K2 V	1.389
44816	2.245	1.170	1.728	2.20	K4 III	K4 I	2.453
46360	1.680	2.794	0.925	9.47	K2 III	K2 V	1.603
47256	2.587	0.929	1.499	8.30	K3 V	K3 III	2.451
48184	2.296	0.949	1.306	6.87	G0 V	G0 III	1.702
51510	1.696	2.823	0.983	9.75	K1 III	K1 V	1.630
53383	1.654	3.099	1.043	10.09	M0 III	M0 V	1.259
53719	1.566	2.598	0.861	8.62	K1 III	K1 V	1.492
56135	2.480	0.752	1.255	6.31	K0 V	K0 III	1.956
57257	2.554	0.733	1.457	7.13	K2 V	K2 III	2.134
59035	2.545	0.714	1.422	6.90	K2 V	K2 III	2.115
59414	2.461	1.440	0.802	7.51	G2 V	G2 III	2.278
59979	2.524	1.382	0.960	8.20	G8 V	G8 III	2.457

<i>HIP</i>	$\lg r_{tr}$	$\lg r_{Sp}$	$B - V$	V	SP	SP_{cor}	$\lg r_{Sp_{cor}}$
60122	2.201	0.209	1.646	5.30	K4 V	K4 III	1.855
61487	2.510	0.637	1.617	7.32	K4 V	K4 III	2.282
61801	1.776	2.800	0.850	9.63	K1 III	K1 V	1.699
61818	2.412	0.733	1.434	7.04	K2 V	K2 III	2.134
61887	2.426	0.784	1.555	7.80	K4 V	K4 III	2.427
62271	2.339	1.084	1.284	8.24	K3 V	K3 III	2.592
62386	2.462	0.760	1.567	7.73	K3 V	K3 III	2.284
63214	2.507	1.224	1.372	8.99	G8 V	G8 III	2.306
63804	2.439	1.280	0.965	7.71	G8 V	G8 III	2.355
64048	1.378	2.805	1.233	9.30	K3 III	K3 V	1.336
64956	2.455	1.214	1.124	8.19	K1 V	K1 III	2.501
65359	1.972	2.972	0.968	10.36	K2 III	K2 V	1.750
65469	1.594	2.944	1.084	10.00	K3 III	K3 V	1.585
65485	1.687	2.740	0.747	9.33	K1 III	K1 V	1.640
65500	1.562	2.984	1.534	11.10	K3 III	K3 V	1.461
66478	2.465	1.278	1.062	7.94	G6 V	G6 III	2.271
66840	1.375	2.910	1.264	9.82	K3 III	K3 V	1.417
67171	1.868	2.967	0.833	10.11	K3 III	K3 V	1.680
69640	2.338	3.648	0.067	9.97	B1 III	B1 V	3.394
69668	1.825	2.838	0.833	9.99	G8 III	G8 V	1.832
69787	1.798	3.139	1.182	10.50	K5 III	K5 V	1.606
70017	1.911	2.947	0.893	10.23	K2 III	K2 V	1.767
70142	1.626	2.675	0.880	8.87	K2 III	K2 V	1.495
72520	2.426	1.424	0.977	8.47	G8 V	G8 III	2.499
72645	2.439	1.412	0.934	8.25	G8 V	G8 III	2.486
73308	2.585	1.133	1.319	8.59	K2 V	K2 III	2.530
73367	2.402	1.211	1.436	9.32	K0 V	K0 III	2.420
73686	1.662	3.023	1.351	9.92	K5 III	K5 V	1.365
74666	1.554	0.553	0.940	3.46	G0 V	G0 III	1.304
77764	2.424	3.616	-0.042	10.34	B3 III	B3 V	3.294
78874	2.225	1.179	1.123	7.94	K0 V	K0 III	2.380
80693	2.112	0.352	1.496	5.40	K3 V	K3 III	1.874
80708	1.963	0.621	1.425	6.47	K3 V	K3 III	2.141
81020	2.516	1.053	1.811	10.18	K5 V	K5 III	2.799
81176	1.750	2.816	0.870	9.71	K1 III	K1 V	1.704
83195	1.651	2.892	0.904	9.74	K3 III	K3 V	1.605
83689	2.354	1.151	0.931	7.09	K0 V	K0 III	2.277
84996	2.407	0.871	1.557	8.11	K0 V	K0 III	2.082
85355	2.556	1.521	1.527	4.33	K2 III	K2 I	2.921
86778	2.516	1.304	1.230	8.66	G5 V	G5 III	2.264
87083	1.665	2.687	0.816	9.06	K1 III	K1 V	1.586
87092	1.685	2.820	0.855	9.60	K2 III	K2 V	1.640
87464	1.489	3.048	1.198	10.04	K5 III	K5 V	1.503
87540	1.923	0.816	1.119	6.18	K1 V	K1 III	2.103

