

# Отождествление звезд на пластинках в пределах зон Астрографического каталога. В.Н.Семенцов

## Аннотация

Рассмотрены способы отождествления звезд на разных пластинках “Карты неба” с использованием однородной оценки точности, а также распределения соседей данной звезды на пластинке.

**Abstract** Various methods of star identification on plates of Astrographic Catalog are discussed.

## Введение

Астрографический каталог, наблюдения которого производились с 1891 по 1948 годы, до настоящего времени входит в число крупнейших позиционных каталогов. Координатная информация, содержащаяся в нем, активно используется для уточнения собственных движений современных спутниковых каталогов [4, 10, 11, 12].

Однако, создание Астрографического каталога как единого целого, наталкивается на определенные трудности. Так, в издании, осуществленном военно-морской обсерваторией США [9], в каталоге отождествлены с GSC [6] только звезды, входящие в каталог ГУСНО [2], т.е. менее половины звезд. Очевидно, что в действительности практически все звезды АК присутствуют в каталоге GSC, но их корректное отождествление затруднительно. Оценка точности координат в АК (среднеквадратичное отклонение по опорным звездам на уровне  $0.3''$  [11]) представляется избыточно строгим критерием, особенно при

значительном разбросе эпох разных пластинок и априорном незнании собственных движений.

В настоящей работе рассмотрены способы увязки данных о координатах звезд, измеренных на разных пластинках, по возможности без использования внешней информации.

## **1 Отождествление звезд внутри зоны с использованием однородного критерия**

Простейший способ сопоставить изображения звезд на разных пластинках – это задать некоторый постоянный радиус отождествления, и рассмотреть поведение получающегося списка объектов в зависимости от величины этого радиуса на разном материале. В настоящей работе одно значение радиуса использовалось для отождествления в пределах зоны Астрографического каталога.

В таблице 1 приведены числа звезд, получившиеся в разных зонах при разных значениях радиуса отождествления. Из таблицы видно, и это показано на рис.1, что существенное уменьшение числа объектов заканчивается при изменении радиуса отождествления от 2 до 5". Из этого интервала его и следует выбирать, не забывая о том, что существует незначительное число быстро движущихся звезд, а также некоторый процент оптических двойных с расстоянием между компонентами, меньше нескольких секунд, отождествление которых таким способом, конечно приведет к серьезным ошибкам. Другой аспект выбора радиуса отождествления мы рассмотрим в разделе, посвященном распределению звезд на отдельных пластинках.

Любопытно также сравнить разные зоны в плане распределения числа изображений, объединяемых в один объект. Соответствующая статистика при радиусе отождествления 3" приведена в табл.2. По-

Таблица 1. Число объектов в различных зонах Астрографического каталога в зависимости от радиуса отождествления

Зона Карты неба	Число изобр.	Радиус отождествления, "				
		0.7	1	2	5	10
Гринвичская	322133	247736	215843	182086	178879	178715
Ватиканская	479975	394876	349017	271448	256020	255714
Катанская	319991	243117	213320	172515	161837	161150
Хельсинкская	284655	204928	180675	161000	159196	159108
Хайдарабад (с)	242543	194907	174762	151894	148910	148797
Юкльская	158651	141809	133155	120034	116847	116670
Потсдамская	144001	121441	115111	110069	109322	109230
Оксфордская	631791	517395	460412	378438	364253	363868
Парижская	436489	319556	284585	255567	252924	252712
Бордоская	355059	263703	240090	223139	221778	221395
Тулузская	433083	341243	307249	273794	269515	269010
Алжирская	330449	250435	226143	202513	199514	199374
Сан-Фернандо	346092	302549	280730	241442	225981	225071
Такубайская	516609	406822	362345	317174	311483	311101
Хайдарабад (ю)	521867	431020	386059	313885	293936	293223
Кордовская	467395	407001	373030	318784	307462	307091
Пертская	604315	481548	422861	348648	338125	337838
Капская	901229	784436	714660	583765	545031	543877
Сиднейская	743979	633510	570746	459426	428216	426748
Мельбурнская	392584	302479	265878	223791	216775	216068
Всего	8632890	6990511	6276671	5146682	5106004	5096760

