

УДК 52-13, 521.95

Н. В. Майгурова, М. В. Мартынов, В. Ф. Крючковский

Научно-исследовательский институт «Николаевская астрономическая обсерватория»
ул. Обсерваторная 1, Николаев, 54030
nadija@mao.nikolaev.ua

**Результаты астрометрических наблюдений звезд
с большими собственными движениями на телескопах
НИИ «Николаевская астрономическая обсерватория»**

В период 2008—2014 гг. на телескопах Николаевской обсерватории проводились астрометрические ПЗС-наблюдения звезд с большими собственными движениями. По результатам наблюдений создан каталог положений и собственных движений 1596 быстрых звезд, собственные движения которых превышают 150 мсд/год. Каталог охватывает зону склонений от 0 до 65°. Стандартная ошибка полученных собственных движений составляет 1...10 мсд/год по обеим координатам в зависимости от наблюдательной истории звезды. Для вывода собственных движений использовались данные восьми различных звездных каталогов и обзоров. Приведены результаты сравнения полученных собственных движений с данными современных каталогов и результаты применения статистического критерия для поиска возможных невидимых компонентов.

РЕЗУЛЬТАТИ АСТРОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ЗІРОК З ВЕЛИКИМИ ВЛАСНИМИ РУХАМИ НА ТЕЛЕСКОПАХ НДІ «МИКОЛАЇВСЬКА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ», Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Крючковський В. Ф. — У період 2008—2014 рр. на телескопах Миколаївської обсерваторії проводилися астрометричні ПЗС-спостереження зірок з великими власними рухами. За результатами спостережень створено каталог положень і власних рухів 1596 швидких зірок, власні рухи яких перевищують 150 мсд/рік. Каталог охоплює зону схилень від 0 до 65°. Стандартна похибка отриманих власних рухів становить 1...10 мсд/рік по обох координатах, залежно від спостережної історії зірки. Для виведення власних рухів викорис-

товувалися дані восьми різних зоряних каталогів і оглядів. Наведено результати порівняння отриманих власних рухів з даними сучасних каталогів і результати застосування статистичного критерію для пошуку можливих невидимих компонентів.

RESULTS OF THE ASTROMETRIC OBSERVATIONS OF STARS WITH LARGE PROPER MOTIONS AT THE RESEARCH INSTITUTE “NIKOLAEV ASTRONOMICAL OBSERVATORY” TELESCOPES, by Maigurova N. V., Martynov M. V., Kryuchkoskiy V. F. — The astrometric CCD observations of stars with large proper motion were carried out at Nikolaev Observatory telescopes during 2008—2014 years. The catalog of positions and proper motions of the 1596 fast stars with proper motions exceeding 150 mas/year was obtained. The catalog covers the declination zone from 0 to 65°. Depending on the observational star history standard errors of the received proper motions were in the range from 1 to 10 mas/year by both coordinates. 8 different star catalogs and surveys were used to calculate the new proper motion data. The results of the comparison of the obtained proper motions with data from other astronomical catalogs and results of statistical test for search possible candidates with invisible components are also presented.

ВВЕДЕНИЕ

Звезды с большими собственными движениями являются ценными объектами для решения целого ряда астрофизических задач, но при отождествлении этих объектов возникают определенные трудности, поэтому в современных астрометрических каталогах значительная часть этих звезд оказывается пропущенной. Это обстоятельство приводит к тому, что эти звезды имеют бедную наблюдательную историю и их собственные движения часто определяются с невысокой точностью. Так детальный анализ списка звезд с большими собственными движениями, отобранных в качестве объектов для обнаружения эффектов микролинзирования, показал, что только 3 % звезд этого списка имеют заявленные собственные движения [6]. В большинстве своем звезды с высокими собственными движениями — это близкие звезды, поэтому они по-прежнему являются главными кандидатами для определений тригонометрических параллаксов и поиска объектов низкой светимости в окрестностях Солнца. На сегодняшний день наиболее полными каталогами звезд с собственными движениями являются: каталог LSPM, полученный на основе результатов сканирования фотографических пластинок (DSS) из программы Паломарских обзоров неба (POSSI и POSSII) [5] и сводный каталог звезд с большими собственными движениями, поддерживаемый Главной астрономической обсерваторией Национальной академии наук Украины [1]. Оба каталога включают только звезды северной полусферы в зоне