<i>HIP</i>	$\lg r_{tr}$	$\lg r_{Sp}$	$B - V$	V	SP	SP_{cor}	$\lg r_{Sp_{cor}}$
87946	2.570	0.657	0.296	10.58	M5 V	M5 III	3.177
88256	2.554	0.718	1.798	8.47	K3 V	K3 III	2.250
88671	2.192	0.998	0.983	6.36	G8 V	G8 III	2.073
88869	2.588	1.580	0.914	8.84	G5 V	G5 III	2.534
89069	2.541	1.448	1.108	9.23	K0 V	K0 III	2.648
90055	1.630	2.786	0.922	9.43	K2 III	K2 V	1.597
91587	1.859	2.865	0.812	9.96	K1 III	K1 V	1.765
93417	2.550	0.501	1.730	7.10	K3 V	K3 III	2.031
96022	2.260	1.091	1.414	8.75	K2 V	K2 III	2.491
96204	2.420	-0.793	1.495	6.46	M8 V	M8 III	2.352
96509	2.564	1.041	1.537	8.99	K2 V	K2 III	2.445
97093	1.818	2.857	0.938	9.91	K1 III	K1 V	1.696
97449	1.850	2.854	0.867	9.90	K1 III	K1 V	1.745
97962	1.909	3.000	-0.204	10.21	B9 V		
98011	2.242	1.085	1.012	6.98	G9 V	G9 III	2.215
98082	2.481	1.348	1.190	9.04	K0 V	K0 III	2.551
98209	2.401	1.191	0.884	6.78	G5 V	G5 III	2.145
98746	2.500	0.920	1.448	8.20	K8 V	K8 III	2.710
99011	2.450	1.277	1.166	8.45	G8 V	G8 III	2.356
99092	2.481	1.361	1.040	8.54	K0 V	K0 III	2.561
99278	2.575	0.901	1.412	7.83	K5 V	K5 III	2.606
99482	2.572	1.190	1.132	8.10	K1 V	K1 III	2.476
99780	2.403	1.385	0.982	8.12	G5 V	G5 III	2.342
100346	2.545	0.903	1.627	7.92	F9 V	F9 I	3.130
101194	2.383	0.957	1.601	8.85	K3 V	K3 III	2.483
101865	2.449	1.327	0.966	7.77	G5 V	G5 III	2.283
102667	2.471	1.076	1.443	8.79	K2 V	K2 III	2.477
104860	2.580	0.687	1.611	7.52	K2 V	K2 III	2.093
105000	2.260	1.251	0.859	7.00	G5 V	G5 III	2.205
105243	1.810	2.935	1.112	10.17	K2 III	K2 V	1.608
105546	1.801	2.837	0.798	9.69	K2 III	K2 V	1.657
106743	1.824	2.826	0.937	9.83	K0 III	K0 V	1.695
106797	2.455	1.189	1.555	9.80	K2 V	K2 III	2.593
109897	2.600	1.468	0.954	8.75	K0 V	K0 III	2.611
110025	2.391	3.427	0.235	9.97	B2 III	B2 V	3.119
110115	1.832	2.903	0.922	10.02	K2 III	K2 V	1.714
110127	1.728	2.939	0.949	10.19	K2 III	K2 V	1.731
110204	2.585	0.499	1.696	6.94	K2 V	K2 III	1.908
111254	2.311	0.783	1.551	7.06	G0 V	G0 III	1.539
111295	2.367	0.826	1.384	7.33	K3 V	K3 III	2.345
111371	2.488	1.470	0.785	7.88	G6 V	G6 III	2.401
112049	1.633	2.776	0.994	9.38	K2 III	K2 V	1.536

<i>HIP</i>	$\lg r_{tr}$	$\lg r_{Sp}$	$B - V$	V	SP	SP_{cor}	$\lg r_{Sp_{cor}}$
114483	2.498	0.805	1.481	7.59	K2 V	K2 III	2.207
114817	2.333	1.200	1.182	8.40	K2 V	K2 III	2.579
115008	2.322	1.242	1.062	8.03	K0 V	K0 III	2.442
115218	2.461	0.394	1.705	6.40	K1 V	K1 I	3.161
116519	1.686	2.742	0.843	9.34	K1 III	K1 V	1.642
117245	2.368	-0.762	2.779	5.01	F8 V	F8 I	1.375
117736	1.546	2.860	1.149	9.58	K3 III	K3 V	1.453

Таблица 6: Калибровочные данные для I, III и V классов светимости, на основе которых проводились наши вычисления логарифмов расстояний методом спектрального параллакса.

