

# Спектральные параллаксы звезд каталога Tycho-2

А.В.Попов, В.В.Витязев, А.С.Цветков

23 октября 2006 г.

## 1 Введение

В настоящее время для проведения самых разных исследований в астрометрии и в галактической астрономии широко используется каталог положений и собственных движений звезд Tycho-2 [1]. К сожалению, в отличие от каталога Hipparcos [2], каталог Tycho-2 не содержит параллаксов звезд. Появившийся в 2003 году каталог Tycho-2 Spectral Type [3] позволяет отчасти устранить этот недостаток путем определения спектральных параллаксов звезд. Этому и посвящена данная статья.

## 2 Исходные данные

Основой для выполнения работы служат каталоги Hipparcos, Tycho-2 и Tycho-2 Spectral Type. Во всех трех каталогах содержится наблюдательный материал, полученный на спутнике Hipparcos, а при создании Tycho-2 и Tycho-2 Spectral Type также использовались результаты наземных астрометрических и астрофизических наблюдений.

Каталог HIPPARCOS содержит точные положения, собственные движения и параллаксы более чем 100 тысяч звезд. Однако, следует учесть, что относительную точность параллаксов лучше 25% имеют только достаточно близкие звезды, на расстояниях менее 200 пк; для звезд, находящихся на расстояниях около 800 пк, неопределенность в оценке расстояния составляет уже 100%. Наличие тригонометрических параллаксов большого числа звезд делает каталог Hipparcos основой для проверки и калибровки метода спектральных параллаксов.

Вместе с каталогом Hipparcos был издан каталог Tycho [2]. Каталог сохранил более миллиона звезд, но с существенно худшей точностью положений и собственных движений. Данный каталог теперь не представляет интереса, так как в 2000 году вышел каталог Tycho-2.

Каталог Tycho-2 – это компиляция тех же данных, что использовались при составлении каталога Tycho, но в большем объеме и с лучшей точностью. При его создании использовались более точные методы редукций, а

при расчете собственных движений – наземные каталоги положений звезд, давшие большую разность эпох. В качестве первой эпохи использовался *Astrographic Catalog* (1905 год) [4]. Последняя эпоха – наблюдения на спутнике *Hipparcos* – 1991.25. В дополнение к *Astrographic Catalog* использовались еще 143 наземных каталога. Как следствие, *Tycho-2* имеет точность положений от 10 до 100 мсд в зависимости от блеска звезды. Точность собственных движений составляет 2.5 мсд/год. Полнота каталога на уровне 99% достигается для звезд с  $V = 11$ . В настоящее время каталог *Tycho-2* может считаться одним из самых точных астрометрических каталогов, охватывающих всю небесную сферу. Но каталог не содержит параллаксов звезд, что существенно сужает возможности его использования.

Каталог *Tycho-2 Spectral Type*, вышедший в 2003 году, является подмножеством каталога *Tycho-2*. Он содержит информацию о 351 863 звездах и представляет собой компиляцию данных каталога *Tycho-2* с данными из нескольких наземных астрофизических каталогов [5-10].

В дополнение к полям каталога *Tycho-2* в новый каталог добавлены следующие данные:

- видимая звездная величина, полученная из наземных наблюдений;
- спектральный класс и подкласс;
- класс светимости;
- эффективная температура, полученная по спектральному классу и классу светимости.

Распределение звезд каталога на небесной сфере представлено на рис. 1. На этом рисунке видно, что звезды каталога неравномерно распределены по небесной сфере. Большинство звезд каталога *Tycho-2 Spectral Type* принадлежат южному экваториальному полушарию.