склонений от 0 до +90 . Каталог LSPM содержит 61977 звезд с собственными движениями более 150 мсд/год и полон на 98 % для звезд до 19^m. Декларируемая точность собственных движений в каталоге LSPM составляет 10 мсд/год. Для южной полусферы имеются лишь отдельные списки звезд, однако данные каталогов UCAC4 и PPMXL указывают на то, что число звезд с большими собственными движениями в южной полусфере, по-видимому, гораздо больше.

ИНСТРУМЕНТЫ И ПРОГРАММА НАБЛЮДЕНИЙ

Звезды с большими собственными движениями являются довольно яркими объектами, что позволяет получать их наблюдения с высокой точностью на небольших телескопах. Наблюдения звезд с большими собственными движениями выполнялись в Научно-исследовательском институте «Николаевская астрономическая обсерватория» (НИИ НАО) в течение 2008—2014 гг. на аксиальном меридианном круге (АМК) [2] и телескопе «Мобител» [3]. Оба инструмента оснащены ПЗС-камерами и используют для наблюдений режим синхронного переноса заряда.

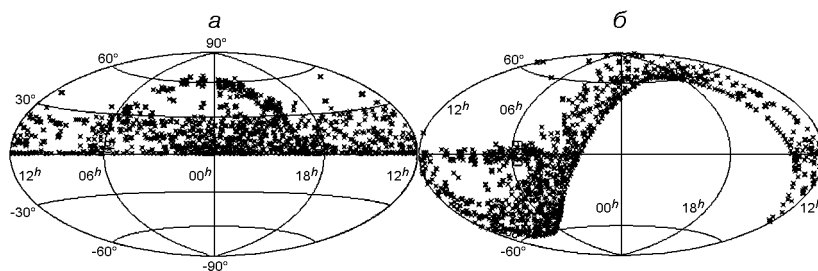


Рис. 1. Распределение звезд каталога по небесной сфере: *а* — в экваториальных координатах, *б* — в галактических координатах

Программа наблюдений была сформирована на основе объектов из каталога LSPM. В программу наблюдений для телескопа АМК вошли звезды 9...15^m, для наблюдений на телескопе «Мобител» эта программа была расширена до 17^m. Наблюдения на телескопе «Мобител» также проводились вблизи меридиана при значении часового угла $\pm 1^h$. Каталог покрывает весь диапазон прямых восхождений в области склонений от 0 до +65 . Распределение звезд каталога по небесной сфере в экваториальных и галактических координатах приведено на рис. 1, который показывает, что исследуемые звезды принадлежат как к звездам плоской составляющей населения Галактики, так и к звездам гало.

ВЫЧИСЛЕНИЕ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАТАЛОГА

Обработка и астрометрическая редукция полученных ПЗС-кадров выполнялась по стандартной схеме [4]. Основной объем астрометрических редукций был выполнен с использованием опорного каталога UCAC2 [10]. Для звезд, склонения которых превышают 40° , в качестве опорного использовался каталог UCAC4 [9]. Поскольку оба каталога получены в системе HCRF, и систематические разности между этими каталогами не превышают случайную погрешность наших наблюдений, мы не приводили положения всех звезд в систему одного опорного каталога. Экваториальные координаты программных звезд представляют собой средние значения координат, вычисленные по всем ПЗС-кадрам, на которых есть изображение этой звезды, и относятся к среднему моменту наблюдения. В качестве оценки точности координат звезд мы использовали стандартную ошибку среднего положения. Разброс отдельных моментов наблюдений для каждой звезды, как правило, не превышает 1-2 мес в силу специфики меридианных наблюдений, поэтому мы не учитывали собственные движения при оценивании ошибки. Средняя стандартная ошибка составила 25 мсд по обоим координатам, среднее число наблюдений одной звезды (медиана распределения) — 10 раз.

