

УДК 524.3

П. Н. Федоров¹, В. С. Ахметов¹, Г. Б. Величко¹, В. М. Шульга²

¹ Научно-исследовательский институт астрономии

Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, Харьков

² Радиоастрономический институт Национальной академии наук Украины, Харьков

КИНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ ПО СОБСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЯМ ЗВЕЗД

Представлен кинематический анализ собственных движений звезд каталогов XPM2, PPMXL и UCAC4, который выполнен на основе линейной модели Огородникова — Милна. Показано, что кинематические параметры Галактики согласуются в яркой области с принятыми МАС значениями. Установлено, что постоянная Оорта V практически не зависит от звездной величины, и ее среднее значение равно примерно $10.5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. Вместе с тем полученные значения постоянной Оорта A оказались зависимыми от звездной величины и лежат в пределах от 14.22 до $5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. Одной из причин обнаруженного эффекта может быть наличие уравнения блеска в собственных движениях звезд используемых каталогов.

Ключевые слова: астрометрия, каталоги, кинематика, Галактика.

ВВЕДЕНИЕ

Уже почти два десятилетия HCRF (HIPPARCOS Celestial Reference Frame) является оптической реализацией ICRS (International Celestial Reference System [2]). Ее расширением в область слабых звездных величин примерно до $V = 11.5^m$ является каталог «Tycho-2» [14], содержащий положения и собственные движения около 2.5 млн звезд. Все остальные каталоги, которые распространяют систему HCRF в область слабых звездных величин, используют звезды HIPPARCOS [16, 17] и «Tycho-2» как опорные. Примерами таких каталогов являются каталоги PPMXL [19], SPM4 [12], UCAC4 [23], 2MASS [20] и др., полученные на основе либо только фотографических либо только ПЗС-наблюдений, или же из их комбинаций. Особенностями этих каталогов является то, что с помощью их данных в ярком конце диапазона звездных величин на любой момент времени система HIPPARCOS/«Tycho-2» воспроизводится надежно, а в слабом конце вос-

производимая система может значительно отличаться от системы HIPPARCOS/«Tycho-2», например, из-за остаточных зональных или систематических ошибок, таких как уравнение блеска.

Так, в работах [7—9] отмечается, что система собственных движений каталога HIPPARCOS возможноотягощена систематической ошибкой примерно 2 мсд/год (миллисекунд дуги в год), вызванной привязкой к системе абсолютных собственных движений нескольких тысяч ярких звезд из используемых для этой цели каталогов SPM2 [18], NPM1 [13, 15] и KSZ [21]. В работах [11, 12, 22] отмечается, что каталог «Tycho-2», возможно, содержит систематические зональные ошибки, а также ошибки собственных движений, вызванные уравнением блеска. Таким образом, с каждым годом не только случайные, но и систематические погрешности каталогов, опирающихся на систему HCRF, будут увеличиваться, особенно в слабой области. Другими словами, указанные факты ставят под сомнение инерциальность системы HCRF, а значит и достоверность других приложений, например кинематических исследований в Млечном Пути,

© П. Н. ФЕДОРОВ, В. С. АХМЕТОВ, Г. Б. ВЕЛИЧКО,
В. М. ШУЛЬГА, 2015

требующих как высокой систематической точности, так и высокой плотности звезд и полноты охвата всей небесной сферы.

В преддверии создания каталогов по проекту GAIA массовые астрометрические каталоги XPM [10], PPMXL и UCAC4 являются базой для проведения различных астрономических работ. В настоящее время в НИИ астрономии ХНУ им. В. Н. Каразина создан новый высокоплотный каталог XPM2. Этот каталог содержит примерно один миллиард объектов, для которых приведены положения, а также собственные движения. Каталог покрывает все небо в диапазоне звездных величин $10^m < B < 22^m$ и не имеет никаких пропусков в зоне галактического экватора. Кроме астрометрической информации, в каталоге XPM2 приведены звездные величины в видимом диапазоне B, R, I , а для некоторых объектов и в ближнем инфракрасном J, H, K с их ошибками из каталога 2MASS. Для северного неба использовались обзоры POSS-I (R) и POSS-II (B), а для южного неба — SERC-J и SERC-R со средней разностью эпох около 40 и 12 лет соответственно. Далее мы представляем некоторые результаты использования данных XPM2 для звездно-кинематических исследований.