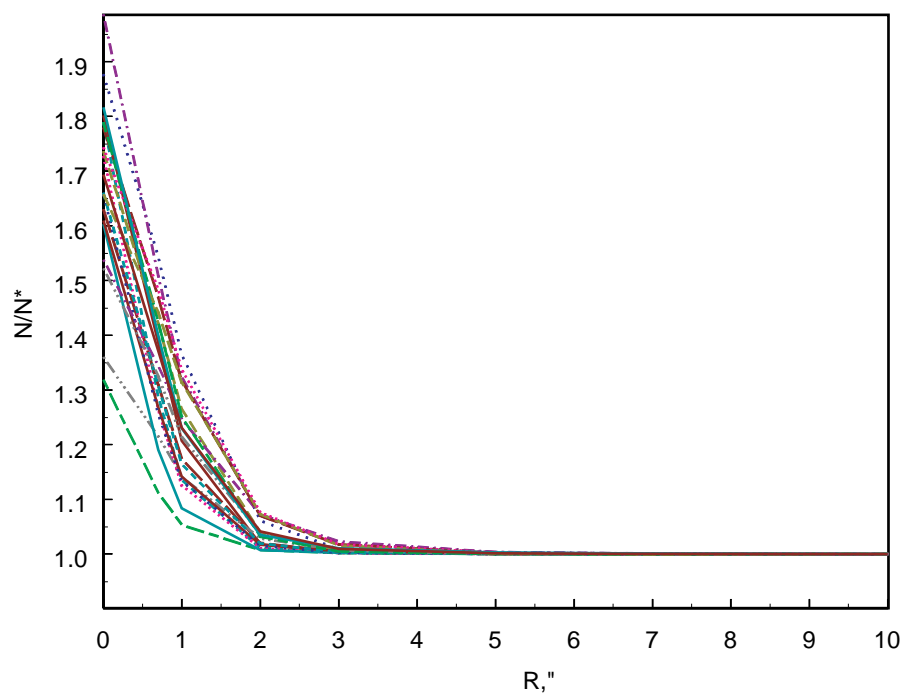


Рис. 1. Относительное уменьшение числа объектов в различных зонах Астрографического каталога в зависимости от радиуса отождествления

сколько центры пластинок по небесной сфере на всех обсерваториях выбирались одинаковым способом, распределение числа изображений, объединяемых в один объект, может косвенно характеризовать наблюдательный материал. По общим условиям международной программы составления Астрографического каталога, на одну звезду должны были приходиться два изображения. Ближе всего к таким характеристикам наблюдения в Гринвичской зоне. На остальных обсерваториях, видимо, измеряли звезды слишком близкие к предельной звездной величине на пластинке, поэтому естественный технологический разброс фотоэмульсий привел к преобладанию одиночных изображений. Например, при различии предельных величин пластинок в  $0.5^m$ , поскольку, согласно [8],  $N_*(V) \propto 3^{V-V_0}$ , то число звезд на разных перекрывающихся пластинках может различаться в  $3^{0.5} \sim 1.7$  раза.

Объединение более чем 2-х изображений в один объект, видимо, связано со значительным процентом двойных звезд и уже упомянутым разбросом предельных звездных величин пластинок (последним можно объяснить также значительное количество объединений 3-х изображений).

## **2 О возможности использования для идентификации звезд оценок блеска из Астрографического каталога**

После того, как изображения звезд объединены в объекты внутри отдельных зон АК, для получившихся списков можно построить функции светимости, т.е. распределения объектов по звездным величинам. Для того, чтобы большие ошибки оценок звездных величин не заслоняли имеющиеся систематические различия зон, разобьем получающиеся графики на три семейства (см. рис.2). На первом

Таблица 2. Распределение числа изображений, объединяемых в один объект при радиусе отождествления  $3''$  в различных зонах Астрографического каталога