На рис. 2 представлены гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок положений.

Как уже отмечалось, большая величина собственного движения рассматриваемых звезд создает определенные трудности при отождествлении таких объектов, даже при относительно небольшой разности эпох (в случае с каталогами 2mass, CMC15 — порядка 10 лет). Первым этапом кроссидентификации наших данных был поиск всех возможных объектов каталога LSPM, которые попали в поле зрения наших ПЗС-кадров, поскольку кроме программных объектов туда могли попасть и другие звезды каталога LSPM. На этом этапе была выполнено отождествление полученных массивов положений звезд с каталогом LSPM, при этом положения звезд каталога LSPM предварительно переводились на среднюю эпоху полученных наблюдений.

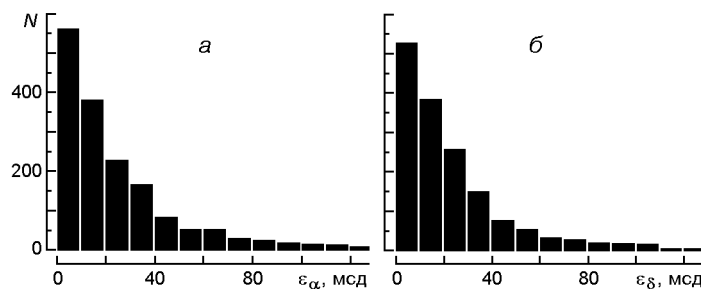


Рис. 2. Гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок положений: *a* — по прямому восхождению, *б* — по склонению

Таблица 1. Каталоги, использовавшиеся в качестве источника положений при вычислении новых собственных движений

Каталог	Номер CDS	Период наблюдений	Количество общих звезд
NikHPM		2008.3—2014.7	1596
USNO A2.0	I/252	1949.9—1957.3	1575
Tycho2	I/259	1991.4—1992.0	441
2mass	II/246	1997.4—2001.1	1596
CMC15	I/327	1999.2—2010.3	1413
GSC2.3	I/305	1980.2—2002.2	1437
SDSS DR9	V/139	1998.8—2009.9	687
Wise	II/328	2010.56	1583
M2000	I/272	1998.9	210

Всего было найдено 1596 звезд каталога LSPM, которые наблюдались более трех раз за период с 2008 по 2014 гг. Для того чтобы получить новые собственные движения этих звезд, необходимо было отождествить их в других каталогах, которые содержат положения звезд на момент наблюдения, не совпадающий с нашим. На этом этапе отождествления положения наших звезд переводились на среднюю эпоху наблюдения каталога, выбранного в качестве первой эпохи, также с использованием собственных движений каталога LSPM. Кроссидентификация и поиск данных выполнялись с помощью собственного программного обеспечения, web-сервиса Vizier Центра астрономических данных в Страсбурге [4] и программного пакета TOPCAT [7].

Каталоги, которые выбирались в качестве источника положений для вычисления собственных движений, должны были содержать оригинальные положения звезд на момент наблюдений, по возможности удаленный от наших наблюдений, и иметь позиционную точность не хуже 0.25 .

В табл. 1 приведен список каталогов, которые использовались в качестве источника других эпох положений, и результаты кроссидентификации позиционного массива наших данных (NikHPM) с этими каталогами. При вычислении собственных движений положения в используемых каталогах не исправлялись за систематические разности, поскольку все они отнесены к системе HCRF/Tycho2. Как можно видеть из табл. 1, количество используемых положений для вычисления новых собственных движений варьирует от 4 до 9.

Вычисление собственных движений звезд было выполнено с использованием линейной модели движения для каждой звезды. Для этого методом наименьших квадратов решалась система линейных уравнений:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x(t_0) \\ y(t_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_x \\ \mu_y \end{pmatrix} (t - t_0),$$

где момент t_0 соответствует середине временного интервала наблюдений.