Больше всего мы заинтересованы в звездах I, III и V классов светимости. Во-первых, для них хорошо известны функции зависимости абсолют-

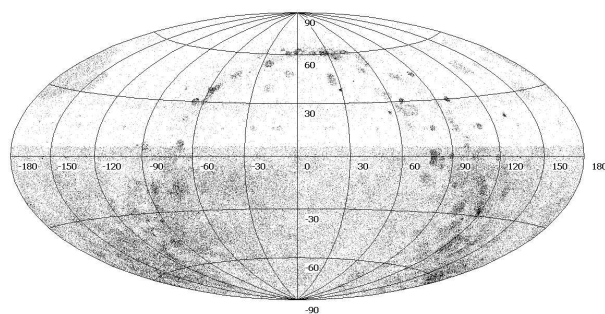


Рис. 1: *Распределение звезд каталога Tycho-2 Spectral Type по небесной сфере в экваториальной системе координат.*

ной звездной величины и показателя цвета от спектрального класса и класса светимости. Во-вторых, исходя из принятой теории звездной эволюции, можно считать, что звезды I и III классов светимости имеют небольшой разброс возраста и, следовательно, пекулярности, свойственные разным спектральным классам, будут иметь незначительное влияние на кинематические характеристики звезд.

Таким образом, в этой работе мы используем:

- положения и собственные движения звезд по каталогу Tycho-2;
- фотометрию ( $V$  и  $B - V$ ) по каталогу Tycho-2;
- спектральные классы звезд по каталогу Tycho-2 Spectral Type;
- классы светимости по каталогу Tycho-2 Spectral Type;
- тригонометрические параллаксы звезд по каталогу Hipparcos.

Таблица 1: Сравнительные характеристики каталогов Hipparcos, Tycho-2 и Tycho-2 Spectral Type.

| Каталог                       | Hipparcos       | Tycho-2           | Tycho-2 Spectral Type |
|-------------------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|
| Число звезд                   | 118 218         | 2 539 913         | 351 863               |
| Предельная звездная величина  | $12.4^m$        | $13^m$            | $12.5^m$              |
| Полнота                       | $7.3^m - 9^m$   | $11.0^m - 11.5^m$ | $9.5^m$               |
| Средние точности:             |                 |                   |                       |
| положений, мсд                | $< 1$           | 7 - 60            |                       |
| собственных движений, мсд/год | $< 1$           | 2.5               |                       |
| параллакс, мсд                | $\approx 1$     | -                 |                       |
| фотометрии, mag               | $\approx 0.002$ | 0.10-0.013        |                       |

В таблице 1 приведены основные характеристики каталогов Hipparcos, Tycho-2 и Tycho-2 Spectral Type.

### 3 Получение спектральных параллакс звезд

Для оценки спектрального параллакса звезды необходимо знать ее абсолютную и видимую звездные величины. Видимая звездная величина приведена в каталоге Tycho-2 с высокой степенью точности. Абсолютная звездная величина может быть найдена по спектру и классу светимости.

В качестве опорных таблиц светимостей звезд были использованы данные из [11], а также [12]. Считается, что второй источник содержит более точные и современные данные, однако в нем отсутствует информация о звездах III класса светимости ранних спектральных классов. Для этих звезд

данные брались из первого источника. Промежуточные значения между опорными точками вычислялись интерполированием. Для того, чтобы избежать существенных ошибок при экстраполировании на участках вне диапазона имеющихся опорных точек (например, при получении табличных  $B - V$ ), использовались искусственные опорные точки для классов V0 и M9, полученные с помощью полиномов 2-3 степени по 5-7 крайним опорным точкам.

Спектральные параллаксы звезд вычислялись по формуле

$$\lg \pi_{sp} = -0.2 (m_{cat} - M_{tab}) - 1 + 0.2A, \quad (1)$$

где  $A = 3.0 \cdot [(B - V)_{cat} - (B - V)_{tab}]$  – коэффициент межзвездного поглощения. Как показало дополнительное исследование, при вычислении величины межзвездного поглощения таким способом часто получаются отрицательные значения коэффициента  $A$ , то есть, межзвездное поглощение делает звезды более яркими, что противоречит физической сути. Появление отрицательных значений объясняется неточностью величины  $(B - V)_{tab}$ . Считается [13], что неопределенность этой величины может достигать  $0.15^m$ . Поэтому в наших вычислениях межзвездное поглощение учитывалось только тогда, когда его величина была больше 0.025. Отрицательные значения и значения близкие к нулю отбрасывались как незначимые.

