

УДК 521.95:524.6-34

## ФОНАК: астрографический каталог программы ФОН

В. С. Кислюк, А. И. Яценко, Г. А. Иванов, Л. К. Пакуляк, Т. П. Сергеева

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины,  
03680, ГСП., Киев-127, Голосиив

*Описана методика создания первой версии астрографического каталога (ФОНАК 1.0) по измерениям пластинок программы ФОН (голосеевское перекрытие северного неба) с использованием данных Астрографического Каталога. Приводятся основные сведения о программе ФОН. Детально рассмотрена процедура измерений пластинок на АИК ПАРСЕК, а также методика их редукции. Обсуждаются результаты сравнения полученного каталога с данными каталогов HIPPARCOS и CMC11.*

*ФОНАК: АСТРОГРАФІЧНИЙ КАТАЛОГ ПРОГРАМИ ФОН, Кислюк В. С., Яценко А. І., Иванов Г. О., Пакуляк Л. К., Сергеева Т. П. — Описано методику створення першої версії астрографічного каталога (ФОНАК 1.0) за вимірами платівок програми ФОН (голосіївське перекриття північного неба) з використанням даних Астрографічного Каталога. Наведено основні відомості про програму ФОН. Детально розглянуто процедуру вимірювань платівок на АВК ПАРСЕК, а також методику їхньої редуції. Обговорюються результати порівняння отриманого каталога з даними каталогів HIPPARCOS і CMC11.*

*FONAC: THE ASTROGRAPHIC CATALOGUE OF THE FON PROJECT, by Kislyuk V. S., Yatsenko A. I., Ivanov G. A., Pakuliak L. K., Sergeeva T. P. — We describe the technique for constructing the first version of the astrographic catalogue (FONAC 1.0) from the measurements of the FON project plates (the Golosiv overlapping of the northern sky) using the Astrographic Catalogue data. Some characteristics of the FON project are given. The procedure of plate measurements with the PARSEK measuring machine as well as the methods of their treatment are considered in detail. The results of comparing the catalogue obtained with the HIPPARCOS and CMC11 catalogues are discussed.*

### ВВЕДЕНИЕ

Каталог ФОНАК 1.0 содержит положения, собственные движения и фотометрические величины  $B$ ,  $B-V$ ,  $B-R$  для 2004701 звезд списка Астрографического каталога (АС) в зоне склонений от  $-2^\circ$  до  $+90^\circ$ . Средняя эпоха положений — 1988.19. Каталог ФОНАК основан на измерениях около 1700 пластинок, полученных в рамках программы ФОН («Фотографический обзор неба») на двойном широкоугольном астрографе ( $D = 40$  см,  $F = 2$  м) Главной астрономической обсерватории (ГАО) НАН Украины (Киев, Голо-

сиив). Для вывода собственных движений звезд в качестве первых эпох наблюдений привлечены данные каталога AC2000 [30], который использован также как входной каталог для автоматической измерительной машины. Фотометрические характеристики звезд определены по данным каталогов АСТ [29], GSC 1.1 [20], USNO A2.0 [22]. Погрешность данных каталога ФОНАК в зависимости от яркости объектов 0.18—0.25<sup>m</sup> для положений, 0.003—0.005<sup>m</sup>/год для собственных движений и 0.18—0.25<sup>m</sup> для фотометрии. Ошибки увеличиваются, как правило, для звезд ярче 7.5<sup>m</sup> и слабее 11.5<sup>m</sup>.

## 1. ПРОГРАММА «ФОТОГРАФИЧЕСКИЙ ОБЗОР НЕБА»

### 1.1. Наблюдения

Программа четырехкратного перекрытия северного неба, известная как программа ФОН, была предложена в ГАО НАНУ в 1976 г. [7]. В ее выполнении приняли участие шесть обсерваторий бывшего СССР, в которых установлены однотипные широкоугольные астрографы производства фирмы К. Цейс (Йена, Германия) с одинаковой апертурой ( $D = 40$  см), но разным фокусным расстоянием, а именно:  $F = 2$  м (Голосиив, Дюшамбе, Звенигород, Зеленчук) и  $F = 3$  м (Абастумани, Китаб).

В табл. 1 приведены основные характеристики обсерваторий-участниц программы ФОН. Для обеспечения четырехкратного перекрытия северного неба шесть инструментов были объединены в четыре группы, как показано в табл. 1. Каждая группа (один или два телескопа) выполняла однократное перекрытие всего северного неба. Между группами центры пластинок смещены на 2° по прямому восхождению и/или склонению. В пределах каждой группы центры площадок смещались по прямому восхождению с учетом схождения меридианов, а именно: 16<sup>m</sup> в зонах склонений от -2° до +60°, 32<sup>m</sup> (от +60° до +75°) и 64<sup>m</sup> (от +75° до +90°).

Перед постановкой массовых наблюдений по программе ФОН были проведены необходимые подготовительные работы: разработка оптимальной схемы перекрытия неба, исследования астрографов и др. [2, 3]. В результате этих исследований была согласована единая методика наблюдений на всех астрографах, в частности, в качестве оптимального рабочего поля принято поле 4°×4° для всех астрографов в отличие от номинального поля (8°×8°) и (5°×5°) соответственно для астрографов с фокусным расстоянием 2 и 3 м. Для учета влияния уравнения блеска в программе ФОН применен метод двух экспозиций: длинной — продолжительностью 18 мин и короткой — продолжительностью 40 с. Это обеспечивало на пластинках с эмульсией ORWO ZU21 получение граничных изображений звезд до  $B = 15...16^m$  и  $B = 12...13^m$  соответственно.

Систематические наблюдения по программе ФОН были начаты в 1982 г. В результате распада СССР координация работ по выполнению наблюдений

Таблица 1. Обсерватории и наблюдения по программе ФОН

Перекрытие	Обсерватория	Широта	Склонение		Количество пластинок	
			от	до	требуется	получено
1	Китаб, Узбекистан	41°45'	-4°	+32°	900	~500
	Голосиив, Украина	50 22	+32	+90	952	~2300
2	Зеленчукская*, Россия	43 47	-6	+90	1783	1783
3	Абастумани, Грузия	41 35	-6	+30	900	900
	Звенигород, Россия	55 45	+30	+90	973	973
4	Дюшамбе, Таджикистан	38 33	-4	+90	1762	~1370

Примечание. \* — Наблюдательная станция Астрономической обсерватории им. В. П. Энгельгардта (Татарстан).