РАБОЧИЕ УРАВНЕНИЯ

В настоящей работе используется прямоугольная галактическая система координат, оси которой направлены от наблюдателя в сторону галактического центра ($l = 0^\circ, b = 0^\circ$, ось x), в направлении галактического вращения ($l = 90^\circ, b = 0^\circ$, ось y) и в направлении северного полюса Галактики ($b = 90^\circ$, ось z). В модели Огородникова — Милна приняты обозначения, которые были введены в работах Клуба [3, 4] и применялись в работах Монта [5, 6]. Как известно из работы [1], при использовании только собственных движений звезд один из диагональных элементов матрицы деформации не может быть определен. Тем не менее, определение разностей диагональных элементов матрицы деформации, например в виде $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$ и $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$, является возможным.

При таком подходе рабочие уравнения записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b = & (1/r)(X_0 \sin l - Y_0 \cos l) - M_{32}^- \cos l \sin b - \\ & - M_{13}^- \sin l \sin b + M_{21}^- \cos b + \\ & + M_{12}^+ \cos 2l \cos b - M_{13}^+ \sin l \sin b + \\ & + M_{23}^+ \cos l \sin b - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \sin 2l \cos b, \quad (1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_b = & (1/r)(X_0 \cos l \sin b + Y_0 \sin l \sin b - Z_0 \cos b) + \\ & + M_{32}^- \sin l - M_{13}^+ \cos l - 0.5 M_{12}^+ \sin 2l \sin 2b + \\ & + M_{13}^+ \cos l \cos 2b + M_{23}^+ \sin l \cos 2b - \\ & - 0.5(M_{11}^+ - M_{22}^+) \cos^2 l \sin 2b + 0.5(M_{33}^+ - M_{22}^+) \sin 2b, \quad (2) \end{aligned}$$

где X_0, Y_0, Z_0 — компоненты скорости пекулярного движения Солнца, $M_{12}^-, M_{13}^-, M_{23}^-$ — компоненты вектора твердотельного вращения бесконечно малой околосолнечной окрестности вокруг соответствующих осей. Каждая из величин $M_{12}^+, M_{13}^+, M_{23}^+$ описывает деформацию в соответствующей плоскости. Величины M_{21}^- и M_{12}^+ являются аналогами постоянных Оорта В и А и связаны коэффициентом пропорциональности 4.74. Диагональные компоненты тензора деформации $M_{11}^+, M_{22}^+, M_{33}^+$ описывают общее сжатие или расширение всей звездной системы.

Таким образом, имеется одиннадцать искомым неизвестных, которые мы определяем методом наименьших квадратов.

Величина $1/r$ — паралактический фактор, который в настоящей работе принимается равным единице. В этом случае звезды отнесены к единичной сфере. При таком подходе все определяемые параметры пропорциональны гелиоцентрическому расстоянию рассматриваемого центра звезд и выражены в тех же единицах, что и компоненты собственного движения звезд, т. е. в мсд/год. Такой метод анализа звездных движений используется вынужденно, из-за отсутствия высокоточных параллаксов звезд.