Пользуясь описанной методикой, мы вычислили спектральные параллаксы звезд, для которых в каталоге *Tycho-2 Spectral Type* приведены классы светимости. Всего таких звезд оказалось 137 406.

## 4 Сравнение тригонометрических и спектральных параллаксов

Проведем оценку точности полученных спектральных параллаксов, сравнивая их с известными тригонометрическими параллаксами. Следует отметить, что около 107 тысяч звезд являются общими для каталогов *Hipparcos* и *Tycho-2 Spectral Type*, но только для 53 тысяч звезд можно определить спектральные параллаксы. Получить оценку точности спектральных параллаксов для остальных звезд не представляется возможным. Но, оценив точность примерно для 50% исследуемых звезд, мы считаем возможным в силу массовости выборок перенести результат и на остальные звезды. Для этого, используя общие звезды каталогов *Tycho-2 Spectral Type* и *Hipparcos*, построим индивидуальные разности:

$$\Delta\pi = \pi_{sp} - \pi_{tr}, \quad (2)$$

где  $\pi_{tr}$  тригонометрические параллаксы звезд из каталога *Hipparcos*, а  $\pi_{sp}$  – это спектральные параллаксы.

Очевидно, что обе оценки параллакса являются независимыми, поэтому ошибка спектрального параллакса может быть вычислена следующим

образом:

$$\sigma_{sp} = \sqrt{\sigma_{\Delta\pi}^2 - \sigma_{tr}^2}. \quad (3)$$

Статистическое исследование разностей параллаксов и выделение выбросов проводилось не во всем каталоге полученных спектральных параллаксов сразу, а на выборках звезд с фиксированным классом светимости и заданным диапазоном спектрального класса. В этом случае статистические параметры разностей спектральных и тригонометрических параллаксов звезд внутри выборки должны быть однородны, а существующее отличие распределения от нормального свидетельствует о наличии систематической составляющей в случайной величине  $\Delta\pi$ .

Для выделения выбросов использовался итерационный подход. При каждой итерации рассчитывались статистические параметры выборок: математическое ожидание, дисперсия, стандарт, асимметрия и эксцесс. В каждой итерации находились звезды, оценки параллаксов которых не удовлетворяли критерию  $\Delta\pi > 3\sigma_{\Delta\pi}$ . Они отбрасывались, и происходило вычисление статистических параметров новой выборки, и соответственно переопределение величины  $\sigma_{\Delta\pi}$ , которая, уменьшалась от итерации к итерации. Процесс останавливался, когда на очередной итерации не происходило значительное уменьшение величины  $\sigma_{\Delta\pi}$ .

Для большинства выборок число итераций составило 2-3. В итоге мы получили выборки, имеющие распределение величины  $\Delta\pi$  близкое к нормальному. Всего в таких выборках оказалось 51 032 звезды. Кроме того, мы получили список звезд, у которых наблюдается сильное различие спектральных и тригонометрических параллаксов (2551 звезда). Этим звездам будет посвящена отдельная статья [14].

Среднее значение, дисперсия, асимметрия и эксцесс величин  $\Delta\pi$  для звезд различных спектральных классов и классов светимости, а так же объемы выборок показаны в Таблицах 2, 3 и 4. В Таблице 5 представлено более детальное исследование звезд спектрального класса I с учетом подклассов светимости.

Таблица 2: Математическое ожидание  $m_{\Delta\pi}$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\pi}$ , асимметрия ( $As$ ) и эксцесс ( $Ex$ ) величины  $\Delta\pi$  для звезд каждого спектрального класса