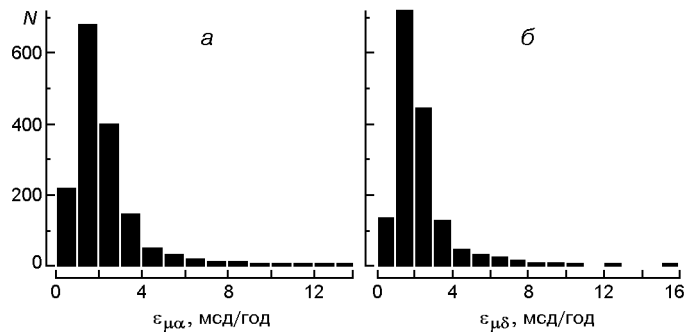


Рис. 3. Гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок собственных движений: a — по прямому восхождению, b — по склонению

Решение системы выполнялось с единичной весовой матрицей. На рис. 3 приведены гистограммы распределения количества N программных звезд по значениям стандартных ошибок собственных движений звезд, полученные в результате решения МНК. Видно, что стандартные ошибки определения собственных движений для большей части рассматриваемых звезд составляют 1...8 мсд/год. Средняя ошибка составляет 2 мсд/год по обеим координатам. Для 3 % звезд ошибки собственных движений оказались довольно значительными (до 25 мсд/год). Возможными причинами этого могут быть как ошибки отдельных каталогов, так и ошибочные отождествления. Большая плотность звезд в области Млечного пути (от 2000 до 10000 на кадре) создает определенные трудности на этапе кроссидентификации даже при подключении дополнительных фотометрических критериев при отождествлении. Следует отметить, что собственные движения звезд в разных каталогах для этой области также имеют значительные расхождения, которые в несколько раз превышают декларируемую среднюю точность отдельных каталогов.

В табл. 2 представлен формат полученного каталога. Полный каталог в формате VO-table доступен на интернет-сайте НИИ НАО по адресу http://www.nao.nikolaev.ua/index.php?catalog_id=408.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ ПОЛУЧЕННЫХ СОБСТВЕННЫХ ДВИЖЕНИЙ С ДАННЫМИ ДРУГИХ КАТАЛОГОВ

Для получения оценки внешней точности было выполнено сравнение полученных новых собственных движений с данными других каталогов.

Табл. 3 содержит средние значения разностей собственных движений по прямому восхождению и склонению, их средние квадратичные отклонения и число общих звезд с учетом выбросов по критерию 3-сигма. Полученные результаты показывают хорошее согласие

Таблица 2. Формат полученного каталога

ID	Номер звезды из каталога LSPM
RA	Прямое восхождение на среднюю эпоху наблюдения, град.
e_RA	Стандартная ошибка прямого восхождения, мсд
Dec	Склонение на среднюю эпоху наблюдения, град
e_Dec	Стандартная ошибка склонения, мсд
m_RA	Собственное движение по прямому восхождению ($\cos \delta$), мсд/год
e_m_RA	Стандартная ошибка собственного движения по прямому восхождению ($\cos \delta$), мсд/год
m_Dec	Собственное движение по склонению, мсд/год
e_m_Dec	Стандартная ошибка собственного движения по склонению, мсд/год
Epoch_Nik	Средняя эпоха наблюдений, год
N	Количество полученных положений
N1	Количество использованных каталогов при вычислении собственного движения
Mag	Звездная величина в системе опорного каталога UCAC2/UCAC4
F2	Значение параметра статистического критерия

Таблица 3. Средние разности $\Delta \mu_{\alpha}$, $\Delta \mu_{\delta}$ полученных оценок собственных движений и значений из других каталогов, а также их средние квадратичные отклонения $\sigma_{\mu_{\alpha}}$, $\sigma_{\mu_{\delta}}$

Каталог	$\Delta \mu_{\alpha}$, мсд/год	$\Delta \mu_{\delta}$, мсд/год	$\sigma_{\mu_{\alpha}}$, мсд/год	$\sigma_{\mu_{\delta}}$, мсд/год	N
LSPM	-1.3	8.9	0.7	8.7	1567
UCAC2	-0.0	5.4	0.6	5.3	576
UCAC4	-1.0	6.9	0.6	6.8	1175
PPMX	0.3	7.3	0.5	8.3	980
PPMXL	0.2	7.8	0.2	7.7	1383
Tycho2	0.3	5.5	1.1	5.5	424

