

УДК 524.7-323.2

**П. Н. Федоров, А. А. Мызников**

Научно-исследовательский институт астрономии  
Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина  
61022 Харьков, ул. Сумская 35

**Харьковский каталог ХС1 положений  
и собственных движений слабых звезд  
в окрестностях внегалактических источников ICRF**

*В Научно-исследовательском институте астрономии Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина создан дифференциальный каталог положений и собственных движений звезд ХС1 в системе ICRS/«Tycho-2». Каталог содержит экваториальные координаты и собственные движения около 1 млн звезд от 10 до 20<sup>m</sup> в градусных площадках вокруг 256 источников ICRF северного неба. Материалом для создания каталога послужили оцифрованные изображения шмидтовских пластинок Паломарских обзоров POSS-1 и POSS-2. При выводе положений и собственных движений звезд использовалось от 5 до 10 индивидуальных положений на разные эпохи в спектральных полосах O, E, J, F и N. Дополнительно, если это было возможно, привлекались положения звезд 2MASS в эпоху их наблюдений. Уравнение блеска было исключено. Уравнение цвета не исключалось.*

*ХАРКІВСЬКИЙ КАТАЛОГ ХС1 ПОЛОЖЕНЬ ТА ВЛАСНИХ РУХІВ СЛАБКИХ ЗІРОК НАВКОЛО ПОЗАГАЛАКТИЧНИХ ДЖЕРЕЛ ICRF, Федоров П. М., Мизніков А. О. — У Науково-дослідному інституті астрономії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна створено диференціальний каталог положень та власних рухів зір ХС1 у системі ICRS/«Tycho-2». Каталог містить екваторіальні координати та власні рухи близько 1 млн зір від 10 до 20<sup>m</sup> у градусних площадках навколо 256 джерел ICRF північного неба. Матеріалом для створення каталогу слугували оцифровані зображення шмідтівських пластинок Паломарських оглядів POSS-1 і POSS-2. При виведенні положень та власних рухів зір використовувалось від 5 до 10 індивідуальних положень на різні епохи у смугах O, E, J, F та N. Додатково, якщо це було можливо, залучались положення зір 2MASS на епоху їх спостережень. Рівняння блиску було виключено. Рівняння кольору не виключалось.*

*THE KHARKOV'S XC1 CATALOGUE OF POSITIONS AND PROPER MOTIONS OF FAINT STARS AROUND EXTRAGALACTIC ICRF SOURCES, by Fedorov P. N., Myznikov A. A. — We present an astrometric*

*catalogue of faint reference stars around ICRF sources of northern hemisphere. The XCI catalogue is compiled at the astrometry department of the Institute of Astronomy of the V. N. Karazin Kharkiv National University. The catalogue contains positions and proper motions of about 1 million stars in 10...20<sup>m</sup> magnitude range within 256 selected areas of northern sky in the ICRS/Tycho2 system. The XCI catalogue is based on our results of measurements and astrometric reduction of digitized images of Schmidt plates from the POSS-I and POSS-II sky surveys, obtained from USNOFS PMM Image Archive. For each selected field, 5–10 individual positions from O, E, J, F and N plates were used to derive the mean positions and proper motions. Additionally, the 2MASS star positions at observation epoch were used, if this was possible. Magnitude-depended systematic errors are removed and color-depended systematic errors are not taken into account.*

## ВВЕДЕНИЕ

Эта работа была начата в 2002 г. в соответствии с решением международной конференции «Extension and Connection of Reference Frames Using Ground Based CCD Technique» (Николаев, 2001 г.). Целью работы было создание высокоточного опорного каталога слабых звезд с точностью положений не хуже 50 мсд (миллисекунды дуги) в площадках с источниками ICRF размером от  $4 \times 4'$  до  $30 \times 30'$ , включающих не менее шести опорных звезд 12–17<sup>m</sup>. Впоследствии без объяснения причин НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина был исключен из состава исполнителей совместного проекта. Тем не менее, работа по созданию каталога продолжалась, и в настоящее время завершена.

Большинство исследователей, занимающихся уточнением связи между системами ICRF и HIPPARCOS, сходятся на том, что эта проблема окончательно не разрешена. В настоящее время очевидно, что оценка инерциальности системы отсчета, задаваемой каталогом HIPPARCOS, впервые сделанная в работе Ковалевского и др. [6], является лишь первоначальной. Так, например, в работах В. В. Бобылева [1, 2] на основе кинематического и астрометрического анализа собственных движений звезд каталога HIPPARCOS обнаружено довольно заметное вращение системы ICRS вокруг галактической оси  $Y$ . Кроме того, показано, что экваториальная составляющая  $\omega_z = -0.35 \pm 0.09$  мсд/год вектора остаточного вращения системы ICRS относительно инерциальной системы координат, задаваемой галактиками, существенно отличается от нуля. Создание в оптическом диапазоне высокоточного астрометрического каталога, свободного от уравнения блеска и содержащего положения и собственные движения слабых звезд вокруг ICRF-источников, позволит получить независимые оценки параметров связи между системами HIPPARCOS/«Tycho-2» и ICRF.

## ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

**Наблюдательный материал.** Наблюдательным материалом для создания каталога послужили фотопластинки Паломарских обзоров POSS-I [3], и POSS-II [5, 9], отснятые с помощью 48-дюймового Шмидтовского телескопа Паломарской обсерватории. Наблюдения POSS-I были сделаны в 1949–1958 гг., а POSS-II — в 1980–1990 гг. Фотопластинки имеют размер  $23 \times 31$  см, что соответствует  $5.5 \times 6.5^\circ$ . Обзоры POSS-I и POSS-II выполнены в нескольких спектральных полосах, покрывают северное полушарие неба и имеют почти полувектовую разницу в эпохах.

**Исходные данные сканирования.** Благодаря любезности сотрудников USNO Flagstaff Station, в особенности доктора Stephen Levine, в нашем распоряжении оказались ПЗС изображения градусных площадок северного неба вокруг источников ICRF, содержащихся на фотопластинках обзоров. Изображения фотопластинок POSS-I (фильтры *O*, *E*) и POSS-II (фильтры *N*, *F* и *J*) были получены и оцифрованы с помощью двух ПЗС-камер, входящих в состав высокоточной измерительной машины РММ Флагстаффской станции. Полезная площадь ПЗС-камер РММ составляет  $1312 \times 1033$  пкл. Пиксели имеют форму квадрата со стороной 6.8 мкм, не имеют мертвого пространства между собой (100 % коэффициент заполнения) и не имеют плохих пикселей (класс 0). Для проектирования на ПЗС-матрицу участка пластинки размером  $18 \times 14$  мм с масштабом 13.7 мкм/пкл ( $\sim 0.9$  сд/пкл) использовалась специальная линза.

Схематично процесс получения ПЗС-изображений выглядел так: Каретка с ПЗС-камерами пошагово перемещалась над поверхностью фотопластинки. При этом делались последовательные снимки участков фотопластинки — индивидуальные сканы. Изображения на полученных таким способом индивидуальных РММ сканах равномерно квантованы на 256 градаций яркости и записаны в файлы в формате FITS. Каждый такой файл содержит изображение участка фотопластинки размером  $18 \times 14$  мм, а также дополнительную информацию с датчиков РММ-машины. Каждое изображение покрывает область неба размером  $19 \times 15'$  и содержит от сотен до нескольких тысяч изображений звезд.

Для каждой фотопластинки имеется информация об эпохе, фильтре, координатах центра пластинки, а также набор индивидуальных исходных сканов, покрывающих градусную площадку с радиоисточником ICRF.

#### ПОДГОТОВКА К РЕДУКЦИИ

**Анализ сканов и их измерения.** Предварительная обработка исходных сканов является стандартной операцией и включает в себя учет плоского поля, фильтрацию резких выбросов уровня сигнала, оценку уровня фона и его дисперсии. Значения уровня фона и дисперсии использовались в последующих процедурах обработки и измерения изображений.

Обнаружение, анализ и измерение изображений различных объектов на индивидуальных РММ-сканах выполнялось с помощью программного обеспечения, разработанного в отделе астрометрии специально для этой цели. В результате для каждого обнаруженного на снимке изображения звезды были получены данные о координатах  $x$ ,  $y$  объекта в системе координат скана, его интегральной яркости, а также моменты высших порядков для двумерного распределения освещенности по изображению звезды (большая и малая полуоси эллипсоида, эксцесс, асимметрия и т. п.). Изображения, не подлежащие измерению (различные артефакты на фотоэмульсии, перекрывающиеся изображения звезд, изображения галактик с видимой структурой и т. п.) были исключены из дальнейшей обработки. Результаты обработки каждого исходного РММ-скана записывались в файл, содержащий список всех звездобразных объектов, зарегистрированных на изображении.

Из-за нелинейности отклика фотоэмульсии форма и качество изображений звезд на пластинках POSS оказались зависящими от звездной величины и расстояния от центра пластинки. Слабые звезды имеют относительно симметричные колоколообразные профили. Изображения ярких звезд перенасыщены, имеют широкие плато в центре и всякого рода блики вокруг него. Кроме того, часто они существенно асимметричны, особенно вдали от центра пластинки и явно искажены дифракционными эффектами

от конструктивных деталей телескопа. Поэтому фактически только звезды слабее  $9.5^m$  были более или менее успешно измерены и взяты в дальнейшую обработку.

Для описания профилей изображений измеряемых звезд была использована двумерная радиально-симметричная экспоненциальная модель:

$$I(x, y) = A \exp(-|r|^4 \sigma_r),$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}.$$

Из большого числа испробованных нами алгоритмов был выбран именно этот, поскольку он давал наиболее устойчивые результаты даже при работе в очень сложных условиях на перенасыщенных и сильно искаженных изображениях.

Точность измерений координат оказалась зависящей от звездной величины, типа пластинки, степени грануляции эмульсии, расстояния от центра пластинки, а также от качества конкретного изображения. Ошибка измерений координат звезд составила от 0.8 мкм для хороших, относительно слабых звезд и до нескольких микрометров для ярких и очень слабых звезд. Таким образом, хотя положения и собственные движения ярких звезд «Tuccho-2» [4] и точны, использовать в качестве опорных удалось только их подмножество (с менее точными параметрами) в диапазоне от  $9.5^m$  до  $12^m$ .