| Sp | N     | $m_{\Delta\pi}$ , мсд | $\sigma_{\Delta\pi}$ | $\sigma_{tr}$ | $\sigma_{sp}$ | As   | Ex   | Число выбросов | Процент выбросов |
|----|-------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|------|------|----------------|------------------|
| O  | 68    | -0.9                  | 0.9                  | 1.1           | -             | -0.5 | -0.5 | 1              | 1.4%             |
| B  | 5338  | -0.5                  | 1.3                  | 1             | 0.8           | -0.2 | 0.3  | 97             | 1.8%             |
| A  | 6152  | 0                     | 2.4                  | 1.1           | 2.1           | 0.2  | 0.4  | 223            | 3.5%             |
| F  | 11810 | 2                     | 3.5                  | 1.3           | 3.2           | 0.3  | 0.4  | 325            | 2.7%             |
| G  | 10374 | 2.2                   | 3.9                  | 1.3           | 3.7           | 0.7  | 0.7  | 681            | 6.2%             |
| K  | 15382 | 0.5                   | 2.2                  | 1.1           | 1.9           | 0.2  | 0.6  | 1146           | 6.9%             |
| M  | 1908  | 0.2                   | 1.4                  | 1.1           | 0.9           | -0.1 | 0.9  | 78             | 3.9%             |

Таблица 3: Математическое ожидание  $m_{\Delta\pi}$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\pi}$ , асимметрия (As) и эксцесс (Ex) величины  $\Delta\pi$  для звезд для звезд V класса светимости

| Sp | N     | $m_{\Delta\pi}$ , мсД | $\sigma_{\Delta\pi}$ | $\sigma_{tr}$ | $\sigma_{sp}$ | As   | Ex   | Число выбросов | Процент выбросов |
|----|-------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|------|------|----------------|------------------|
| O  | 31    | -0.9                  | 1                    | 1.4           | -             | -0.6 | -0.8 | 1              | 3.1%             |
| B  | 3466  | -0.4                  | 1.4                  | 1             | 1.0           | -0.2 | 0.2  | 71             | 2.0%             |
| A  | 5025  | 0.3                   | 2.2                  | 1.1           | 1.9           | 0.4  | 0.2  | 188            | 3.6%             |
| F  | 10950 | 2.2                   | 3.2                  | 1.3           | 2.9           | 0.3  | 0.1  | 396            | 3.5%             |
| G  | 6011  | 3.8                   | 4.5                  | 1.4           | 4.3           | 0.5  | 0.1  | 445            | 6.9%             |
| K  | 1274  | 4.1                   | 5.9                  | 1.6           | 5.7           | 0.4  | 0.5  | 246            | 16.2%            |
| M  | 45    | 20                    | 15                   | 1.8           | 14.9          | 0.2  | -0.5 | 11             | 19.6%            |

Таблица 4: Математическое ожидание  $m_{\Delta\pi}$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\pi}$ , асимметрия (As) и эксцесс (Ex) величины  $\Delta\pi$  для звезд для звезд III класса светимости

| Sp | N     | $m_{\Delta\pi}$ , мсД | $\sigma_{\Delta\pi}$ | $\sigma_{tr}$ | $\sigma_{sp}$ | As   | Ex   | Число выбросов | Процент выбросов |
|----|-------|-----------------------|----------------------|---------------|---------------|------|------|----------------|------------------|
| O  | 11    | -1                    | 0.6                  | 1.1           | -             | 0.2  | -1.3 | 0              | 0.0%             |
| B  | 1453  | -0.5                  | 1.2                  | 1             | 0.7           | -0.2 | 0    | 35             | 2.4%             |
| A  | 1016  | -1.8                  | 2.3                  | 1.1           | 2.0           | -0.1 | -0.4 | 58             | 5.4%             |
| F  | 600   | -1.7                  | 2.9                  | 1             | 2.7           | 0.1  | 0.6  | 34             | 5.4%             |
| G  | 4171  | 0.5                   | 1.8                  | 1.1           | 1.4           | -0.1 | 0.9  | 265            | 6.0%             |
| K  | 14289 | 0.4                   | 1.9                  | 1             | 1.6           | 0.1  | 0.4  | 643            | 4.3%             |
| M  | 1829  | 0.2                   | 1.3                  | 1             | 0.8           | -0.1 | 0.3  | 49             | 2.6%             |

## 5 Комментарии к таблицам и анализ ошибок

Для большинства звезд спектральный параллакс определяется с хорошей точностью и удовлетворяет критерию  $3\sigma$ . При этом распределение звезд по  $\Delta\pi$  близко к нормальному, что можно видеть на рис. 2-3. Однако для некоторых выборок наблюдаются заметные асимметрия и эксцесс.