Зона Карты неба	Число объединяемых изображений					
	1	2	3	4	5	6
Гринвичская	46044	126941	4496	1228	380	100
Ватиканская	107054	89258	54569	5634	1630	2
Катанская	54842	69611	34699	4342	883	4
Хельсинкская	64204	67495	26034	1422	333	1
Хайдарабад (с)	74735	57878	15201	1356	205	
Юкльская	82804	28398	6345	4		
Потсдамская	79821	25158	4324	203	16	
Оксфордская	164119	145798	51203	4549	853	1
Парижская	116664	95105	37434	3042	1029	
Бордоская	116211	81135	22711	1451	527	1
Тулузская	136270	107975	24708	1061	499	
Алжирская	91923	87179	19648	916	312	
Сан-Фернандо	132363	81373	15523	861	194	
Такубайская	150122	124722	34706	2372	685	2
Хайдарабад (ю)	137144	107100	48005	4748	1502	1
Кордовская	163486	133826	12056	21	1	
Пертская	136451	147915	50228	4301	828	1
Капская	252068	253476	47320	61	1	
Сиднейская	208804	151245	66833	6501	1234	2
Мельбурнская	94103	81958	36450	4778	1038	117
Всего	2409232	2063546	612493	48851	12150	232
	7	8	9	10	11	12
Гринвичская	21	16	67	25	13	3
Катанская	2	1				
Мельбурнская	29	1				
Всего	52	18	67	25	13	3

графике приведены функции светимости зон, показывающих заметный спад в области слабых звезд (Гринвичская, Оксфордская, *Бордоская*<sup>1</sup>, южный Хайдарабад, Кордовская, *Пертская*, *Сиднейская*, Мельбурнская). Видимо, измерения в этих зонах производились до предельной звездной величины пластинки, которая на разных пластинках различается примерно на  $1^m$ . Отсюда и получается наблюдаемый спад функции светимости. Различие наклонов функции светимости (например, в Оксфордской и Кордобской зонах), видимо, может быть объяснено особенностями строения областей Галактики, попадающих в эти зоны.

На следующем графике приведены функции светимости наиболее аккуратно, с точки зрения фотометрии, измеренных зон (Ватиканская, *Хельсинкская*, северный Хайдарабад, *Парижская*, *Тулузская*, Алжирская). Точность оценок звездных величин (по характеру поведения функций светимости) порядка  $0.5^m$ . Систематические различия между зонами даже меньше, чем на предыдущем графике. Использование звездных величин из этих зон для целей идентификации не должно приводить к ошибкам.

На последнем графике собраны данные о зонах с наиболее плохо измеренными величинами (*Катанская*, *Юкльская*, *Потсдамская*, *Такубайская*, *Сан-Фернандо*, *Капская*). В некоторых зонах оценки блеска звезд производились с помощью достаточно произвольных опорных шкал, в других – звездные величины были выведены сотрудниками соответствующих обсерваторий из измеренных диаметров по каким-то редукционным формулам. Ошибки, как легко видеть на графике, имеют грубый и массовый характер. Пользоваться такими звездными величинами даже для целей идентификации крайне опасно.

---

<sup>1</sup>Курсивом выделены зоны, где производилась глазомерная оценка блеска звезд по шкалам, а не с помощью измерения диаметров изображений