Приведение измеренных на индивидуальных сканах координат в единую координатную систему. Индивидуальные РММ сканы являются относительно небольшими в масштабе небесной сферы ( $15 \times 19'$ ), и опорных звезд «Tuccho-2» на них не достаточно, чтобы выполнить высокоточную астрометрическую редукцию. Чтобы иметь достаточное количество опорных звезд для проведения редукции в области фотопластинки, покрываемой набором сканов, необходимо записать измеренные координаты звездных изображений со всех сканов в единой системе координат.

Из-за особенностей работы сканирующего устройства РММ индивидуальные сканы сдвинуты, повернуты и наклонены друг к другу, а также имеют слегка разный масштаб. Кроме того, у каждого скана оказался свой уровень фона и шума, не постоянный по скану. Процесс приведения измеренных координат в единую систему оказался далеко не тривиальным и потребовал выполнения хотя бы примитивной фотометрии с использованием в качестве опорного каталога USNOB1 [8], а также данных других каталогов для проведения некоторых калибровок.

Измеренные на индивидуальных РММ-сканах координаты звезд (пиксельные координаты), были преобразованы в координаты на фотопластинке (единая система координат) и объединены в один общий список. При преобразовании координат использовалась информация со специальных датчиков измерительной машины. Концептуально данные с этих датчиков позволяют преобразовать координаты любой точки на скане в систему координат фотопластинки. Но, к сожалению, измерения РММ-датчиков были не во всех случаях точны, а иногда просто некорректны. Поэтому для преобразования пиксельных координат в систему фотопластинки был создан специальный алгоритм, использующий зоны перекрытия смежных сканов. Эти зоны перекрытия примерно 2 мм ширины обычно содержат несколько десятков изображений звезд, общих для пары перекрывающихся сканов. Используя эти данные, удалось до некоторой степени исправить некорректные показания датчиков измерительной машины. Если некоторый объект в областях перекрытия сканов был задетектирован несколько раз, то параметры такого объекта находились усреднением по всем его детекциям. Если при этом оказывалось, что вариации параметров (например, разница звездных

величин или разброс координат) для некоторых многократно задетектированных объектов были значительными, то такие объекты исключались из дальнейшей обработки.

В результате был сформирован общий список всех звездообразных объектов, зарегистрированных на данном участке фотопластинки размером  $1 \times 1^\circ$ , с информацией об измеренных координатах на пластинке, звездной величине, эпохе, фильтре, координатах центра пластинки и других характеристиках. Такой общий список, названный нами «мозаикой», покрывает область пластинки примерно  $5 \times 5$  см и содержит от 2000 до 20000 звезд.

После объединения сканов были выполнены некоторые дополнительные калибровки, необходимые для отождествления звезд опорных каталогов с объектами из списка детекций фотопластинки. Специальная подпрограмма автоматически методом перебора пыталась отождествить объекты из списка детекций со звездами каталога «Tycho-2». После отождествления выполнялась точная привязка фотопластинок к небесной сфере, вычисление масштаба и ориентации системы координат фотопластинки по отношению к небесной сфере. Полученный в результате набор числовых параметров позволил очень быстро выполнять преобразование измеренных координат в небесные и наоборот. Точность 1—3 сд оказалась вполне достаточной для задачи отождествления звезд.

## РЕДУКЦИЯ

Поскольку поле размером  $1 \times 1^\circ$  составляет относительно небольшую часть шмидтовской пластинки, то, по-видимому, оно должно быть близким к плоскому [11, 12]. Тем не менее, использование традиционных подходов к выполнению редукции не привели к положительным результатам. Например, оказалось, что применение линейной модели с предварительным исключением кубической дисторсии телескопа Шмидта на уровне точности в  $0.1''$  недостаточно. Остаточные отклонения были велики и зависели от положения градусной площадки на пластинке. Применение более сложных нелинейных моделей редукции также не привели к стабильным результатам из-за малого числа опорных звезд «Tycho-2» на площадке и не очень высокой точности их каталожных и измеренных координат.

Окончательно было принято решение о применении двухступенчатой модели редукции. На первом этапе в первую очередь определяются все параметры преобразования координат от фотопластинки к небесной сфере. Для этого мы использовали в качестве опорных высокоплотные и высокоточные каталоги положений звезд UCAC2 [13] и 2MASS [14]. Использование каталога 2MASS было оправданно некоторыми разумными предположениями о характере движений звезд. Прежде всего предполагалось, что совокупность опорных звезд смещается по небесной сфере как целое, не расширяясь (сжимаясь) и не вращаясь. На этом этапе были получены параметры преобразования для линейной модели и модели с 12 постоянными. Выбор конкретной модели производился на основе анализа величины ошибки единицы веса. В процессе редукции кубическая дисторсия телескопа Шмидта была также исключена.