полученных значений с данными других исследований. Как видно, количество звезд, отброшенных по критерию 3-сигма, не превышало 3 % для всех рассматриваемых каталогов. Сравнение наших данных с каталогом LSPM подтверждает заявленную составителями каталога точность собственных движений и полноту этого каталога. В данной работе не ставилась отдельная задача поиска новых быстрых звезд, но анализ массива полученных собственных движений всех звезд, попавших в поле зрения, не выявил объектов, собственные движения которых значительно превышают 150 мсд/год в северной полусфере.

Данные попарных сравнений каталогов позволяют получить оценку внешней ошибки. В случае, когда мы имеем три независимых каталога, дисперсия разностей собственных движений будет равна сумме дисперсий их ошибок, что позволяет получить ошибки каждого из использовавшихся каталогов. В качестве каталогов с независимыми данными использовались собственные движения из каталогов UCAC2 и PPMX. Полученная таким образом оценка внешней точности наших собственных движений по общему массиву из 517 звезд составляет 4.5 мсд/год по обеим координатам.

ПОИСК ЗВЕЗД С НЕВИДИМЫМИ СПУТНИКАМИ

В процессе выполнения сравнения наших данных с различными каталогами были получены несколько вариантов собственных движений на разных временных интервалах. Согласно работе [8] существенные различия между этими собственными движениями могут указывать на наличие невидимых компонентов у данной звезды. Для количественной оценки вероятности отнесения звезды к неодиочным звездам в работе [8] предлагается использовать статистику

$$F^2 = \frac{\mu_{\alpha}^2}{\sigma_{\alpha}^2} + \frac{\mu_{\delta}^2}{\sigma_{\delta}^2},$$

где μ_{α} , μ_{δ} — соответствующие различия собственных движений, полученных с разными каталогами, σ_{α} , σ_{δ} — их ошибки.

Объекты, для которых $F > 3.44$, рассматриваются как двойные звезды, имеющие невидимые компоненты. Для использования этого метода мы сравнивали различия между двумя массивами собственных движений. Первый был получен с использованием каталога USNO A2.0 в качестве источника положений на первую эпоху, второй — каталога 2mass.

Разность эпох наших наблюдений с каталогом USNO A2.0 составляет около 60 лет, что позволяет, несмотря на относительно невысокую точность фотографических положений и наличие систематических зональных погрешностей в этом каталоге, получить собственные движения для наших звезд с точностью порядка 5 мсд/год. Эти собственные движения могут считаться средними, поскольку получены на достаточно большом промежутке времени. Средняя разность эпох наблюдений звезд каталога 2mass с нашими данными составляет около 11 лет, что позволяет рассматривать их как «квазимгновенные». Точность этих собственных движений составляет 4...12 мсд/год.

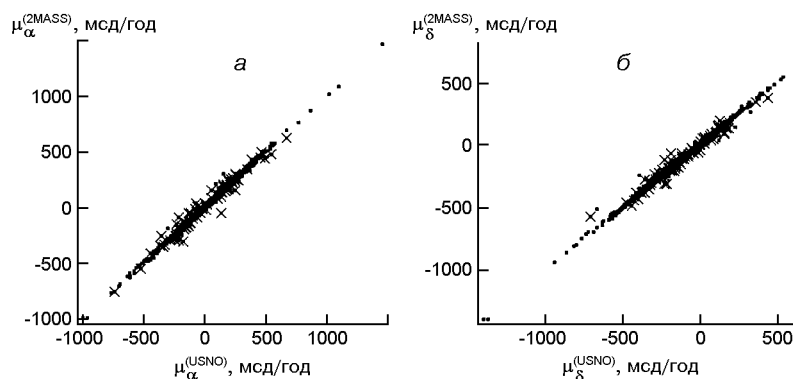


Рис. 4. Сравнение собственных движений по прямому восхождению (слева) и склонению (справа), полученных с использованием каталогов USNO A2.0 и 2mass в качестве первой эпохи положений

В результате проверки нашего каталога звезд на двойственность была обнаружена 101 звезда со значением параметра F , превышающем критическое.