В некоторых случаях не удалось получить оценку точности спектрального параллакса, так как среднеквадратичная ошибка  $\sigma_{\Delta\pi}$  формально оказывалась меньше величины  $\sigma_{\pi_{tr}}$ .

Среднее значение  $\Delta\pi$ , существенно отличное от нуля для ряда выборок, говорит о наличии систематического отклонения в оценке параллакса звезд тригонометрическим и спектральным методами. Так, для O- и B-звезд главной последовательности в среднем спектральные параллаксы оказались меньше тригонометрических, в то время как для всех остальных

Таблица 5: Математическое ожидание  $m_{\Delta\pi}$ , среднеквадратичное отклонение  $\sigma_{\Delta\pi}$ , асимметрия (As) и эксцесс (Ex) величины  $\Delta\pi$  для звезд I/ класса светимости

| L      | N   | $\Delta\pi$ , мсд | $\sigma_{\Delta\pi}$ | $\sigma_{tr}$ | $\sigma_{sp}$ | As   | Ex   | Число выбросов | Процент выбросов |
|--------|-----|-------------------|----------------------|---------------|---------------|------|------|----------------|------------------|
| all    | 926 | -1.2              | 1.1                  | 1             | 0.5           | -0.9 | 0.6  | 44             | 4.5%             |
| Ia     | 122 | -0.6              | 0.8                  | 1             | -             | -0.9 | 1.4  | 4              | 3.2%             |
| Iab    | 159 | -0.7              | 0.8                  | 0.9           | -             | -0.5 | -0.2 | 4              | 2.5%             |
| Ib     | 373 | -1.3              | 1.2                  | 1             | 0.7           | -1.1 | 0.9  | 14             | 3.6%             |
| Ib(II) | 204 | -1.8              | 1.4                  | 1             | 1.0           | -0.9 | 0.7  | 9              | 4.2%             |

звезд этой же последовательности наблюдается обратная картина. Отличие от нуля асимметрии и эксцесса говорит либо о наличии систематических ошибок, либо о неоднородности данных.

Столбец "Число выбросов" содержит число звезд, разность параллаксов для которых для данной выборки оказалась больше  $3\sigma_{\Delta\pi}$ . Это число дает нам возможность оценить вероятность того, что полученный спектральный параллакс для произвольной звезды данного спектрального класса и класса светимости удовлетворяет данному критерию  $3\sigma_{\Delta\pi}$ . Иными словами, вероятность того, что полученный спектральный параллакс звезды будет иметь точность не хуже точности приведенной в таблице для данной выборки равна  $1 - n$ , где  $n$  – доля выбросов от общего числа звезд в выборке. Легко видеть, что для большинства выборок эта вероятность лучше чем 0.93. Только для звезд V класса светимости спектральных классов K и M она снижается до 0.8.

## 6 Влияние ошибок исходных данных на точность результата

В результате проведенного анализа выбросов было установлено, что наиболее существенно на точность получаемого спектрального параллакса звезды влияет *ошибка определения класса светимости*, так как в этом случае ошибочно определяются  $M_{tab}$  и  $(B - V)_{tab}$ , и, как следствие, спектральный параллакс может на порядок отличаться от тригонометрического параллакса. Ошибка определения спектрального класса влияет на результат существенно меньше.

В результате дополнительного исследования было обнаружено, что сами опорные (калибровочные) зависимости  $M = f[L, Sp]$  и  $(B - V) = f[L, Sp]$  недостаточно хорошо соответствуют аналогичным кривым, полученным эмпирически с помощью тригонометрических параллаксов из каталога Hipparcos, и этот вопрос требует дополнительного исследования.