по программе ФОН была нарушена, и не все обсерватории смогли выполнить наблюдения в полном объеме. Далекое не полностью, как это следует из табл. 1, выполнены наблюдения в Дюшамбе и особенно в Китабе. В связи с последним обстоятельством в Голосиеве было отснято все северное небо, включая и китабскую зону перекрытия. Наблюдения в полном объеме здесь были завершены в 1995 г.

## 1.2. Измерения

Коллекция фотографических пластинок, полученных в рамках программы ФОН в Голосиеве, была использована для построения обзорного астрометрического каталога [23], содержащего положения и собственные движения всех звезд списка АС. Каталог АС использовался двояко: 1) как входной каталог предварительных координат для измерительной машины и 2) как первые эпохи для вывода собственных движений звезд. На голосиивском автоматическом измерительном комплексе (АИК) ПАРСЕК (Программируемый автоматический радиально-сканирующий координатометр) [26] были измерены около 1600 астронегативов, полностью покрывающих северное небо от  $+2^\circ$  до  $+90^\circ$  по склонению. Кроме того, были измерены 90 негативов, отснятых в зоне склонений от  $-2^\circ$  до  $+2^\circ$  в 1981—1982 гг. в Китабе. Измерения пластинок выполнялись с 1991 по 1998 гг. АИК ПАРСЕК позволяет измерять прямоугольные координаты звездных изображений с повторяемостью  $\pm 0.6$ — $2$  мкм в зависимости от качества изображений на пластинках, а звездные величины — с точностью  $\pm 0.01$ — $0.02^m$  [26]. Скорость измерений составляет от 400 до 900 изображений в час в зависимости, главным образом, от точности предварительных координат измеряемых звезд. Реальная точность измерений зависит от качества изображений звезд, их нерегулярностей, формы и контрастности. Ее оценка получена из сравнения измерений изображений, полученных для двух экспозиций звезд (длинной и короткой). Оценка средних квадратичных разностей измерений типичной пластинки программы ФОН для двух экспозиций составила  $\pm 4.1$  мкм по обеим координатам. Средние квадратичные ошибки измерений положения одной звезды на пластинках программы ФОН составили 2.9 мкм (2.7 мкм и 3.2 мкм для длинной и короткой экспозиций соответственно).

Первоначально в качестве входного каталога для выполнения измерений в зонах склонений от 0 до  $+30^\circ$  использовался каталог Фресно [15], содержащий упорядоченные данные АС с эпохой координат В1950.0. Для склонений больше  $+30^\circ$  и меньше  $+4^\circ$  в качестве входного для измерения пластинок использовался каталог, полученный идентификацией объектов в электронных версиях каталогов АС и GSC в ГАИШ (Москва). Каталог (условно названный АС-GSC) содержит положения в системе J2000, оценки собственных движений звезд, выведенные из разностей положений в составляющих каталогах, и оценки звездных величин.

Все пластинки измерены при одном положении в измерительном приборе. В пределах полного рабочего поля пластинки размером  $4^\circ \times 4^\circ$  измерялись изображения предполагаемых опорных звезд из каталога РРМ для обеих экспозиций. Более слабые объекты ( $10.5^m$ — $14.5^m$ ) измерялись только по длинной экспозиции и на поле, размер которого по прямому восхождению с учетом схождения меридианов равнялся  $4^\circ \cos \delta$ .

Для обеспечения высокой точности измерений были проведены специальные исследования отдельных узлов АИК ПАРСЕК с целью выявления собственных им инструментальных ошибок случайного и систематического характера.

Аппаратно-программное обеспечение измерений. Прежде всего исследовались короткопериодические погрешности интерполяторов (основные

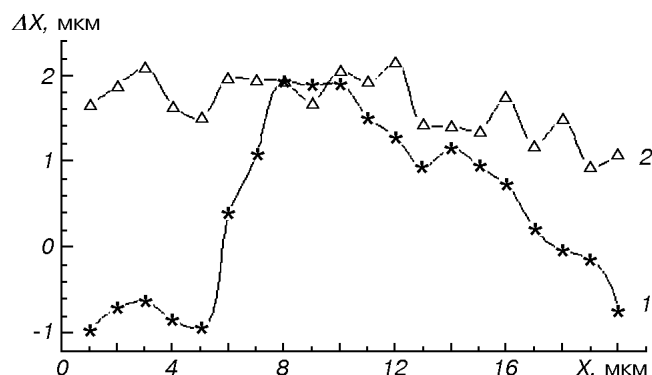


Рис. 1. Характеристики интерполятора X, полученные до настройки (1) и после настройки аппаратуры (2)

узлы системы отсчета координат) для различных участков измерительных линеек и в широком диапазоне температур. При этом не было выявлено зависимости ни от температуры, ни от участка шкалы, но была обнаружена непредсказуемая изменчивость вида и амплитуды со временем, причем, иногда разброс значений достигал 5 мкм. Проведенные технические и программно-методические мероприятия позволили стабилизировать и свести к нескольким долям микрона значения поправок, повысить надежность и устойчивость работы интерполяторов.

На рис. 1 показан типичный вид зависимости короткопериодической погрешности интерполятора: кривая 1 — до проведенных доработок, кривая 2 — после.

Кроме того, были обнаружены спорадические отскоки отсчетов системы координат с амплитудой от 8 до 72 мкм, вызванные неучтенными эффектами логики аппаратно-программного взаимодействия при передаче отсчетов координат из аппаратуры в управляющую ЭВМ. Они были полностью устранены путем разработки блокирующей программы и соответствующими изменениями в электронных схемах и программах драйверов.

Для обеспечения однородности данных измерений, получаемых на длительном отрезке времени были разработаны методы обеспечения тождественности настройки АИК ПАРСЕК. Оптимальные значения рабочих параметров определялись по результатам проведенных исследований [4] и фиксировались в поле параметров комплекса управляющих программ. Было выявлено, что для разных типов пластинок и различных телескопов необходимо определение своих оптимальных значений рабочих параметров.

С целью обеспечения неизменности метрологических характеристик комплекса на протяжении измерений были разработаны и реализованы алгоритмы и программы контроля и диагностики аппаратуры АИК ПАРСЕК, а также методики и регламент проведения метрологических и профилактических работ. Повторяемость измерений контролировалась с помощью специальной тест-пластинки, на которой нанесены несколько объектов различного диаметра с очень резкими краями, правильной формы и однородной плотности. Использование тест-пластинки позволяет оценивать надежность измерений с точностью до  $\pm 0.6$  мкм.