На втором этапе в качестве опорного каталога использовался только каталог «Tycho-2». Для каждой площадки были отождествлены звезды из «Tycho-2» и вычислены их видимые места на эпоху наблюдения. В обработку были взяты только звезды с  $B_T > 9.5^m$ . Наиболее часто встречающееся число опорных звезд составляло 25—30. Если число опорных звезд на конкретной площадке в данном фильтре было меньше чем 15, то пластинка исключалась из обработки. Окончательно на этом этапе были получены

только постоянные пластинки  $a_0$  и  $\vartheta_0$ , характеризующие сдвиг между идеальной и измеренной системами координат. Для этого использовались значения всех остальных параметров, полученные на первом этапе.

#### УРАВНЕНИЕ БЛЕСКА

Решение задачи исключения уравнения блеска является достаточно сложным по ряду причин, в основном из-за невозможности распространить его из области ярких звезд «Tycho-2» на слабые звезды.

Исследование остаточных невязок редукции показало, что уравнение блеска на фотопластинках POSS нелинейно зависит от звездной величины и расстояния до центра фотопластинки. Для выявления этой зависимости невязки опорных звезд  $\Delta\alpha_i$ ,  $\Delta\delta_i$ , их звездные величины  $m_i$  и координаты на фотопластинке  $x_i$ ,  $y_i$  были сведены в одну большую таблицу, по которой затем строилось распределение этих невязок по пластинке для звезд разных звездных величин. Для всех типов фотопластинок было выявлено радиальное смещение координат звезд разных звездных величин в зависимости от расстояния до центра фотопластинки. Пример такого смещения приведен на рис. 1.

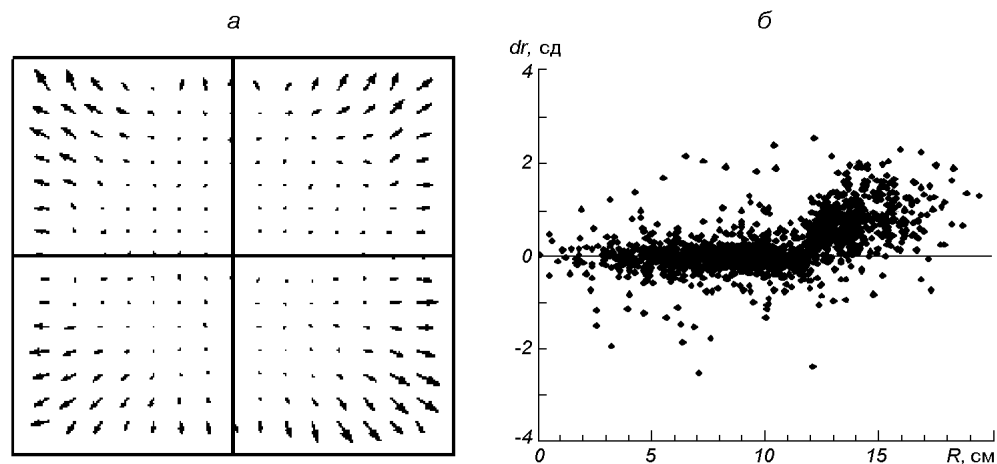


Рис. 1. Остаточные невязки после редукции пластинок POSS-1 с каталогом «Tycho-2»: а — распределение невязок опорных звезд, б — радиальные смещения звезд «Tycho-2» в диапазоне 7.5...8.5<sup>m</sup> в зависимости от расстояния до центра пластинки

Для описания радиального смещения  $dr_i(r_i, m) = (M\Delta\alpha_i\cos(\delta_i)x_i + M\Delta\delta_i y_i)/r_i$ , где  $r_i^2 = (x_i^2 + y_i^2)$ ,  $M$  — масштаб, было предложено зависимость  $dr(r, m)$  рассматривать в виде произведения двух функций:

$$dr(r, m) = R(r)K(m),$$

где  $R(r)$  описывает форму радиального смещения и зависит только от расстояния до центра пластинки, а  $K(m)$  зависит только от звездной величины. Функция  $K(m)$  представляет собой коэффициент, на который нужно умножить функцию  $R(r)$  для получения значений смещения звезд заданной звездной величины относительно системы опорных звезд. При таком рассмотрении  $K(m)$  должна принимать нулевое значение приблизительно на 11<sup>m</sup>, что соответствует средней звездной величине опорных звезд, и иметь разный знак для звезд ярче и слабее этой величины.

К сожалению, количество опорных звезд «Tycho-2» оказалось недостаточным для получения точной зависимости  $R(r)$ . Изображения ярких ( $< 9.5^m$ ) звезд «Tycho-2», как правило, перенасыщены, и поэтому их не удастся точно измерить. В слабой же части «Tycho-2» их звездные величины ограничены величиной примерно  $12.5^m$ , и в этой области их каталожная точность быстро уменьшается. Поэтому для получения формы радиального смещения во всем диапазоне звездных величин был использован каталог 2MASS, который обеспечивает большую плотность звезд вплоть до  $18...19^m$ . Но каталог 2MASS не имеет собственных движений, поэтому такой подход требует пояснений. Подобный вопрос обсуждался в работе [10]. Как известно, полное собственное движение звезды можно разложить на три компонента: пекулярный, параллактический, вызванный движением Солнца, и компонент, вызванный вращением Галактики. При использовании большого количества звезд среднее значение пекулярных движений будет нулевым, но другие два компонента, вообще говоря, не равны нулю. Выполнив редукцию пластинок POSS в системе каталога 2MASS, мы получим, конечно же, неправильные координаты звезд на эпоху наблюдения этих пластинок, поскольку в невязках координат будут составляющие, обусловленные остаточным собственным движением звезд и уравнением блеска. Однако вполне разумно предположить, что собственное движение звезды никак не связано с расстоянием от ее изображения до центра фотопластинки, т. е. не зависит от  $r$ . Поэтому при усреднении по всему полушарию в невязках должны остаться только две составляющие — среднее смещение звезд, не зависящее от их положения на фотопластинке, но зависящее от звездной величины, и радиальное смещение, величина которого зависит от расстояния до центра пластинки и от звездной величины. При использовании достаточно большого количества опорных звезд, более или менее равномерно распределенных по пластинке, эти компоненты успешно разделяются.