В меньшей степени на величину ошибки определения спектрального па-

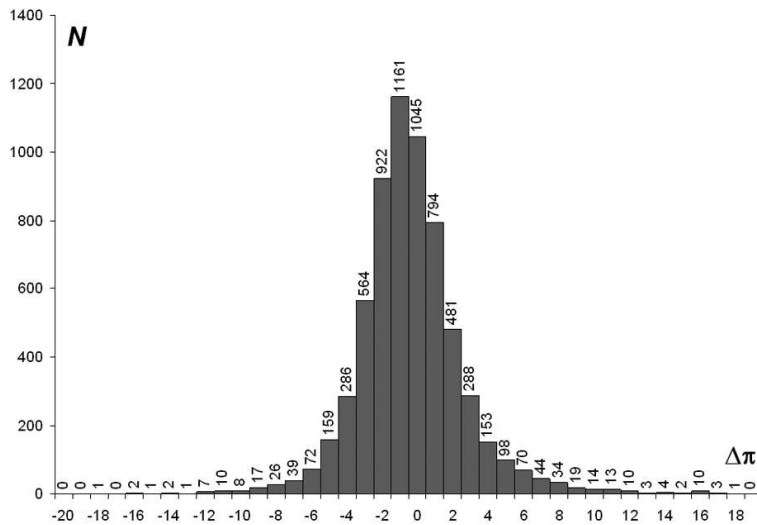


Рис. 2: Гистограмма распределения разностей параллаксов для A-звезд каталога Tycho-2 Spectral Type.

раллакса влияет ошибка определения видимой звездной величины и показателя цвета.

## 7 Заключение

1. Были получены спектральные параллаксы 137 тысяч звезд с использованием астрофизической информации из каталога Tycho-2 Spectral Type.
2. Точность полученных параллаксов оценена на уровне 1-5 мсд в зависимости от спектрального класса и класса светимости.
3. Полный каталог спектральных параллаксов с комментариями доступен по адресу <http://astro.pu.ru/astro/win/researches/astrometry-cat.html>

Данные результаты открывают дорогу к кинематическим исследованиям звезд на существенно большем объеме данных, чем это было возможно с использованием тригонометрических параллаксов каталога HIPPARCOS.

## Список литературы

- [1] E. E. Hog, C. Fabricius, V.V. Makarov, U. Bastian, P.Schwekendiek, A. Wicenec, S. Urban, T. Corbin, and G. Wycoff, "The Tycho-2 Catalog of



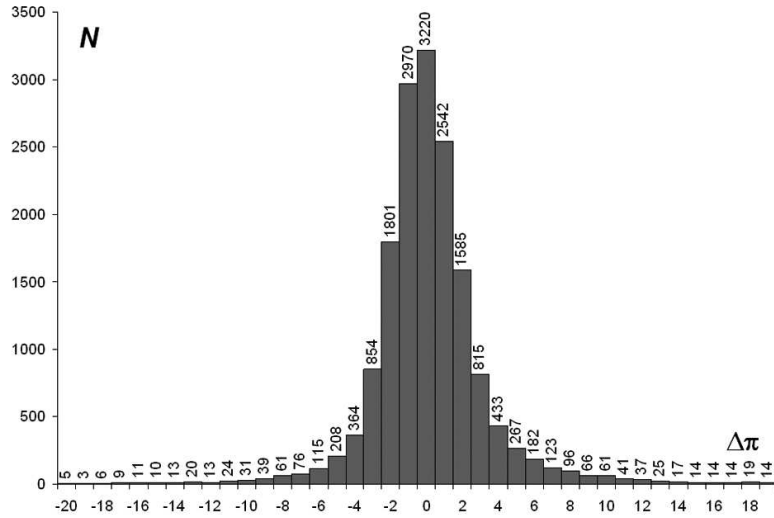


Рис. 3: Гистограмма распределения разностей параллакс для K-звезд каталога Tycho-2 Spectral Type.

the 2.5 Million Brightest Stars", Astronomy and Astrophysics, Vol. 355, pp. L27-L30. 2000.