**Уравнение блеска АИК ПАРСЕК.** Исследования анализатора изображений АИК ПАРСЕК показали, что погрешности изготовления и юстировки оптических элементов создают остаточную неравномерность освещенности в плоскости изображения, что может послужить источником инструментального уравнения блеска (УБ). Исследования УБ, проведенные стандартным способом (измерения пластинок в прямом и обратном положениях) показали, что получаемые оценки отличаются не только по величине, но в некоторых случаях и по знаку, и зависят от положения изображения на пластинке, что противоречит природе инструментального уравнения блеска

АИК ПАРСЕК. Специальными исследованиями было показано, что только при измерениях изображений предельно малых диаметров, которые, как правило, представляют собой едва выделяющуюся на уровне фона группу зерен, УБ может быть значимым. Причем на крупнозернистых пластинках больший вклад в погрешность определения положения таких изображений вносят локальная неоднородность и градиент фона пластинки.

В процессе исследований уравнения блеска АИК ПАРСЕК был зафиксирован факт разъюстировки узла сканирования, что выразилось в увеличении неравномерности освещенности. При этом его влияние стало сказываться и на определении положений изображений большого диаметра. Для исключения подобных ситуаций на протяжении всего периода измерений проводился периодический контроль неравномерности освещенности узла сканирования. Кроме того, были выявлены сбои в работе анализатора изображений случайного характера, вносившие в отсчеты координат искажения до 35 мкм. Устранение этого источника ошибок обеспечено путем разработки специальной контролирующей и блокирующей программы.

**Фотометрическое обеспечение измерений.** АИК ПАРСЕК является высокоточным фотометром и может определять звездные величины с точностью  $\pm 0.06 \pm 0.14^m$  в зависимости от телескопа, типа пластинки и качества изображений [1, 8].

Значительная неоднородность плотности почернения вуали на пластинках программы ФОН затрудняла проведение точных измерений фотометрических характеристик изображений. Для обеспечения высокоточной фотометрии пластинок в автоматическом режиме был применен способ фотометрии изображений с учетом вариаций плотности почернения вуали по пластинке, основанный на калибровке фотоэлектронного канала при измерении каждого изображения.

На рис. 2 приведены характеристические кривые, отображающие данные измерений с двумя методами учета фона. Кривая 1 получена для метода вычитания значений локальной плотности почернения фона, кривая 2 представляет метод калибровки фотоэлектронного канала при измерении каждого изображения. Полученные для этих кривых с.к.о. единицы веса составляют соответственно  $\pm 0.08^m$  и  $\pm 0.11^m$  (без учета фона:  $\pm 0.44^m$  для одной пластинки).

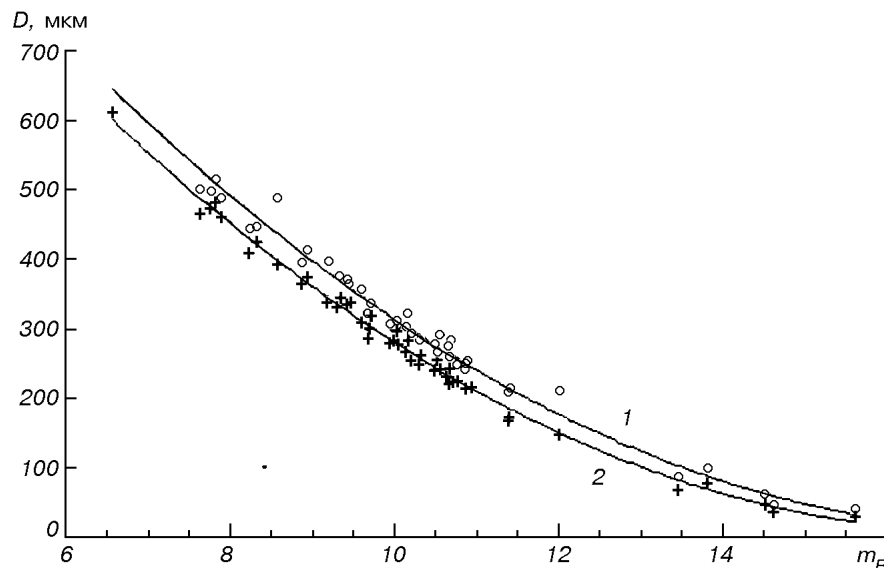


Рис. 2. Сравнение двух методов учета фона: кривая 1 — вычитание значений локальной плотности почернения фона, кривая 2 — метод калибровки

**Система анализа нестандартных ситуаций.** Для исключения возможности нарушения непрерывности процесса измерений или потери точности и достоверности получаемых результатов была создана система анализа нестандартных ситуаций, позволяющая выявлять такие ситуации в процессе измерений и, по возможности, устранять их последствия. При этом в выходном файле отмечалась нестандартная ситуация, возникшая при измерении изображения. Контролировались следующие ситуации: превышение заданных пределов различия значений предварительных и измеренных координат, а также предельных значений величин измеренных диаметров; отсутствие изображения в поле зрения сканера; невозможность определения центра изображения за указанное время и с заданной точностью; значительная неоднородность фона вокруг изображения; сбой аппаратуры.

Методика составления входного каталога AC-GSC не исключала возможности наличия предпосылок для возникновения дополнительных нестандартных ситуаций, не анализируемых в процессе измерений. К ним относятся: наличие в каталоге до пяти изображений одного и того же объекта, иногда с отличием блеска до  $1.5^m$ ; неразделенность тесных двойных и кратных систем; фиктивные объекты, источником происхождения которых является неверная взаимная идентификация составляющих каталогов. Для трех пятиградусных зон каталога со склонениями от  $25^\circ$  до  $40^\circ$  количество таких случаев составило 2.5—3.5 %. Для уменьшения влияния этих предпосылок на основе входного каталога с привлечением данных GSC была разработана методика обнаружения и устранения источников ошибок, связанных с входными данными, или их маркировки с последующей визуальной проверкой в процессе непосредственных измерений. Критерии маркировки определялись из анализа гистограмм распределения разностей координат тесных изображений, близких изображений (критерий при этом вводился переменным в зависимости от звездных величин объектов), а также из анализа возможности наложения изображения второй экспозиции на изображения первой экспозиции. Подобный анализ исключал критические случаи практически полностью для пластинок с количеством измеряемых звезд до 1500, в 75 % для пластинок с количеством звезд до 3500 и в 50 % для пластинок с количеством звезд свыше 4000.

Метки нестандартных ситуаций в дальнейшем анализировались и учитывались в программах предварительной обработки результатов измерений.