	I		III		V	
S_p	M	$B - V$	M	$B - V$	M	$B - V$
O0	-6.300	-0.550	-12.000	-0.330	-7.000	-0.350
O1	-6.321	-0.538	-11.530	-0.332	-6.615	-0.346
O2	-6.349	-0.518	-10.958	-0.331	-6.302	-0.342
O3	-6.380	-0.492	-10.303	-0.327	-6.041	-0.338
O4	-6.413	-0.461	-9.584	-0.323	-5.814	-0.334
O5	-6.443	-0.426	-8.820	-0.320	-5.600	-0.330
O6	-6.470	-0.388	-8.030	-0.320	-5.381	-0.326
O7	-6.490	-0.349	-7.234	-0.320	-5.137	-0.321
O8	-6.501	-0.309	-6.451	-0.310	-4.850	-0.316
O9	-6.500	-0.270	-5.700	-0.310	-4.500	-0.310
B0	-6.485	-0.233	-5.000	-0.300	-4.000	-0.300
B1	-6.452	-0.199	-4.365	-0.260	-3.142	-0.274
B2	-6.400	-0.170	-3.789	-0.240	-2.250	-0.240
B3	-6.329	-0.145	-3.261	-0.200	-1.689	-0.211
B4	-6.256	-0.124	-2.768	-0.174	-1.396	-0.188
B5	-6.200	-0.100	-2.300	-0.160	-1.200	-0.170
B6	-6.175	-0.074	-1.849	-0.144	-0.959	-0.156
B7	-6.178	-0.049	-1.422	-0.120	-0.644	-0.138
B8	-6.200	-0.030	-1.030	-0.090	-0.250	-0.110
B9	-6.236	-0.020	-0.686	-0.060	0.207	-0.067
A0	-6.300	-0.010	-0.400	0.000	0.650	-0.020
A1	-6.400	0.008	-0.179	0.053	1.006	0.018
A2	-6.500	0.030	-0.014	0.089	1.300	0.050
A3	-6.562	0.052	0.111	0.115	1.566	0.083
A4	-6.590	0.073	0.211	0.133	1.790	0.116
A5	-6.600	0.090	0.300	0.150	1.950	0.150
A6	-6.604	0.104	0.390	0.169	2.034	0.183
A7	-6.605	0.116	0.485	0.190	2.090	0.215
A8	-6.604	0.130	0.585	0.214	2.178	0.245
A9	-6.602	0.147	0.689	0.240	2.361	0.274
F0	-6.600	0.170	0.800	0.270	2.700	0.300
F1	-6.599	0.200	0.915	0.302	3.195	0.324
F2	-6.600	0.230	1.024	0.337	3.600	0.350
F3	-6.605	0.254	1.116	0.374	3.694	0.379
F4	-6.607	0.281	1.178	0.411	3.594	0.410
F5	-6.600	0.320	1.200	0.450	3.500	0.440
F6	-6.578	0.381	1.174	0.489	3.567	0.467
F7	-6.543	0.462	1.113	0.528	3.761	0.493
F8	-6.500	0.560	1.034	0.568	4.000	0.520
F9	-6.452	0.667	0.958	0.609	4.216	0.550

	I		III		V	
<i>Sp</i>	<i>M</i>	<i>B − V</i>	<i>M</i>	<i>B − V</i>	<i>M</i>	<i>B − V</i>
G0	-6.400	0.760	0.900	0.650	4.400	0.580
G1	-6.348	0.823	0.874	0.692	4.557	0.607
G2	-6.300	0.870	0.874	0.733	4.700	0.630
G3	-6.261	0.920	0.886	0.772	4.838	0.649
G4	-6.229	0.972	0.899	0.808	4.973	0.665
G5	-6.200	1.020	0.900	0.840	5.100	0.680
G6	-6.171	1.060	0.880	0.867	5.221	0.696
G7	-6.139	1.097	0.845	0.894	5.349	0.715
G8	-6.100	1.140	0.800	0.927	5.500	0.740
G9	-6.053	1.194	0.752	0.970	5.686	0.772
K0	-6.000	1.250	0.700	1.030	5.900	0.810
K1	-5.947	1.301	0.631	1.109	6.133	0.854
K2	-5.900	1.360	0.500	1.201	6.400	0.910
K3	-5.864	1.440	0.276	1.294	6.712	0.985
K4	-5.834	1.527	0.017	1.381	7.041	1.069
K5	-5.800	1.600	-0.200	1.450	7.350	1.150
K6	-5.757	1.644	-0.315	1.495	7.614	1.217
K7	-5.709	1.663	-0.351	1.521	7.857	1.272
K8	-5.663	1.667	-0.349	1.537	8.112	1.318
K9	-5.624	1.666	-0.351	1.551	8.415	1.359
M0	-5.600	1.670	-0.400	1.570	8.800	1.400
M1	-5.594	1.686	-0.512	1.601	9.295	1.443
M2	-5.600	1.710	-0.600	1.644	9.900	1.490
M3	-5.609	1.738	-0.578	1.693	10.607	1.539
M4	-5.612	1.768	-0.464	1.746	11.410	1.590
M5	-5.600	1.800	-0.300	1.800	12.300	1.640
M6	-5.564	1.834	-0.129	1.851	13.271	1.688
M7	-5.496	1.871	0.007	1.895	14.315	1.732
M8	-5.386	1.910	0.064	1.929	15.424	1.770
M9	-5.225	1.950	0.000	1.950	16.593	1.800