Результаты решения системы уравнений (1), (2), полученные на основе звезд каталогов XPM2, PPMXL и UCAC4 смешанного спектрального состава, в зависимости от звездной величины, представлены на рис. 1. Нами были использованы только те звезды каталогов, которые удовлетворяли ограничению на модуль тангенциальной скорости звезд $|\mu_l|^2 = (\mu_\alpha^2 \cos^2 \delta + \mu_\delta^2) < 300$ мсд/год. При этом отбрасывались звезды, пространствен-

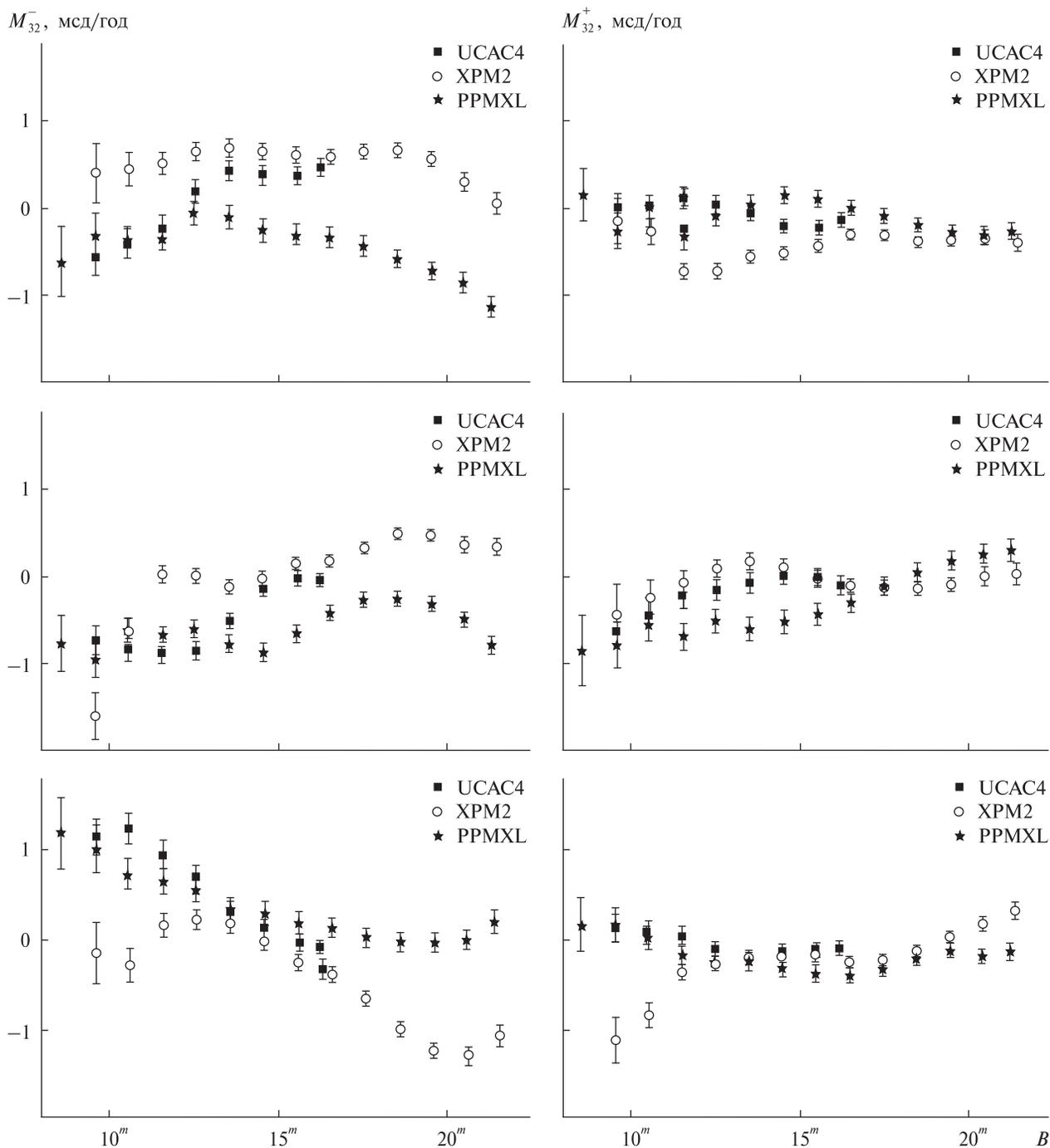


Рис. 1. Компоненты тензоров вращения (слева) и деформации (справа) в зависимости от звездной величины B

ная скорость которых превышала гиперболическую, например звезды, имеющие гигантские peculiarные скорости, полученные в результате взрывов и сближений.