**База данных измерений.** Разработанный пакет программного обеспечения типа «интерфейс пользователя» позволил создавать, пополнять и корректировать базу данных измеряемых пластинок, составлять программу их измерений, получать справочные данные об измеренных пластинках, контролировать ход измерений, давать информацию об измерениях по зонам склонений, готовить файлы входной информации для каждой измеряемой пластинки, контролировать процесс измерений (формирование входного файла, контроль последовательности измерений, контроль устойчивости характеристик прибора, получение по каждой пластинке статистических характеристик процесса измерений и предварительных оценок точности). Непосредственные результаты измерений пластинок программы ФОН содержатся в соответствующем архиве данных, который разделен на четырехградусные зоны по прямому восхождению, в соответствии с измеряемыми площадками, и упорядочен по номерам пластинок. Архив доступен на CD-ROM по предварительному заказу.

## 2. РЕДУКЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. Положения и собственные движения звезд

Процедура редукции измерений кратко описана в работах [10, 11]. Первоначально в качестве опорной системы использовался каталог PPM [24].

Изображения звезд этого каталога измерялись для обеих экспозиций. В качестве редуцированных моделей по каждой координате в отдельности применялись неполные кубические полиномы, т. е. для каждой пластинки использовались неортогональные модели пластинок. Постоянные пластинок определялись из комбинации решений уравнений связи для обеих экспозиций. Решение условных уравнений выполнялось методом ортогонализации Грамма—Шмидта с целью оценки количества значимых членов в редуцированных моделях. СКО единицы веса таких решений оценивались как 3.3 мкм и 3.2 мкм (или 0.33" и 0.32") соответственно по координатам  $x$  и  $y$ . Кроме того, выполнялись редукции отдельно для длинной и короткой экспозиций. Аналогичные оценки составляли: 3.1 мкм и 2.8 мкм для длинной экспозиции и 3.3 мкм по обеим координатам для короткой экспозиции. Основываясь на результатах редукции с каталогом PPM для учета влияния ошибок измеренных координат, зависящих от положений и звездных величин (главным образом типа комы и уравнения блеска), были построены маски аберраций [6]. Для этой цели применялся каталог GSC1.0 [20]. Вся процедура редукиций с использованием каталога PPM в качестве опорного обеспечивала получение положений, собственных движений и звездных величин измеренных звезд с ошибками 0.3", 0.005"/год и 0.2<sup>m</sup> соответственно [5].

После получения результатов космической миссии HIPPARCOS, завершившейся созданием беспрецедентного по точности астрометрического каталога [27], была выполнена пробная редукция измерений восьми пластинок программы ФОН. Кроме более высокой точности данных на эпоху 1991.25, очень близкую к средней эпохе наблюдений по программе ФОН (1988.19), каталог HIPPARCOS имеет также то преимущество по сравнению с каталогом PPM, что он содержит звезды в большем диапазоне звездных величин ( $V_{\text{lim}} = 12.5^m$ ). Это позволяет лучше учитывать уравнения блеска в измерениях пластинок программы ФОН. Выполнение редукиций с помощью каталога HIPPARCOS, несмотря на уменьшение количества звезд примерно в три раза по сравнению с каталогом PPM, привело к уменьшению ошибок привязки в полтора раза как для координат, так и для звездных величин [18]. СКО единицы веса решений уравнений связи (1) с использованием в качестве опорного каталога HIPPARCOS составляет  $\sigma_{x,y} = 0.20''$ . Сравнение решений с использованием данных каталогов HIPPARCOS и PPM для упомянутых восьми пластинок приведено в табл. 2. Попутно отметим, что использование в качестве опорного каталога Tycho [27], несмотря на трехкратное увеличение числа опорных звезд по сравнению с PPM, не дало увеличения точности привязки положений вследствие недостаточной точности собственных движений звезд в каталоге Tycho.

Таблица 2. Средние квадратичные ошибки единицы веса координат ( $\sigma_{0x}$ ,  $\sigma_{0y}$ ) и звездных величин —  $\sigma_{0m}$  восьми избранных пластинок с использованием опорных каталогов PPM и HIPPARCOS;  $n$  — число опорных звезд на пластинке

Номер пластинки	PPM				HIPPARCOS			
	$\sigma_{0x}$	$\sigma_{0y}$	$\sigma_{0m}$	$n$	$\sigma_{0x}$	$\sigma_{0y}$	$\sigma_{0m}$	$n$
1	0.22"	0.25"	0.24 <sup>m</sup>	106	0.25"	0.24"	0.17 <sup>m</sup>	35
2	0.23	0.27	0.17	75	0.19	0.22	0.15	22
3	0.28	0.28	0.21	73	0.20	0.19	0.09	24
4	0.39	0.23	0.20	33	0.15	0.17	0.14	11
5	0.35	0.40	0.25	68	0.24	0.26	0.14	20
6	0.35	0.30	0.18	93	0.19	0.21	0.18	26
7	0.27	0.27	0.15	44	0.15	0.26	0.11	20
8	0.24	0.31	0.18	61	0.25	0.18	0.16	16
Среднее	0.29	0.29	0.20	69	0.20	0.22	0.14	22

Наконец, после появления двух новых каталогов: AC2000 [30], содержащего положения звезд всех зон AC в системе каталога HIPPARCOS и АСТ [29], объединяющего данные каталогов AC2000 и Tycho, была принята новая редукция измерений пластинок программы ФОН, в которой каталог АСТ использован в качестве опорного, а каталог AC2000 — в качестве первых эпох наблюдений для вывода собственных движений звезд. Поскольку в некоторых площадках количество звезд HIPPARCOS, попадающих на рабочее поле пластинки, меньше 10, предпочтение было отдано АСТ из-за большого количества опорных объектов.

В отличие от прежней обработки, редукция с каталогом АСТ производилась отдельно для длинной и короткой экспозиций. Это обуславливалось тем, что количество опорных звезд в этом случае является вполне достаточным для проведения отдельной редукции. В окончательном виде, связь измеренных на пластинке координат звезд  $x$ ,  $y$  и тангенциальных координат звезд  $\xi$ ,  $\eta$  на эпоху наблюдений, вычисленных с использованием каталога АСТ, представлялась в виде

$$\begin{aligned}\xi &= ax + by + c + dx^2 + exy + f(m - m_0) + g(m - m_0)x, \\ \eta &= a'x + b'y + c' + d'y^2 + e'xy + f'(m - m_0) + g'(m - m_0)y,\end{aligned}\tag{1}$$

где  $m$  и  $m_0$  —  $B$ -величины звезд и их средние значения;  $a$ ,  $b$ , ...,  $g'$  — параметры редукции. СКО единицы веса решений составляют в среднем по всем пластинкам  $0.25''$  для длинной экспозиции и  $0.32''$  для короткой.