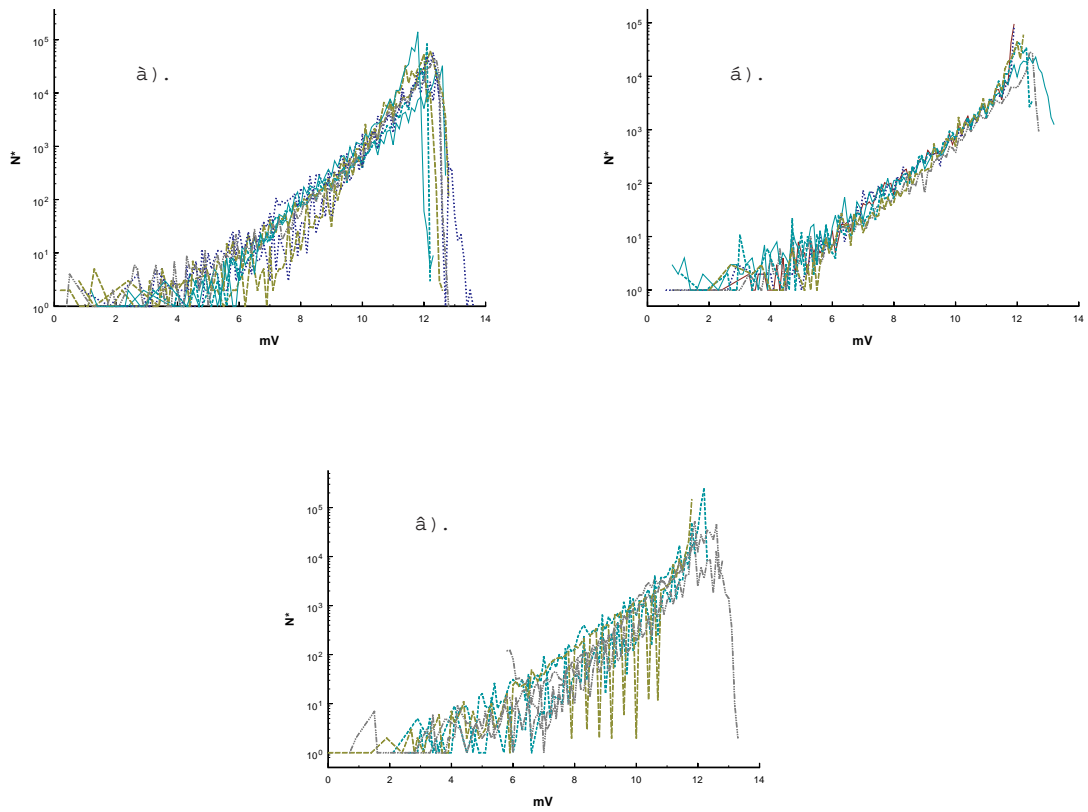


Рис. 2. Функция светимости в различных зонах Астрографического каталога.



### 3 Распределение ближайших соседей звезды на пластинке

В предположении, что макроскопическая структура на пластинке отсутствует, запишем, следуя Чандрасекару [13], уравнение для вероятности  $w(r)$  обнаружить соседнюю звезду внутри кольца радиуса  $r$ :

$$w(r) = \left[ 1 - \int_0^r w(r) dr \right] 2\pi r n, \quad (1)$$

где  $n$  – поверхностная плотность звезд. Заменяя переменную  $w$  на  $z = w(r)/(2\pi r n)$  и продифференцировав (1), получим уравнение:

$$\frac{dz(r)}{dr} = -2\pi r n \cdot z(r), \quad (2)$$

решение которого, очевидно, даст распределение  $w(r)$  на бесконечной плоскости:

$$w(r) = 2\pi r n \cdot e^{-\pi r^2 n}. \quad (3)$$

Среднее расстояние между звездами и его дисперсия при этом будут

$$\begin{aligned} D &= \int_0^{\infty} r \cdot w(r) dr = \frac{1}{\sqrt{\pi n}} \int_0^{\infty} \sqrt{x} e^{-x} dx = \frac{1}{2\sqrt{n}}, \\ \sigma_D^2 &= \int_0^{\infty} (r - D)^2 \cdot w(r) dr = \int_0^{\infty} \frac{x}{\pi n} \cdot e^{-x} dx - D^2 = \frac{1}{\pi n} - \frac{1}{4n}. \end{aligned} \quad (4)$$

Заметим, что конечные размеры пластинки приведут к возникновению поправки:

$$D_{\text{ideal}} - D_{\text{real}} = \frac{1}{2\sqrt{n}} \int_{\pi R_{\text{max}}^2 n}^{\infty} x \cdot e^{-x} dx = \Gamma(2, \pi R_{\text{max}}^2 n), \quad (5)$$

где  $\pi R_{max}^2 n \approx N_*$  – порядка числа звезд на пластинке. Неполная гамма-функция при больших вещественных значениях второго аргумента допускает асимптотическое разложение [1]:

$$\Gamma(2, z) \approx ze^{-z} \left[ 1 + \frac{1}{z} \right] \propto N_* e^{-N_*}, \quad (6)$$

т.е. пренебрежимо мала для большинства пластинок.