Разбивка производилась на интервалы звездных величин шириной в 1^m . В каждом интервале звездных величин вся небесная сфера разбивалась на 1633 области равной площади, так называемые

площадки Шарлье. Смысл разбивки состоит в том, что несмотря на разницу в количестве звезд, каждой площадке присваивается единый вес при решении системы условных уравнений (1), (2). Полученные данные использовались для решения системы уравнений (1), (2). В каждом интервале звездных величин случайные ошибки определения всех искомым параметров составляют 0.05–0.10 мсд/год, ошибки определения величин ($M_{11}^+ - M_{22}^+$) и ($M_{33}^+ - M_{22}^+$) — в два раза больше. Методика получения данных, используемых для решения системы уравнений (1), (2) для каталогов XPM2, UCAC4 и PPMXL совершенно одинаковая.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ КАТАЛОГИ

Недавно созданный и еще не опубликованный астрометрический каталог XPM2 в настоящее время является единственным массовым каталогом, в котором содержатся собственные движения примерно одного миллиарда звезд до $B < 23^m$. Имеется полное заполнение неба в интервале склонений $-90^\circ < \delta < 90^\circ$. Точность собственных движений слабых звезд в каталоге XPM2 лежит в пределах от 3 до 10 мсд/год. В отношении своих собственных движений каталог XPM2 представляет собой независимую от HCRF реализацию оптической системы отсчета.

Каталог UCAC4 содержит 113 миллионов покрывающих все небо звезд от 8^m до 16^m в нестандартной фотометрической полосе между V и R . Точность координат на среднюю эпоху оценивается в 15–100 мсд, а формальные ошибки собственных движений — в 1–10 мсд/год, в зависимости от звездной величины. Систематические ошибки собственных движений заключены в пределах 1–4 мсд/год. Каталог содержит координаты и собственные движения и считается полным вплоть до $R = 16^m$. Каталог UCAC4 является последним каталогом в проекте UCAS. В этом проекте не использовались фотографические наблюдения для получения положений и все измерения были выполнены между 1998 и 2004 г. только с использованием ПЗС-приемников. Напротив, для получения собственных движений использовались фотографические наблюдения NPM и SPM. Каталог распространяет систему ICRS/«Tycho-2» на слабые звезды.