В качестве окончательных значений координат звезд, для которых измерялись два изображения (в основном это звезды списка каталога РРМ), принимались средневзвешенные значения с весами, определяемыми ошибками единицы веса решения условных уравнений (1) для длинной и короткой экспозиций. Собственные движения звезд вычислялись из сравнения полученных нами координат с положениями из каталога AC2000, взятого в качестве наблюдений первых эпох.

## 2.2. Фотометрия

Первоначально для калибровки измеренных диаметров звезд применялся каталог РРМ. Связь систем диаметров и звездных величин представлялась в виде

$$\begin{aligned}m - m_0 &= a_0 + a_1(D - d_0) + a_2(D - d_0)^2 + a_3(D - d_0)^3 + 0, \\ m - m_0 &= a_0 + a_1(d - d_0) + a_2(d - d_0)^2 + a_3(d - d_0)^3 + \Delta m.\end{aligned}\tag{2}$$

Здесь  $a_i$  — параметры калибровочной кривой;  $\Delta m$  — смещение между двумя частями этой кривой, полученное при разных экспозициях;  $D$  и  $d$  — диаметры изображений звезд, соответствующие длинной и короткой экспозициям;  $d_0$  — среднее значение измеренных диаметров. Сравнение точности решений уравнений (2) для нескольких пластинок с использованием каталогов HIPPARCOS и РРМ показано в табл. 2. Средние квадратичные ошибки звездных величин, с использованием обеих экспозиций варьируются для разных пластинок в пределах  $0.13$ — $0.25^m$ .

Для окончательной калибровки измеренных диаметров звезд использовались  $B_J$ -величины в системе Джонсона из каталога АСТ. Причем, как и в случае редукции координат, объединенная редукция измеренных диаметров также не выполнялась. Более того, для окончательных фотометрических оценок совсем не использовались короткие экспозиции.

$B_J$ -величины вычислялись по формуле

$$B_J = V_T + 0.894(B - V)_J,\tag{3}$$



где  $V_T$  — визуальные звездные величины, в каталоге Tycho [27], а  $(B-V)_J$  — значения  $B-V$ -величин в системе Джонсона по каталогу Tycho.

Дополнительно для калибровки звезд от  $12^m$  до  $14.5^m$  использовались данные каталога USNO-A 2.0 [22]. Приведенные в этом каталоге  $B$ -величины переводились в систему  $B_J$  согласно выражению

$$B_{UJ} = B_U + a + b(B_U - B_0) + c(B_U - R_U). \quad (4)$$

Здесь  $B_{UJ}$  —  $B$ -величины из каталога, редуцированные к системе Джонсона;  $B_U$ ,  $R_U$  — соответствующие величины, взятые из каталога USNO-A 2.0;  $B_0$  — средние значения  $B_U$ -величин;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  — коэффициенты связи, найденные по общим для каталогов АСТ и USNO звездам.

Уравнения связи диаметров изображений измеренных звезд для длинных экспозиций и звездных величин записываются в виде

$$B_J = a_0 + a_1(D - D_0) + a_2(D - D_0)^3 + a_3x + a_4y + a_5|x| + a_6|y|, \quad (5)$$

где  $a_i$  ( $i = 0, \dots, 6$ ) — коэффициенты связи. СКО единицы веса решения условных уравнений (5) в среднем составили  $0.2^m$  по всем пластинкам.

Для определения показателей цвета  $B-V$  использован каталог GSC1.1 [20], причем предварительно  $V$ -величины, приведенные в каталоге GSC1.1, редуцировались к системе  $V_J$  — величин, взятых из каталога Tycho, по формуле

$$V_{(GSC)_J} = V_{GSC} + a + b(V_J - V_0) + c(B - V). \quad (6)$$

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  в выражении (6) определялись отдельно для различных полос пропускания в каталоге GSC.

Аналогичным образом для определения показателей цвета  $B-R$  использовались  $R$ -величины, приведенные в каталоге USNO-A 2.0. Для улучшения  $R$ -системы и редукции ее на фотометрическую систему Джонсона использовалась голосиивская база данных для звезд с большими собственными движениями, созданная Г. А. Ивановым по литературным источникам.

### 3. ОПИСАНИЕ КАТАЛОГА ФОНАК

После редукции пластинок мы имели около 1700 файлов, содержащих вычисленные положения, собственные движения и фотометрические характеристики звезд для отдельных пластинок программы ФОН на эпоху и равноденствие J2000.0. Но в некоторых зонах (в зависимости от склонения) для опорных звезд имелось двукратное перекрытие рабочих полей пластинок. Поэтому все характеристики этих объектов усреднялись с весами, зависящими от ошибок единицы веса редукций данной пластинки. Для удобства каталог был разбит на отдельные файлы по зонам склонений. Первая версия каталога ФОНАК содержит положения, собственные движения и  $B_J$ -величины для 2004701 звезды списка Астрографического Каталога, включая  $(B - V)_J$ -значения для 1712420 звезд и  $(B - R)_J$ -значения — для 1779442 звезд в 93 одноградусных зонах склонений (от  $-2^\circ$  до  $+90^\circ$ ). Средняя эпоха каталога составляет 1988.19. Точность каталога для звезд  $10^m$  характеризуется ошибками  $0.2''$ ,  $0.003''/\text{год}$  и  $0.18^m$  соответственно для положений собственных движений и звездных величин. Для более слабых и более ярких звезд ошибки увеличиваются (рис. 3).

Каталог ФОНАК передан в Страсбургский центр звездных данных

<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/261>

Он может быть получен также по ftp

<ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/I/261>

или

<ftp://ftp.mao.kiev.ua/pub/astro/fonac>

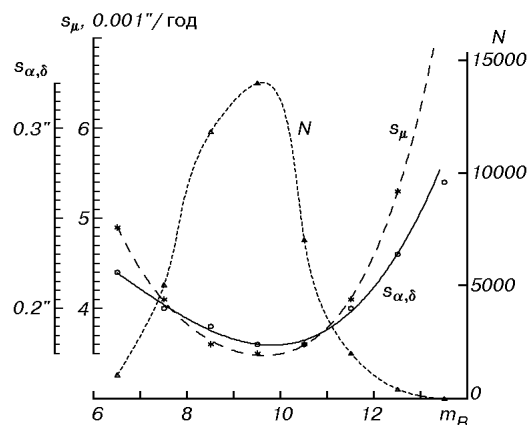


Рис. 3. Средние квадратичные разности координат и собственных движений звезд каталогов ФОНАК и HIPPARCOS в зависимости от звездной величины