- [2] *ESA*, The Hipparcos and Tycho Catalogue, ESA SP-1200, 1997.
- [3] *Wright et al.*, The Tycho-2 Spectral Type Catalogue. *Astron. J.*, 125, 359, 2003.
- [4] *S.E. Urban, T.E. Corbin, G.L. Wycoff, J.C. Martin, E.S. Jackson, M.I. Zacharias, and D.M. Hall*, The Astrographic Catalogue on the System Defined by the Hipparcos Catalogue, *Astronomical Journal*, Vol 115, pp 1212-1222, March 1998.
- [5] *Houk, Nancy; Cowley, Anne P.*, Michigan Catalogue of two-dimensional spectral types for the HD star, Ann Arbor: University of Michigan, Departement of Astronomy, 1975.
- [6] *Jaschek, Carlos; Conde, Horacio; de Sierra, Amelia C.*, Catalogue of stellar spectra classified in the Morgan-Keenan system. Serie Astronomica, La Plata: Observatorio Astronomico de la Universidad de la Plata, 1964.
- [7] *Kennedy P.M.*, MK Classification Catalogue Extension, Mt Stromlo & Siding Spring Observatories, Australia, 1983.
- [8] *Fricke, W. et al*, Fifth fundamental catalogue (FK5). Part 1: The basic fundamental stars. Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg, Verlag G. Braun, Karlsruhe, No. 32, p. 1-106, 1988.

- [9] *Fricke, W. et al*, Fifth fundamental catalogue. Part 2: The FK5 extension - new fundamental stars. Veröffentlichungen Astronomisches Rechen-Institut Heidelberg, Verlag G. Braun, Karlsruhe, No. 33, p. 1-143. 1991.
- [10] *Roeser, S.; Bastian, U.*, The Final PPM Star Catalogue for Both Hemispheres. Bull. Inf. Cent. Donnees Astron. Strasbourg 42, 11-16. 1993.
- [11] *Mihalas and Binney*, Galactic Astronomy, W.H.Freeman and Company, 1981.
- [12] *Arthur N.Cox, Editor Springer-Verlag NY*, Allen's astrophysical Quantities, fourth Edition, Berlin Heidelberg, 2000.
- [13] *F.Arenou, M.Grenon, A.Gomez*, A three-dimensional model of the galactic interstellar extinction. Astron. & Astrophys. 258, p. 104-111, 1992.
- [14] *А.Смирнов, А.Цветков, А.Попов* , Сравнение спектральных параллаксов звезд каталога Tycho-2 Spectral Type с данными каталога Hipparcos, *в печати*, 2006.

УДК 521.27. П о п о в А.В., В и т я з е в В. В., Ц в е т к о в А.С. Спектральные параллаксы звезд каталога Tycho-2. Вестн. С.-Петербург. ун.-та. Сер.1. 2007. Вып. \_\_ (с\_\_). С. 00 — 00.

Работа посвящена определению спектральных параллаксов 137 тысяч звезд каталога Tycho-2 Spectral Type, при выводе которых произведен учет межзвездного поглощения света. Выполнено сравнение полученных спектральных параллаксов с данными каталога Hipparcos, которое показало, что точность полученных спектральных параллаксов составляет от 1 до 5 мсд в зависимости от спектрального класса звезды.

Библиогр. 14 назв. Табл. 5. Рис. 3.

A.V. Popov, V.V.Vityazev, A.S.Tsvetkov. Spectral parallaxes of the Tycho-2 stars.

We present the spectral parallaxes for about 150 thousand stars derived from spectral types and luminosity classes of the Tycho-2 Spectral Type Catalogue. The interstellar absorption was taken into account. The comparison of the derived spectral parallaxes with trigonometric parallaxes from Hipparcos catalogue was made. The precision of the spectral parallaxes was found to be 1-5 mas depending on spectral type.

П о п о в А.В., В и т я з е в В. В., Ц в е т к о в А.С. Спектральные параллаксы звезд каталога Tycho-2.

Для 137 тысяч звезд каталога Tycho-2 получены спектральные параллаксы звезд на основе астрофизических данных, взятых из каталога Spectral Type Catalogue. При выводе спектральных параллаксов учтен эффект межзвездного поглощения света. Для оценки точности вычисленных спектральных параллаксов произведено их сравнение с тригонометрическими параллаксами 53 тысяч звезд, измеренными на спутнике HIPPARCOS. Было найдено, что точность полученных спектральных параллаксов составляет от 1 до 5 мсд в зависимости от спектрального класса звезды.