В качестве опорных звезд были взяты самые слабые звезды 2MASS, от  $16$  до  $18.5^m$ . После редукции всех пластинок POSS в систему каталога 2MASS было произведено отождествление определяемых звезд со звездами 2MASS и для всех общих звезд от  $7$  до  $20^m$  получены разности  $\Delta\alpha_1 \cos(\delta_1)$ ,  $\Delta\delta_1$ , переведенные затем с использованием вычисленного масштаба в разности координат  $\Delta x_1$ ,  $\Delta y_1$  на фотопластинке. Распределение этих разностей по фотопластинке строилось в узких поддиапазонах звездных величин шириной  $0.5^m$ . Как и ожидалось, в каждом таком поддиапазоне распределение

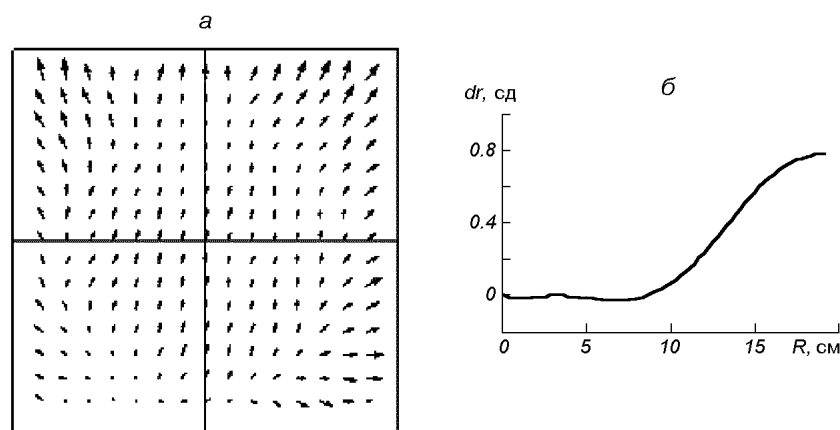


Рис. 2. Остаточные невязки после редукции пластинок POSS-1 с каталогом 2MASS: *а* — распределение невязок, *б* — радиальные смещения звезд  $10^m$  относительно слабых звезд  $16...18.5^m$  для пластинок типа F

разностей оказалось комбинацией двух величин — постоянного сдвига, вызванного преимущественно средним движением всех звезд в северном полушарии, и радиального смещения. Пример такого распределения приведен на рис. 2. После вычитания среднего значения картина распределения разностей практически не отличается от полученной по «Tycho-2» (рис. 1), но теперь она обеспечена несравненно большим количеством звезд, и главное — во всем диапазоне звездных величин от  $7$  до  $20^m$ .

В качестве «номинального радиального смещения»  $R(r)$ , при котором  $K(m) = 1$ , были использованы разности  $\Delta\alpha_i \cos(\delta_i)$ ,  $\Delta\delta_i$ , в диапазоне  $9 \dots 10.5^m$ . Радиальные смещения этих звезд относительно опорной системы, заданной звездами  $16 \dots 18.5^m$ , аппроксимировались полиномом восьмой степени расстояния от центра пластинки. Затем для всех других поддиапазонов звездных величин вычислялось отношение  $K(m_k) = dr(r, m_k)/R(r)$ , где  $m_k$  — среднее значение звездной величины в  $k$ -м поддиапазоне. Полученная зависимость  $K(m)$  затем аппроксимировалась экспоненциальной функцией звездной величины (рис. 3).

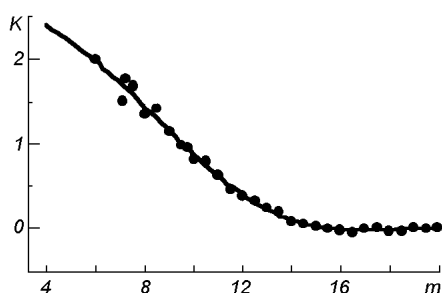


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $K$  радиального смещения звезд от звездной величины  $m$ , полученная с использованием звезд каталога 2MASS

Полученные зависимости использовались для введения поправок в измеренные координаты звезд.