Таблица 3. Структура записи файлов s\*.dat и n\*.dat каталога ФОНАК

Bytes	Format	Units	Label	Explanations
2—3	I2	h	RAh	Right Ascension J2000.0, epoch 2000
4—5	I2	min	RAm	Right Ascension J2000.0
6—10	I5	ms	RAms	Right Ascension J2000.0
12	A1	—	DE-	Sign of declination
13—14	I2	deg	DEd	Declination J2000.0, epoch 2000
15—16	I2	arcmin	DEm	Declination J2000.0
17—20	I4	10 mas	DEcs	Declination J2000.0
21—27	I7	0.1 mas/yr	pmRA	Proper Motion in RAcos(Dec)
28—34	I7	0.1 mas/yr	pmDE	Proper Motion in Dec
36	I1	—	Qflag	Astrometric Quality flag <sup>1)</sup>
38—41	I4	0.01 mag	Bmag	Johnson Blue magnitude
43—46	I4	0.01 mag	B—V	Johnson B—V <sup>2)</sup>
48—51	I4	0.01 mag	B—R	B—R <sup>3)</sup>
53	I1	—	q_B mag	Photometry Quality flag <sup>4)</sup>
55—58	I4	0.01 yr	Ep-1900	Epoch of observation
60—66	I7	—	AC2000	AC2000 (Cat. /247) Number
67	I1	—	ACT	ACT catalogue flag <sup>5)</sup>

Примечания.

1) — Метки при Qflag обозначают: отсутствие метки — рекомендуемая астрометрическая опорная звезда; 2 — сомнительная астрометрическая опорная звезда; 3 — звезда имеет сомнительное астрометрическое положение и собственное движение, заимствованы данные каталога АСТ;

2) — при B—V: проставляется 9999 при отсутствии данных;

3) — при B—R: 9999 проставляется при отсутствии данных;

4) — при q\_Bmag: отсутствие метки — рекомендуемая B-фотометрия; 1 — отсутствие данных V в каталоге GSC для определений B—V; 2 — данные V из каталога GSC не были использованы для определений B—V ввиду их неуверенных определений в этом регионе (близость к B-полосе); 3 — звезда имеет сомнительную фотометрию, данные заимствованы из каталога АСТ; 4 — отсутствуют данные V в каталоге GSC для определений B—V, которые заимствованы из каталога АСТ; 5 — сомнительная B-фотометрия;

5) — при АСТ: отсутствие метки — звезда отсутствует в каталоге АСТ; 1 — звезда содержится в каталоге АСТ.

Подготовлена версия каталога ФОНАК на CD-ROM. Краткая информация о каталоге ФОНАК содержится в [17]. Каталог ФОНАК содержит файлы: readme.fon (описание каталога), файлы вида s\*.dat (записи каталога для трех одноградусных зон в интервале склонений от  $-2^\circ$  до  $0^\circ$ ), файлы вида n\*.dat (записи каталога для 90 одноградусных зон в интервале склонений от  $0^\circ$  до  $+90^\circ$ ). В табл. 3 приводится структура записи файлов s\*.dat и n\*.dat.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

С целью исследования систематических и случайных ошибок первой версии каталога ФОНАК выполнено его сравнение [12] с данными высокоточных астрометрических каталогов HIPPARCOS [27] (ошибки координат и собственных движений меньше  $0.001''$ ) и CMC11 [14] (ошибки координат составляют в среднем  $0.06''$ , а собственных движений —  $0.004''/\text{год}$ ). Для сравнения отобрано 41759 и 66783 звезды каталога ФОНАК, общих соответственно с каталогами HIPPARCOS и CMC11. Звезды каталога ФОНАК с грубыми определениями координат не участвовали в сравнении. Для таких объектов в каталоге имеются специальные метки. В основном это тесные двойные или кратные звезды, которые обычно измерялись как один объект. Не принимались к рассмотрению также звезды CMC11, для которых не было определений собственных движений звезд, а также звезды, для которых ошибки этих определений были больше чем  $0.01''/\text{год}$ . При сравнении координаты всех каталогов приводились на среднюю эпоху ФОНАК.

Для изучения систематических и случайных составляющих разностей координат и собственных движений звезд в каталогах использовался метод представления их в виде ряда ортогональных функций, зависящих от экваториальных координат и блеска [13]. Разности  $\Delta_i$  положений или собственных движений в двух каталогах представлялись в виде

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^g Y_j(\alpha_i, \delta_i, m_i) b_j, \quad (7)$$

где  $\alpha_i, \delta_i, m_i$  — экваториальные координаты и блеск звезды;  $b_j$  — коэффициенты разложения, подлежащие определению;  $Y_j$  — ортогональные на множестве точек  $\alpha_i, \delta_i, m_i$  функции;  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $N$  — число общих звезд;  $g$  — максимальный порядок разложения.

Ортогональные функции  $Y_j$  представляют собой произведение полиномов Эрмита  $H_p(y(m))$ , полиномов Лежандра  $L_n(x(\delta))$  и членов ряда Фурье  $F_{kl}(\alpha)$ :

$$Y_j = R_{\text{pнк}} H_p(y(m)) L_n(x(\delta)) F_{kl}(\alpha). \quad (8)$$

Здесь  $R_{\text{pнк}}$  — нормирующий множитель;  $y(m) = (m - m_0)/s_m$ ,  $m_0$  — средняя звездная величина;  $s_m$  — дисперсия звездных величин;  $x(\delta) = d_0 + d_1 \sin \delta$ ,  $d_0, d_1$  — постоянные, зависящие от максимального и минимального значения склонения;  $p = 0, 1, 2, \dots$ ;  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $k = 0, 1, 2, \dots$ ;  $l = 1$  или  $l = -1$ . В зависимости от индексов  $l$  и  $k$  функции  $F_{kl}$  принимают различные значения:

$$F_{kl} = \begin{cases} 1 & l = 0, k = 0, \\ \cos(lk\alpha) & l = 1, -1, k = 1, 2, \dots, \\ \sin(lk\alpha) & l = 1, -1, k = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (9)$$

При сравнении мы ограничились членами первого порядка, зависящими от блеска и членами второго порядка — от координат. При этом максимальное количество членов разложения принималось равным 30. Значимые при 1 % уровне значимости коэффициенты разложения для разностей (ФОНАК—HIPPARCOS) представлены в табл. 4, из которой видно, что их немного и к тому же они очень малы. Это постоянные разности между координатами и собственными движениями звезд ( $j = 1$ ), уравнение блеска ( $j = 16, p = 1$ ) и члены, зависящие как от координат, так и блеска звезд ( $j > 16$ ). Средний квадрат систематических разностей координат для всех звезд сравнения соответствует по обеим координатам  $0.004''$ , а собственных движений —  $0.0001''/\text{год}$ . Учет этих систематических различий разностей практически не