В таблице 3 приведены параметры распределения расстояния до ближайшего соседа  $\rho$ , полученные по пластинкам разных зон Астрографического каталога в полиномиальной модели:

$$\rho = \frac{\rho_0}{N_*^\alpha}. \quad (7)$$

Примечания проиллюстрированы рисунком 3. Ошибка среднего при расчете  $\rho$  на пластинках разных зон АК хорошо аппроксимируется выражением

$$\varepsilon_\rho \approx (2500 \div 3000) \cdot N_*^{-1}. \quad (8)$$

Существование вышеописанных зависимостей расстояний до ближайших соседей звезды представляется достаточно очевидным свидетельством пуассоновского характера распределения звезд по небесной сфере (на масштабах фотопластинки). Рассмотрим теперь распределение соседей данной звезды на таких масштабах, где появление других звезд вообще маловероятно, если исходить из зависимости (3):

$$\rho < \frac{D}{\sqrt{N_* - 1}} \sim \sigma_D. \quad (9)$$

Поскольку таких звезд, действительно, относительно мало, представление о поведении функции распределения на малых расстояниях можно получить, объединяя в одну выборку расстояния, измеренные на разных пластинках. В этой процедуре есть одна тонкость. Объединяя в одну выборку последовательность **абсолютных**

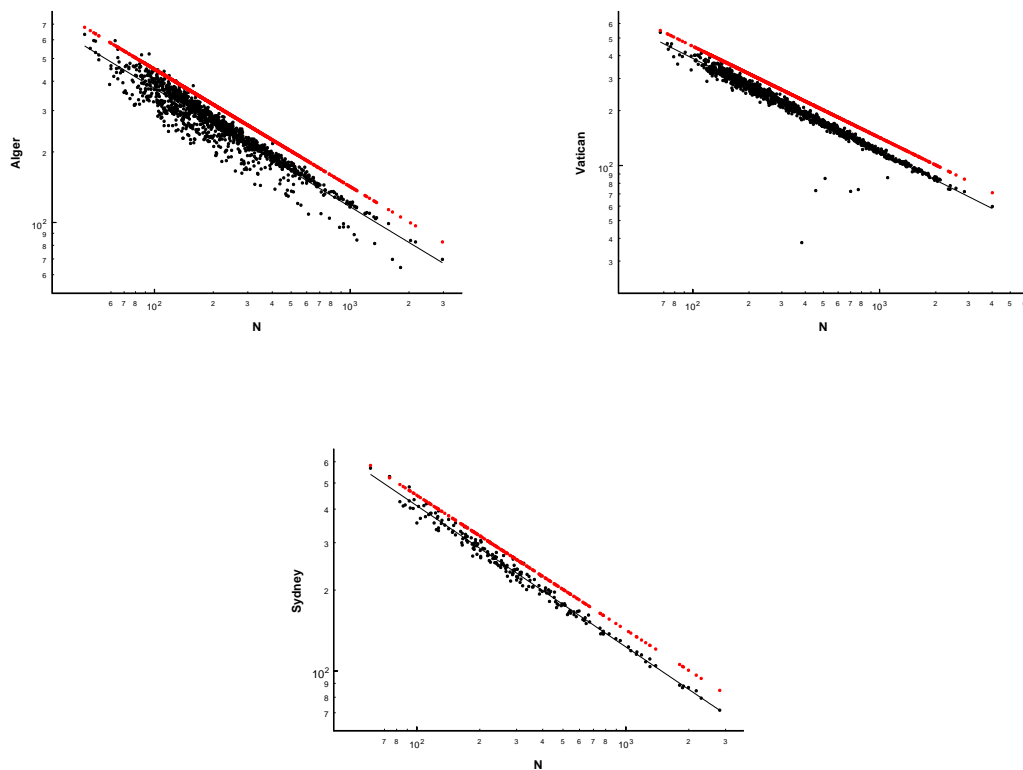


Рис. 3. Зависимость расстояния до ближайшего соседа на пластинках некоторых зон АК. Чуть выше реальных зависимостей проходит кривая для Пуассоновского распределения с условной нормировкой (см. табл.3)

Таблица 3. Параметры зависимости расстояния до ближайшего соседа в различных зонах АК