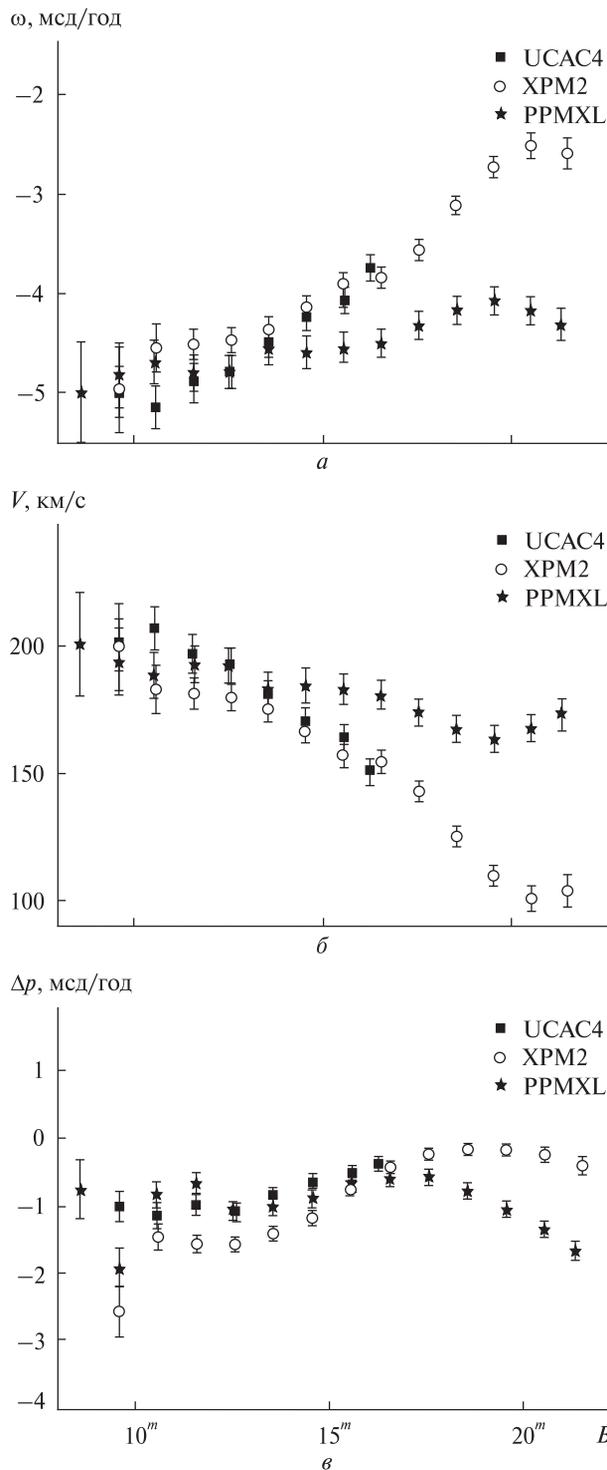


Рис. 2. Зависимость от звездной величины B угловой скорости вращения Галактики $\omega = M_{12}^+ - M_{12}^-$ (а), соответствующей ей на расстоянии 8.5 кпк линейной круговой скорости V (б) и поправки Δp к постоянной прецессии (в)

Каталог PRMXL содержит информацию о положениях и собственных движениях в системе ICRS приблизительно 900 млн звезд до звездной величины $V = 20^m$ с полным покрытием неба. Средние ошибки собственных движений заключены в пределах от 4 до 10 мсд/год, а погрешность координат на эпоху 2000.0 оценивается значениями от 80 до 120 мсд для 410 млн объектов, для которых известны положения в каталоге 2MASS [20]. Для остальных звезд погрешность положений лежит между значениями 150–300 мсд. Нами были использованы те звезды каталога, для которых приведена хотя бы одна из звездных величин b_1 или b_2 . Если приведены обе, то магнитуда принималась равной $(b_1 + b_2)/2$. В конечном итоге количество использованных звезд из каталога PRMXL составило 750 млн.

Как видно из рис. 1 (слева), компоненты тензора вращения, полученные по звездам XPM2 и UCAC4 в диапазоне звездных величин $B > 15^m$, хорошо согласуются между собой как по величине, так и по поведению. Эти же компоненты, полученные по данным PRMXL в яркой области, лучше согласуются с таковыми в UCAC4.

Этот же вывод можно сделать и для компонентов тензора деформации (рис. 1, справа). Их поведение для каталогов XPM2 и UCAC4 начинает совпадать примерно с 13^m . Только компонент M_{31}^+ для каталога PRMXL в слабой области согласуется с аналогичными компонентами для каталогов XPM2 и UCAC4. Другие компоненты отличаются более чем на 1 мсд/год. Это свидетельствует о том, что в слабой области системы собственных движений XPM2 и UCAC4 сравнительно лучше согласуются между собой, чем в яркой. Система собственных движений PRMXL заметно отличается в слабой области звездных величин как от UCAC4, так и от XPM2.

Полученная по собственным движениям ярких звезд используемых каталогов угловая скорость ω вращения Галактики (рис. 2) на расстоянии Солнца составляет примерно -5 мсд/год и не противоречит принятому значению MAS . Для более слабых звезд мы видим изменение угловой скорости вплоть до значений примерно -2.5 мсд/год, что соответствует изменению круговой скорости V галактического вращения от 200 км/с прибли-

зительно до 100 км/с на околосолнечном расстоянии 8.5 кпк.