Таблица 4. Значимые коэффициенты разложения разностей (ФОНАК—HIPPARCOS) и их ошибки

j	p n k l	$b_j$ для разностей			
		0.001"		0.001"/год	
		$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\mu_\alpha\cos\delta$	$\Delta\mu_\delta$
1	0 0 0 0	$-3.9\pm 0.9$	$-4.0\pm 1.0$		$0.01\pm 0.02$
3	0 0 1 1			$-0.07\pm 0.02$	
16	1 0 0 0	$-2.5\pm 0.9$		$-0.06\pm 0.02$	
17	1 0 1 -1			$0.10\pm 0.02$	
18	1 0 1 1			$0.06\pm 0.02$	$0.06\pm 0.02$
20	1 0 2 1				$-0.05\pm 0.02$
23	1 1 1 1		$-3.0\pm 1.0$		
30	1 2 2 1			$-0.06\pm 0.02$	

влияет на величины средних квадратичных разностей координат и собственных движений, которые составляют  $0.18''$  и  $0.19''$  для координат  $\alpha$  и  $\delta$  и  $0.0037''/\text{год}$  для собственных движений.

Остаточные средние квадратичные разности (ФОНАК — HIPPARCOS) были найдены также в единичных интервалах звездных величин для  $p = 0$ . На рис. 3 приведены средние по обеим координатам значения этих разностей в зависимости от звездной величины.

Аналогичные вычисления были проведены для разностей (ФОНАК — СМС11). Значимые члены разложения разностей положений и собственных движений звезд этих каталогов приведены в табл. 5. Различия между каталогами здесь проявляются намного сильнее. Часть из этих различий объясняются системой самого каталога СМС11, что можно видеть из сравнения 34637 звезд каталога СМС11 с каталогом HIPPARCOS (см. табл. 5). Остальные члены скорее всего относятся к систематическим ошибкам звезд, которые лежат за пределами звездных величин опорной системы ( $7-12^m$ ) (примерно 21000 звезд СМС11). Средние квадратичные разности координат и собственных движений (ФОНАК—СМС11) после учета значимых коэффициентов разложения составляют в среднем по обеим координатам  $0.24''$  для положений и  $0.0050''/\text{год}$  для собственных движений. Аналогичные оценки для разностей (HIPPARCOS—СМС11) равны  $0.1''$  и  $0.0037''/\text{год}$  соответственно. Если учесть в средних квадратичных разностях (ФОНАК—СМС11) ошибки самого каталога СМС11, то получим для оценки точности каталога ФОНАК те же значения, что и из сравнения с каталогом HIPPARCOS, а именно,  $0.2''$  и  $0.004''/\text{год}$  для положений и собственных движений соответственно.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение каталогов показывает, что каталог ФОНАК получен в системе каталога HIPPARCOS. Случайные ошибки каталога для звезд порядка  $10^m$  меньше  $0.2''$  для координат и  $0.004''/\text{год}$  для собственных движений. Для звезд ярче  $7.5^m$  и слабее  $11.5^m$  эти ошибки увеличиваются (см. рис. 3). В каталоге ФОНАК есть незначительное уравнение блеска в прямом восхождении и собственном движении по этой координате.

Первая версия каталога ФОНАК построена на основании измерений пластинок голошиевского перекрытия северного неба программы ФОН с частичным привлечением измерений пластинок, полученных в Китабе. В качестве опорного использован каталог АСТ [29]. В дальнейшем предпола-

Таблица 5. Значимые коэффициенты разложения разностей типа ФОНАК—СМС11 и HIPPARCOS—СМС11

j	p n k l	$b_j$ для разностей							
		ФОНАК—СМС11				HIPPARCOS—СМС11			
		$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\mu_{\alpha}\cos\delta$	$\Delta\mu_{\delta}$	$\Delta\alpha\cos\delta$	$\Delta\delta$	$\Delta\mu_{\alpha}\cos\delta$	$\Delta\mu_{\delta}$
		0.001"		0.001"/год		0.001"		0.001"/год	
1	0 0 0 0	-1.1	2.0	-0.16	0.30	-4.2	0.7	-0.76	0.04
2	0 0 1 -1		3.2	-0.32	-0.86			-0.31	-0.88
3	0 0 1 1	2.4	-4.6	-0.47	0.47			-0.42	0.56
4	0 0 2 -1			0.05	0.06				
5	0 0 2 1		0.9	0.18					
6	0 1 0 0	4.5	-6.6	-0.14	-0.13	2.0	-1.7	0.21	
7	0 1 1 -1			-0.03				-0.14	
8	0 1 1 1			-0.23				-0.27	
9	0 1 2 -1				-0.11				
10	0 1 2 1	-2.7	-1.3		0.06				
11	0 2 0 0			0.09					
12	0 2 1 -1				0.05				
13	0 2 1 1		1.9		0.05				
14	0 2 2 -1				0.06				
15	0 2 2 1				-0.13				
16	1 0 0 0		9.0	0.50	0.34	3.1	-4.4	0.17	0.06
17	1 0 1 -1			0.07	0.09				
18	1 0 1 1		-4.0		-0.08				
19	1 0 2 -1	4.2		0.08					
20	1 0 2 1			0.14				0.08	
21	1 1 0 0		-9.6	-0.39	-0.19			-0.17	
22	1 1 1 -1		3.1	0.08	-0.05				
23	1 1 1 1	2.4							
24	1 1 2 -1			0.07	-0.07				
25	1 1 2 1				0.08				
26	1 2 0 0		-3.3	0.13				-0.05	
27	1 2 1 -1			-0.08	0.09	1.3			
29	1 2 2 -1				0.07				
30	1 2 2 1				-0.15				

гается выполнение измерений пластинок, полученных в других обсерваториях-участницах программы ФОН, а также с привлечением каталога Tycho-2 [16] для выполнения редукиций измерений.

Измерения пластинок программы ФОН были выполнены частично при содействии Международного Научного Фонда (Грант N U4I000).

Авторы признательны сотрудникам Китабской широтной станции (Узбекистан) за предоставление пластинок программы ФОН в зоне склонений ( $-2^{\circ}$  до  $+2^{\circ}$ ), сотрудникам отдела астрометрии ГАИШ (Москва) за предоставленные электронные версии каталога AC-GSC, а также А. В. Сергееву и В. А. Лобортасу за техническое обслуживание измерений.