После исключения радиального смещения снова выполнялась редукция всех пластинок в систему «Tycho-2», и был выполнен повторный анализ невязок редукции. К сожалению, звезд «Tycho-2» недостаточно для полноценного изучения уравнения блеска на каждой индивидуальной пластинке, даже в диапазоне  $7 \dots 12^m$ , не говоря уже о более слабых звездах. Поэтому мы попытались получить только некоторое «среднее» уравнение блеска, присущее всем пластинкам конкретного типа. Для этой цели после редукции всех пластинок, наблюдаемых в одинаковом фильтре, опорные звезды были упорядочены по звездным величинам, а весь диапазон  $7 \dots 12^m$  был разбит на узкие поддиапазоны размером  $0.25^m$ . В каждом поддиапазоне вычислялось среднее значение невязок опорных звезд и строилась их зависимость от звездной величины. Выяснилось, что пластинки POSS-1 (O- и E-типов) проявляют достаточно слабое уравнение блеска в диапазоне звездных величин «Tycho-2», а вот пластинки POSS-2 (J-, F- и N-типов) показывают ярко выраженную зависимость невязок по прямому восхождению от звездной величины. Экстраполяция уравнения блеска, полученного по звездам «Tycho-2», в слабую область невозможна, в основном по причине нелинейности уравнения блеска в широком диапазоне звездных величин. Поэтому мы привлекли дополнительные данные, чтобы получить хотя бы приблизительное уравнение блеска в области слабых звезд.

Среди слабых звезд на фотопластинках был произведен поиск объектов внегалактической природы и выполнена их кросс-идентификация с объектами из Lion Extragalactic Database (LEDA), DR3 Quasar Catalog и списком ICRF. Всего на пластинках POSS в каждом фильтре было идентифицирова-



но несколько тысяч галактик из LEDA, примерно 600 квазаров из DR3, а также приблизительно 250 радиоисточников ICRF. LEDA содержит очень приблизительные координаты галактик, отнесенные к разным системам и эпохам. Поэтому мы воспользовались координатами этих галактик из каталога 2MASS, произведя соответствующую кросс-идентификацию. Дополнительно для изучения пластинок POSS-2, полученных в эпохи, близкие к J 2000 г., были привлечены положения из каталога 2MASS, которые благодаря небольшой разнице в эпохах можно использовать непосредственно, без дополнительных редуций. Для получения уравнения блеска в яркой части (до 13<sup>m</sup>) дополнительно к «Tycho-2» был привлечен каталог UCAC2, система собственных движений которого почти повторяет систему «Tycho-2» в этом диапазоне звездных величин, но он является более полным для склонений менее 50°.

Зависимости  $d\alpha(m)$  и  $d\delta(m)$ , полученные сравнением координат общих звезд XC1 с координатами объектов из перечисленных источников, затем аппроксимировались подходящими функциями, и на их основе вычислялись поправки к измеренным координатам звезд для каждого конкретного типа пластинок.

В качестве примера на рис. 4 представлено «усредненное» уравнение блеска на пластинках типа N обзора POSS-2. На каждой из этих диаграмм приведено два набора разностей — разности с 2MASS (от 7 до 18<sup>m</sup>, точки) и разности с DR3 (16...19<sup>m</sup>, кружки). Для DR3 приведены индивидуальные разности положений XC1-DR3, а для 2MASS произведено усреднение разностей в узких поддиапазонах звездных величин размером 0.1<sup>m</sup>.

Полученное таким способом уравнение блеска является только некоторым средним уравнением блеска как в слабой, так и в яркой частях каталога XC1, поскольку оно получено с использованием звезд и внегалактических источников, распределенных по всему небу, а не для каждой конкретной площадки.

Следует отметить, что каталог XC1 может содержать систематические ошибки, связанные с цветом звезд. Эти ошибки в основном вызваны, по-видимому, атмосферной дисперсией, которая в данной версии каталога никак не учитывалась. Анализ показал, что при некоторых сочетаниях эмульсия/фильтр влияние атмосферной дисперсии пренебрежимо мало (пластинки E, F и N). Однако для пластинок O (без фильтра) и J (голубой фильтр) мы наблюдали зависимость невязок редуции от цвета звезд при больших зенитных расстояниях, а также характерное распределение разно-

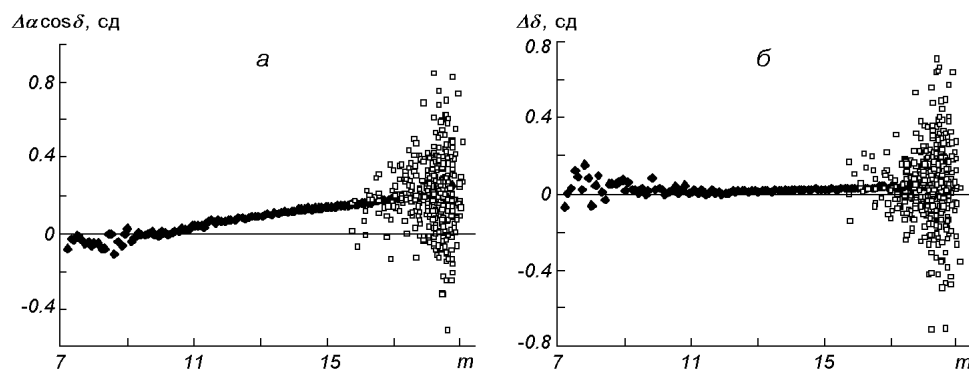


Рис. 4. Уравнение блеска на пластинках типа N обзора POSS-2 в прямом восхождении (а) и склонении (б)

стей радио и оптических положений квазаров ICRF в зависимости от зенитного расстояния. Поскольку для вывода собственных движений использовались положения звезд со всех пяти типов пластинок, то систематические ошибки положений на пластинках *O* и *J* могли дать свой вклад в ошибки собственных движений.

### СРЕДНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ

Средние положения и собственные движения звезд были получены по их индивидуальным положениям в различные эпохи. Для каждой площадки были использованы имеющиеся в нашем распоряжении данные с 5—10 пластинок, наблюдаемых в разные эпохи. Для этого использовались только успешно измеренные звезды градусной площадки, содержащиеся на всех пластинках. Если некоторые звезды не были успешно измерены на всех пластинках, то они были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Для вывода средних положений и собственных движений звезд из их индивидуальных положений в эпоху наблюдений была применена линейная регрессия

$$x(t_1) = x_0 + \mu_x(t_1 - t_0),$$

где  $x_0$  — среднее прямое восхождение или склонение звезды для средней эпохи наблюдения данной площадки  $t_0$ , а  $\mu_x$  — искомое собственное движение звезды. Взвешивание в данном случае не применялось. Для каждой звезды ошибки положений и собственных движений были вычислены из рассеяния невязок регрессии:

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum(x_i - x_{ci})^2}{(n - 2)n},$$

$$\sigma_{\mu_x}^2 = \frac{\sum(x_i - x_{ci})^2}{(n - 2)\sum(t_i - t_0)^2},$$

где  $n$  — число наблюдений звезды,  $x_i$  — ее индивидуальное положение в эпоху  $t_i$ , а  $x_{ci}$  — вычисленное положение в эпоху  $t_i$ . Если звезда наблюдалась шесть или более раз, то использовались статистические критерии для обнаружения и исключения выбросов в наблюдательных данных. На рис. 5, *a* приведены значения ошибок в среднюю эпоху для положений и собственных движений в зависимости от звездной величины.

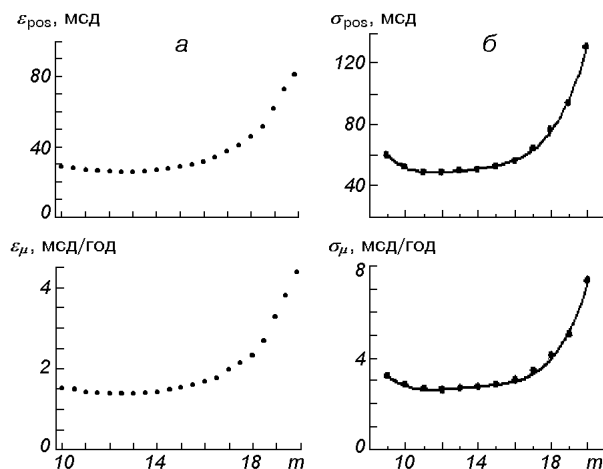


Рис. 5. Средние ошибки в среднюю эпоху для положений и собственных движений звезд каталога ХС1: *a* — I способ, *б* — II способ

Как известно, получение оценок из рассеяния невязок регрессии может давать ошибочные значения, когда число наблюдений небольшое. Поэтому для получения более реалистичных оценок внутренних ошибок каталога были применены и другие способы.

Для каждой площадки были вычислены оценки индивидуальных ошибок положений звезд  $\sigma_{xi}^2$ . Эти оценки получены на основе данных о точности звезд «Тучо-2» в индивидуальную эпоху и точности измерений координат этих звезд в зависимости от звездной величины. Затем, используя это вычисленное значение, для каждой звезды была получена средняя ошибка

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n^2} \sum \sigma_{xi}^2, \quad \sigma_{\mu x}^2 = \frac{\sum \sigma_{xi}^2}{n \sum (t_i - t_0)^2}.$$

После обработки всего набора данных все формальные ошибки для диапазона от 9 до 19<sup>m</sup> были собраны в поддиапазоны размером в 1<sup>m</sup> для вычисления среднего значения в каждом поддиапазоне (рис. 5, б).

Среднее значение ошибки составило примерно от 50 до 100 мсд для положений и от 2.5 до 5 мсд/год для собственных движений в зависимости от звездной величины. Среднее значение средней эпохи приходится на 1978. Поскольку на каждую площадку приходилось разное число пластинок, а также вследствие того, что центр каждой площадки попадал на различные части различных фотопластинок, мы полагаем, что реальная точность положений и собственных движений может изменяться от площадки к площадке.