Мы также получили значение поправки $\Delta\mu$ к постоянной прецессии по собственным движениям звезд различных звездных величин. Оказалось, что только для слабых звезд каталога XPM2 такая поправка не требуется. Очевидно, что поправка прецессии не может зависеть от звездной величины, и то, что мы наблюдаем на рис. 2, вероятно вызвано наличием уравнивания блеска в собственных движениях звезд используемых каталогов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали возможность использования собственных движений звезд современных каталогов для кинематического анализа не только ярких звезд, находящихся сравнительно близко к Солнцу, но и звезд, расположенных далеко. Получены кинематические параметры Галактики по данным трех наиболее высокоплотных каталогов. Эти результаты хорошо согласуются в яркой области с результатами других исследований. Однако в слабом диапазоне звездных величин полученные результаты сравнивать не с чем, поскольку они получены фактически впервые. Приведенное сравнение кинематических параметров по данным трех каталогов свидетельствует о хорошем качестве собственных движений в каталоге XPM2, особенно в его слабом диапазоне звездных величин.

Данная работа была поддержана в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по научным космическим исследованиям на 2012–2016 гг.

1. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. — М.: Физматгиз, 1965. — 627 с.
2. Arias E. F., Charlot P., Feissel M., Lestrade J.-F. The extragalactic reference system of the International Earth Rotation Service, ICRS // Astron. and Astrophys. — 1995. — **303**. — P. 604–608.
3. Clube S. V. M. Galactic rotation and the precession constant // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1972. — **159**. — P. 289.
4. Clube S. V. M. Another look at the absolute proper motions obtained from the Lick pilot programme // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. — 1973. — **161**. — P. 445–463.
5. du Mont B. A three dimensional analysis of the kinematics of 512 FK5/FK4 sup stars // Astron. and Astrophys. — 1977. — **61**. — P. 127–132.