Зона Карты неба	Параметры в (7)		Примечания	
	$\rho_0$ , "	$\alpha$		
Гринвичская	4189	0.5312	Группа пластинок сильно отличается	
Ватиканская	4099	0.5127		
Катанская	4517	0.5247		
Хельсинкская	4020	0.5099		
Хайдарабад (с)	4284	0.5155		
Юкльская	4176	0.5134		
Потсдамская	3983	0.5136		
Оксфордская	3952	0.5022		
Парижская	4318	0.5182		
Бордоская	4147	0.5126		
Тулузская	4111	0.5126		
Алжирская	3183	0.5047		Есть 2 последовательности
Сан-Фернандо	4620	0.5286		
Такубайская	4515	0.5221		
Хайдарабад (ю)	4655	0.5208		
Кордовская	4281	0.5251		
Пертская	4552	0.5227		
Капская	4271	0.5226		
Сиднейская	4622	0.5221	Удалось просчитать не всю зону	
Мельбурнская	5038	0.5354		
Теория	4500	0.5		

расстояний, мы получим очень красиво выглядящий, но абсолютно нефизичный результат. Каждый может проверить, что при этом зависимость будет выглядеть очень похоже на распределение  $\chi^2$ , чего быть не может. Так как нас интересуют в конечном итоге вероятности найти звезду-соседа на различных расстояниях от данной звезды, мы должны нормировать это расстояние таким образом, чтобы одинаковым значениям нового нормированного расстояния соответствовали **одинаковые вероятности** найти звезду-соседа на **разных** пластинках.

Проще всего добиться указанного поведения объединенной функции распределения, перейдя к относительным расстояниям на каждой пластинке, — поделив все расстояния на данной пластинке на  $\sigma_D$ .

Результат применения подобной процедуры показан на рисунке 4, где все зоны Астрографического каталога разбиты на две группы: большая часть зон, показывающая заметный спад числа соседей при приближении относительного расстояния к 0 (за исключением Ватиканской зоны, демонстрирующей выброс в нуле) и зон северный Хайдарабад, Юккль, Потсдам и Сидней, для которых абсолютное число близких соседей звезды примерно в 3 раза меньше, чем в остальных зонах.

Следует заметить, что число таких ближайших соседей составляет примерно по 3000 изображений звезд в каждой зоне, т.е. общая выборка их для всех зон АК достигает 60000 изображений звезд, или, с учетом перекрытия пластинок, около 40000 двойных звезд во всем Астрографическом каталоге. (При наборе статистики расстояние между каждой парой изображений звезд учитывалось один раз.)

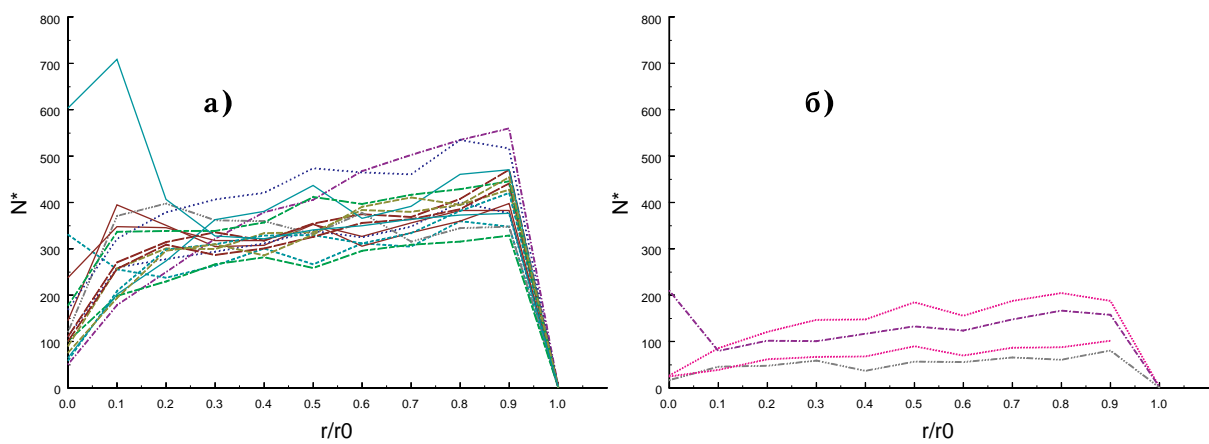


Рис. 4. Число ближайших соседей данной звезды в разных зонах АК. Распределения не нормированы по  $y$ , а по  $x$  приведены к интервалу  $[0; \varepsilon_\rho]$ . На рисунке б) отдельно приведены кривые для зон северный Хайдарабад, Южкль, Потсдам и Сидней. На рисунке а) в области малых расстояний резко выделяется Ватиканская зона.