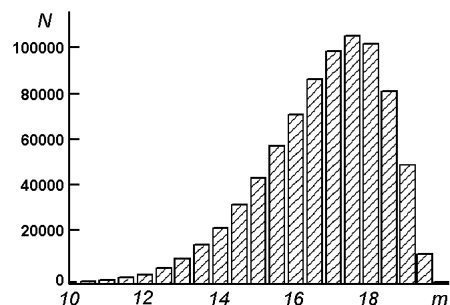


Рис. 6. Распределение числа звезд по звездным величинам  $m$

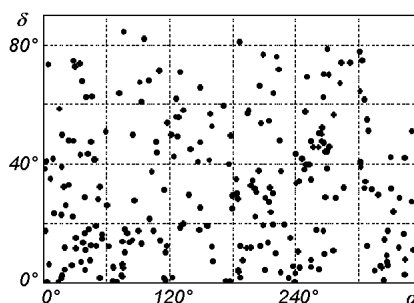


Рис. 7. Распределение площадок по небу

## КАТАЛОГ

Данная версия каталога ХС1 содержит данные для 856421 звезд в 256 площадках северного полушария размером  $1 \times 1^\circ$  с источниками ICRF в центре. Средняя плотность составляет примерно 4000 звезд на квадратный градус. На рис. 6 представлено распределение числа звезд по звездным величинам, а на рис. 7 — распределение площадок по небу.

В каталоге приведены точные экваториальные координаты на эпоху J2000, звездные величины в соответствующих полосах, собственные движения звезд, формальные внутренние ошибки положений в среднюю эпоху и собственных движений каждой звезды, средняя эпоха наблюдений, количество наблюдений, использованных для вывода положений и собственных движений и максимальная разность эпох. В настоящее время каталог ХС1 доступен по адресу <http://cdsweb.u-strasbg.fr/cgi-bin/qcat?I/302>.

## ВЫВОДЫ

ХС1 — это каталог, при создании которого ставилась задача распространить систему HIPPARCOS/«Tycho-2» на слабые звезды градусных площадок, содержащих источники ICRF с максимальной точностью, достижимой на имеющемся в нашем распоряжении материале. Решение этой задачи не является тривиальным по ряду причин. Например, из-за существенных нелинейных искажений на фотопластинках или из-за незнания поведения уравнения блеска в области слабых звезд. Тем не менее, мы надеемся, что выведенная в данной версии каталога ХС1 система собственных движений сравнительно ярких звезд примерно 11...14<sup>m</sup> достаточно хорошо воспроизводит систему координат, задаваемую каталогом «Tycho-2». В слабой же части каталога ХС1 уравнение блеска за неимением других возможностей исключалось с использованием внегалактических объектов (квазаров и слабых галактик). Поэтому система собственных движений ХС1 в слабой части привязана к удаленным галактикам, а в яркой — к системе «Tycho-2».

Мы отдаем себе отчет в том, что для некоторых площадок имеются систематические ошибки, вызванные не до конца исправленными уравнениями блеска и цвета, а также некоторые характерные ошибки положений, связанные с конструкцией РММ-машины, использованной для оцифровки пластинок POSS. Тем не менее мы надеемся, что наши внутренние оценки точности более или менее близки к истинным.

Звезды из каталога ХС1 могут использоваться как опорные при редукции позиционных ПЗС-наблюдений внегалактических радиоисточников, малых тел Солнечной системы и могут использоваться как входные данные для будущих космических миссий. Собственные движения каталога ХС1 дают материал для звездно-астрономических исследований.

1. Бобылев В. В. Астрометрический контроль инерциальности каталога Hipparcos // Письма в астрон. журн.—2004.—30, № 4.—С. 289—296.
2. Бобылев В. В. Кинематический контроль инерциальности каталогов системы ICRS // Письма в астрон. журн.—2004.—30, № 12.—С. 930—935.
3. Harrington R. The 48-inch Schmidt-type telescope at Palomar Observatory // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1952.—64, N 381.—P. 275—281.
4. Hog E., Fabricius C., Makarov V., et al. The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. and Astrophys.*—2000.—355.—P. L27—L30.
5. Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M., et al. The Hipparcos Catalogue as realization of the extragalactic reference system // *Astron. and Astrophys.*—1997.—326.—P. 620—633.
6. Lund J., Dixon R. A user's guide to the Palomar Sky Survey // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1973.—85.—P. 230.
7. Monet D. The USNO-B Catalog // *Astrophys. J.*—2003.—125.—P. 984—993.
8. Monet D., Bird A., Canzian B., et al. A Catalog of Astrometric Standards USNO-A V2.0 // CD-ROM distribution (U. S. Naval Observatory Flagstaff Station and Universities Space Research Association).—1998.
9. Morrison J., Roser S., McLean B. The Guide Star Catalog, Version 1.2: An Astrometric Recalibration and Other Refinements // *Astrophys. J.*—2001.—121.—P. 1752M.
10. Reid I., et al. The Second Palomar Sky Survey // *Publs Astron. Soc. Pacif.*—1991.—103.—P. 661.
11. Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R., et al. The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astrophys. J.*—2006.—131.—P. 1163.
12. Taff L. G. Schmidt plate astrometry: subplate overlap // *Astrophys. J.*—1989.—98.—P. 1912.
13. Taff L. G., Lattanzi M. G., Bucciarelli B. Two successful techniques for Schmidt plate astrometry // *Astrophys. J.*—1990.—358.—P. 359.
14. Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al. The Second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *Astrophys. J.*—2004.—127.—P. 3043.

Поступила в редакцию 07.04.06