1. Ворошилов В. И., Пакуляк Л. К., Сергеева Т. П. Оценка фотометрических свойств АИК ПАРСЕК // Кинематика и физика небес. тел.—1992.—8, № 2.—С. 89—90, 95.
2. Иванов Г. А. Качество изображений звезд и определение размеров рабочего поля на пластинках широкоугольных астрографов // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 2.—С. 64—68.
3. Иванов Г. А., Рахматов Э., Юревич В. А. Сравнительное исследование оптических характеристик объективов астрографов н/п Карл Цейс, Йена // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 2.—С. 72—77.
4. Иванов Г. А., Сергеева Т. П., Яценко А. И. Выбор режима измерений пластинок программы ФОН на автоматической машине ПАРСЕК // Кинематика и физ. небес. тел.—1990.—6, № 1.—С. 79—83.
5. Иванов Г. О., Кислюк В. С., Пакуляк Л. К. та ін. Програма фотографічного огляду північного неба. Перші результати // Кинематика и физика небес. тел.—1994.—10, № 1.—С. 48—50.

6. Кислюк В. С., Яценко А. И., Иванов Г. А. и др. Сравнение измерений пластинок программ ФОН и GSC // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 2.—С. 67—72.
7. Колчинский И. Г., Онегина А. Б. План фотографирования неба на широкоугольных астрографах // Астрометрия и астрофизика.—1977.—Вып. 33.—С. 11—16.
8. Марченко С. В., Меркулова Г. Л., Сергеева Т. П. Каталог В-величин звезд главной последовательности спектральных классов В7-А3 в направлении антицентра Галактики. — Киев, 1993.—54 с.—(Рукопись деп. в ВИНТИ. 29.06.92 г.; № 2095-В92).
9. *О четырехмиллионном каталоге звезд* / Под ред. А. П. Гуляева, И. И. Нестерова. — М.: Изд-во. Моск. ун-та, 1992.—72 с.
10. Яценко А. И. Определение координат и собственных движений звезд по пластинкам программы ФОН // Кинематика и физика небес. тел.—1991.—7, № 4.—С. 56—60.
11. Яценко А. И. Редукция измерений пластинок программы ФОН по данным каталога АСТ (USNO) // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 1.—С. 67—71.
12. Яценко А. И. Сравнение положений и собственных движений звезд каталога FONAC с данными каталогов HIPPARCOS и CMC11 // Кинематика и физика небес. тел.—2000.—16, № 3.— С. 261—265.
13. Bien R., Fricke W., Lederle T. Methods for the comparison of star positions to be applied in the construction of the FK5 // Veroff. Astron. Rechen Inst.— 1978.—N 29.—P. 23—28.
14. Carlsberg Meridian Catalogue La Palma. N 1—11. Observations of positions of stars and planets: May 1984 to May 1998 (CMC1—11). — Copenhagen University Observatory, Royal Greenwich Observatory and Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando, 1999.—CD-ROM distribution.
15. Fresneau A. Survey of the Astrographic Catalogue from 1 to 31 degrees of the Northern declination // Astron. J.—1983.—88, N 9.—P. 31—33.
16. Hog E., Fabricius C., Makarov V. V., et al. The Tycho-2 Catalogue: Positions, proper motions and two-colour photometry of the 2.5 million brightest stars. — Copenhagen, 2000.—CD-ROM distribution.
17. Kislyuk V., Yatsenko A., Ivanov G., et al. The FON Astrographic Catalogue (FONAC): Version 1.0 // JOURNEES 1999 & IX Lohrman-Kolloquium: Motion of Celestial Bodies, Astrometry and Astronomical Reference Frames / Eds M. Soffel, N. Capitaine (Dresden Germany, 13—15 September 1999). — Dresden, 1999.—P. 61.
18. Kislyuk V., Yatsenko A., Yatskiv Y. Project FON in Post-HIPPARCOS Era // JOURNEES 1997: Systemes de reference spatio-temporels / Eds J. Vondrak, N. Capitaine (Prague, 22—24 September 1997). — Prague, 1997.—P. 235.
19. Kuzmin A., Nesterov V., Gulyaev A., et al. Completion of the Sternberg Astronomical Institute Astrographic Catalogue project // New Horizons from Multi-Wavelength Sky Surveys: IAU Symp. 179 (26—31 August 1996, Baltimore, USA) / Eds B. McLean, D. Golombek, J. Hayes, H. Payne. — Dordrecht: Kluwer, 1998.—P. 409.
20. Lasker B. M., Sturch C. R., McLean B. J., et al. The Guide Star Catalog // Astron. J.—1990.—99, № 6.—P. 2019—2058.
21. Lindegren L., Roesser S., Schrijver H., et al. A comparison of ground-based stellar positions and proper motions with provisional HIPPARCOS catalogue // Astron. and Astrophys.—1995.—304, N 1.—P. 44—51.
22. Monet D., Bird A., Canzian B., et al. USNO-A 2.0 Version. A Catalog of Astrometric Standards. — US Naval Observatory, 1998.—CD-ROM distribution.
23. Nesterov V. V., Kislyuk V. S., Potter H. I. Astrometric Catalogue of Four Million Stars // Inertial Coordinate System on the Sky: Proc. IAU Symp. 141. — Dordrecht: Kluwer, 1995.—P.482.
24. Roesser S., Bastian U. PPM. Positions and proper motions of 181731 stars north of  $-2.5$  degrees declination, for equinox and epoch J2000. — Heidelberg: Astron. Rechen-Inst., 1989.—27 p.
25. Sergeev A. V., Sergeeva T. P. PARSEC — many purposes measuring tool for photographic astronomy // New trends in Astronomy and Astrophysics: Abstr. JENAM 97 (2—5 July, 1997). — Thessaloniki, Greece, 1997.—P. 242.
26. Sergeev A. V., Sergeeva T. P., Riabokon A. V. Introduction into experimental operation of four automatic measuring machines PARSEC // Astrophys. and Space Sci.—1991.—177.—P. 329.
27. *The HIPPARCOS and Tycho Catalogues.* — Noordwijk: ESA Publ., 1997.—Vol. 1—17.
28. Urban S. E. Astrographic Catalogue as Reduced to ACRS. Data from the Vatican, Uccle, Oxford 1, Oxford 2, Paris, Bordeaux, Toulouse, Algiers, San Fernando and Cape zones. CD-ROM Version 1.3, United States Naval Observatory, May 1996.
29. Urban S. E., Corbin T. E., Wycoff G. L. The ACT Reference Catalog // Astron. J.—1998.—115, N 5.—P. 2161—2166.
30. Urban S. E., Corbin T. E., Wycoff G. L., et al. The AC2000: The Astrographic Catalogue on the system defined by the HIPPARCOS Catalogue // Astron. J.—1998.—115, N 3.—P. 1212—1223.

Поступила в редакцию 26.10.00