## Выводы

Приведенные статистические зависимости позволяют более корректно произвести отождествление изображений одних и тех же звезд на отредуцированных пластинках “Карты неба”. В качестве первого приближения в большинстве работ вполне уместно применение однородного критерия – единого для всей зоны АК допустимого расстояния  $\Delta\rho$  между изображениями звезды на разных пластинках. При выборе  $\Delta\rho \in [2 \div 5]$  в Астрографическом каталоге получается примерно 4.6 миллиона звезд, что близко к результатам [9].

Характер поведения функции светимости звезд в разных зонах АК показывает, сколь велики ошибки фотометрии в каталоге в его нынешнем состоянии. Представляется более безопасным воздерживаться от использования оценок блеска звезд при отождествлении изображений на пластинках, принадлежащих разным широтным зонам.

Закономерности распределения изображений звезд на пластинках позволяют разрешать коллизии при отождествлении достаточно плотных групп звезд между разными пластинками. Работа эта требует значительно больших вычислительных затрат, чем уже проделанная, и ее результаты будут опубликованы в следующей статье.

Настоящая работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 00-02-16282, “Стандарт системы координат и фотометрии звездного неба”.

## Список литературы

- [1] Справочник по специальным функциям. Под ред. М.Абрамовица и И.Стиган М.: “Наука”, 830с, 1979
- [2] The Hipparcos and Tycho Catalogues. // ESA-SP1200, vol.1–17, 1997.

- [3] О четырехмиллионном каталоге звезд. Под ред. А.П. Гуляева, В.В. Нестерова. /М.: Изд. Московского университета. 1992, 72 с.
- [4] К.В.Куимов, А.В.Кузьмин, В.В.Нестеров. Новые астрометрические каталоги //CD-ROM, АМТCD\_01, ГАИШ МГУ, 1999
- [5] Куимов К.В., Кузьмин А.В., Нестеров В.В. Астрографический каталог в современной астрометрии. //Известия Академии наук, серия физическая. **62**, вып.9, С. 1774-1781. 1998
- [6] Lasker V.M. et al, The Guide Star Catalog Version 1.1 – An all-sky astrometric and photometric catalog to support the operation of the Hubble Space Telescope. The Association of Universities for Research in Astronomy, Inc. ©1989, 1992
- [7] Сантало Л.А. Интегральная геометрия и геометрические вероятности. М: Наука, 1983, 360 с.
- [8] Seares F.H., van Rijn P.J., Joyner M.C., Richmond M.L. Mean distribution of stars according to apparent magnitude and galactic latitude //Ap.J., **62**, 320–374, 1925
- [9] Urban S.E., Corbin T.E., Wycoff G.L., The AC2000: the Astrographic Catalogue on the Hipparcos System. //CD-ROM, U.S. Naval Observatory, September 1997.
- [10] Urban S.E., Corbin T.E., Wycoff G.L. The ACT Reference Catalog //Bull. American Astron. Soc., **191**, N 57.07, 1997
- [11] Høg E., Kuzmin A., Bastian U., Fabricius C., Kuimov K., Lindgren L., Makarov V., Röser S. Tycho Reference Catalogue. //Astron. Astrophys. **335**, P.L65, 1998
- [12] Høg E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S.E., Corbin T.E., Wycoff G.L., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. The Tycho-2



Catalogue on CD-ROM, including Guide to Tycho-2, Copenhagen University Observatory, 2000

- [13] С.Чандрасекар. Стохастические проблемы в физике и астрономии. М: Гос.изд. иностр.лит., с., 1947