6. *du Mont B.* A rediscussion of determination of precession and Galactic rotation from Lick proper motions referred to galaxies // *Astron. and Astrophys.* — 1978. — **66**. — P. 441—451.
 7. *Fedorov P. N., Akhmetov V. S., Bobylev V. V.* Residual rotation of the HIPPARCOS/Tycho2 system with respect to extragalactic system // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — **416**. — P. 403—408.
 8. *Fedorov P. N., Akhmetov V. S., Bobylev V. V., Baikova A. T.* An investigation of the absolute proper motions of the XPM catalogue // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2010. — **406**. — P. 1734—1744.
 9. *Fedorov P. N., Akhmetov V. S., Bobylev V. V., Gontcharov G. A.* The XPM catalogue as a realization of the ICRS in optical and near-infrared ranges of wavelengths // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — **415**. — P. 665—672.
 10. *Fedorov P. N., Myznikov A. A., Akhmetov V. S.* The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* — 2009. — **393**. — P. 133—138.
 11. *Finch C. T., Zacharias N., Wycoff G. L.* UCAC3: Astrometric reductions // *Astron. J.* — 2010. — **139**. — P. 2200—2207.
 12. *Girard T. M., W. van Altena, Zacharias N., et al.* The Southern proper motion program. IV. The SPM4 catalog // *Astron. J.* — 2011. — **142**. — 12 p.
 13. *Hanson R. B., Klemola A. R., Jones B. F., Monet D. G.* Lick Northern Proper Motion program: III. NPM2 Catalog // *Astron. J.* — 2004. — **128**. — P. 1430—1445.
 14. *Hög E., Fabricius C., Makarov V. V., et al.* The Tycho-2 catalogue of the 2.5 million brightest stars // *Astron. and Astrophys.* — 2000. — **355**. — P. 27—30.
 15. *Klemola A. R., Hanson R. B., Jones B. F.* Lick NPM program: NPM1 Catalog and its applications // *Galactic and Solar System Optical Astrometry / Eds L. V. Morrison, G. F. Gilmore.* — Cambridge: Univ. Press, 1994. — P. 20.
 16. *Kovalevsky J., Lindegren L., Perryman M. A. C., et al.* The HIPPARCOS catalogue as a realisation of the extragalactic reference system // *Astron. and Astrophys.* — 1997. — **323**. — P. 620—633.
 17. *Perriman M. A. C., Lindegren L., Kovalevsky J., et al.* The HIPPARCOS catalogue // *Astron. and Astrophys.* — 1997. — **323**, N 1. — P. 49—52.
 18. *Platais I., Girard T. M., Kozhurina-Platais V., et al.* The Southern Proper Motion program. II. A catalog at the South Galactic Pole // *Astron. J.* — 1998. — **116**. — P. 2556—2564.
 19. *Roeser S., Demleitner M., Schilbach E.* The PPMXL catalog of positions and proper motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and the Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2010. — **139**, N 6. — P. 2440—2447.
 20. *Rybka S. P., Yatsenko A. I.* The GPM catalog (Rybka+, 1997—2001) // *VizieR On-line Data Catalog: I/285 // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.* — 1997. — **13**, N 5. — P. 70—74.
 21. *Skrutskie M. F., Cutri R. M., Stiening R.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *Astron. J.* — 2006. — **131**, N 2. — P. 1163—1183.
 22. *Zacharias N., Finch C., Girard T., et al.* The Third US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC3) // *Astron. J.* — 2010. — **139**, N 6. — P. 2184—2199.
 23. *Zacharias N., Urban S. E., Zacharias M. I., et al.* The Fourth U. S. Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.* — 2013. — **145**. — P. 1538.
- Стаття надійшла до редакції 10.12.15*
- П. М. Федоров¹, В. С. Ахметов¹,
Г. Б. Величко¹, В. М. Шульга²*
- ¹ Науково-дослідний інститут астрономії
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, Харків
- ² Радіоастрономічний інститут
Національної академії наук України, Харків
- КІНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ
ЗА ВЛАСНИМИ РУХАМИ ЗІРОК**
- Представлено кінематичний аналіз власних рухів зірок каталогів XPM2, PPMXL і UCAC4, який виконано на основі лінійної моделі Огородникова — Мілна. Показано, що кінематичні параметри Галактики узгоджуються в яскравій області з прийнятими МАС значеннями. Встановлено, що постійна Оорта В практично не залежить від зоряної величини, і її середнє значення дорівнює приблизно $10.5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. Разом з тим отримані значення постійної Оорта А виявились залежними від зоряної величини і змінюються в межах від 14.22 до $5 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$. Однією з причин виявленого ефекту може бути наявність рівняння блиску у власних рухах зірок використовуваних каталогів.
- Ключові слова:** астрометрія, каталоги, кінематика, Галактика.
- P. N. Fedorov¹, V. S. Akhmetov¹, A. B. Velichko¹, V. M. Schulga²*
- ¹ Institute of Astronomy
of Kharkiv National University, Kharkiv
- ² Institute of Radio Astronomy,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv
- THE KINEMATICS OF THE GALAXY
BY PROPER MOTIONS OF STARS**
- The kinematic analysis of proper motions of stars of the XPM2, PPMXL and UCAC4 catalogues, which was performed based on the linear Ogorodnikov-Milne model is present. It is shown that in the bright end of the whole magnitude interval the kinematic parameters of the Galaxy are in agreement with values accepted by the IAU. It is found that the Oort constant B is practically independent from the magnitude and its mean value is about $10.5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$. At the same time, the Oort constant A depends on the magnitude and its values vary from 14.22 to $5 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \text{kpc}^{-1}$. One possible reason for this observed effect could be the presence of the magnitude equation in proper motions of stars of the used catalogues.
- Key words:** astrometry, catalogues, kinematics, Galaxy.