Этот список звезд был сопоставлен со всеми каталогами и таблицами данных, которые содержатся в базе Страсбургского центра астрономических данных.

Около 30 % звезд оказались известными тесными двойными системами, что подтверждает работоспособность используемого критерия, однако окончательный вывод о двойственности (либо кратности) остальных звезд возможно сделать лишь после дополнительных исследований. Причинами ошибочного появления значимых разностей могут быть как ошибки используемых каталогов, так и ошибки отождествления, особенно это касается звезд, находящихся в плоскости Галактики.

Графическое сопоставление полученных пар собственных движений приведено на рис. 4, где звезды со значением параметра $F > 3.44$ выделены крестиком.

ВЫВОДЫ

На основе ПЗС-наблюдений на двух телескопах Научно-исследовательского института «Николаевская астрономическая обсерватория» определены экваториальные координаты и собственные движения 1596 быстрых звезд каталога LSPM (полная величина собственного движения более 150 мсд/год). Комбинация положений на современную эпоху с данными нескольких каталогов позволила вычислить новые собственные движения этих звезд со средней точностью порядка 2 мсд/год. Среднее число наблюдений каждой звезды составляет не менее трех раз. Для отдельных звезд выполнено достаточно большое количество наблюдений, разнесенных по времени, что является ценным материалом для выявления неравномерностей в движениях этих звезд. В настоящее время мы продолжаем наблюдения звезд с собственными движениями более 400 мсд/год. Высокая позиционная точность наших наблюдений позволяет в будущем надеяться на успешное получение оценок тригонометрических параллаксов для этих звезд.

1. *Иванов Г. И.* Каталог звезд с большими собственными движениями (версия 1) // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—**21**, № 2.—С. 156—158.
2. *Майгурова Н. В., Мартынов М. В., Пинигин Г. И.* Каталог звезд в площадках аксиального меридианного круга Николаевской обсерватории // Кинематика и физика небес. тел.—2013.—**29**, № 1.—С. 68—80.
3. *Шульга А. В., Козырев Е. С., Сибирякова Е. С.* Мобильный комплекс телескопов НИИ НАО для наблюдений объектов околоземного космического пространства // Космічна наука і технологія.—2012.—**18**, № 4.—С. 52—58.

4. *Bonnarel F., Fernique P., Bienayme O., et al.* The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources // *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*—2000.—**143**.—P. 33—40.
5. *Lepine S., Shara M.* A catalog of northern stars with annual proper motions larger than 0.15" (LSPM-NORTH Catalog) // *Astron. J.*—2005.—**129**.—P. 1483—1522.
6. *Proft S., Demleitner M., Wambsganss J., et al.* Prediction of astrometric microlensing events during the Gaia mission // *Astron. and Astrophys.*—2011.—**536**.—id. A50.—11 p.
7. *Taylor M. B.* TOPCAT & STIL: Starlink table/VOTable processing software // *ASP Conf. Ser.*—2005.—Vol. **347**.—P. 29.—(Proceedings of the Conference «Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV», held 24—27 October, 2004 in Pasadena, California, USA / Eds P. Shopbell, M. Britton, R. Ebert. — San Francisco: Astronomical Society of the Pacific).
8. *Wielen R., Lenhardt H., Schwan H., et al.* Indications on the binary nature of individual stars derived from a comparison of their HIPPARCOS proper motions with ground-based data. I. Basic principles // *Astron. and Astrophys.*—1999.—**346**.—P. 675—685.
9. *Zacharias N., Finch C. T., Girard T. M., et al.* The fourth U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.*—2013.—**145**, N 2.—id. 44.—14 p.
10. *Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al.* The second U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC2) // *Astron. J.*—2004.—**127**, N 5.—P. 3043—3059.

Статья поступила в редакцию 21.12.15