

## **СРАВНЕНИЕ ГАЛАКТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КООРДИНАТ XPM и UCAC4**

**Витязев В.В., Цветков А.С.**

*Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия*

*Произведено сравнение стандартной Галактической системы координат с возможными версиями этой системы, построенными на новом наблюдательном материале по данным каталогов 2MASS, SPECFIND, AKARI, WISE. Показано, что ошибки ориентации осей стандартной Галактической системы координат измеряются несколькими минутами дуги. На основе разбиения более 40 миллионов общих звезд каталогов XPM и UCAC4 на группы, принадлежащие 12 интервалам звездных величин в полосе J шириной  $0.5^m$  для средних значений от  $10.25^m$  до  $15.75^m$ , получены систематические разности галактических координат обоих каталогов в виде разложения по векторным сферическим функциям с учетом уравнения яркости. Для выделения сигнала из шума использован статистический критерий, позволяющий тестировать все гармоники, которые можно вычислить при задании систематических разностей на сетке HealPix. Было найдено, что углы взаимной ориентации стандартных Галактических систем координат, реализованных с помощью каталогов XPM и UCAC4, различаются на миллисекундном уровне.*

### **1. Введение**

Сравнение каталогов традиционно делается в экваториальной системе координат, и, насколько нам известно, в литературе нет примеров вычисления систематических разностей положений и собственных движений в Галактической системе. Тем не менее, Галактическая система координат, которая реализуется с помощью преобразования экваториального триэдра, широко используется в различных задачах астрономии, таких как изучение структуры Галактики, звездная кинематики и динамика. Применяющаяся в настоящее время Галактическая система координат была введена Международным астрономическим союзом в 1958 году на основе изучения распределения нейтрального водорода в Галактике. В последнее время появились работы [6, 7], в которых ставится вопрос об улучшении Галактической системы координат путем идентификации плоскости Галактики с учетом нового наблюдательного материала о координатах различных объектов в инфракрасном диапазоне (каталог 2 MASS, [10]) и в радиодиапазоне (каталог SPECFIND v.2.0, [12]). Все это делает актуальной задачу о сравнении различных реализаций Галактических систем координат.

Настоящая статья посвящена решению такой задачи. В ней произведено сравнение Галактических координат, полученных в стандартной системе МАС 1958, и в новых системах, основанных на каталогах 2MASS и SPECFIND v.2.0. Помимо этого приводятся систематические разности галактических координат каталогов XPM [4] и UCAC4 [13], представленные в виде разложений по векторным сферическим функциям с учетом уравнения яркости. Полученные коэффициенты разложений используются для изучения взаимной ориентации и вращения изучаемых систем отсчета.

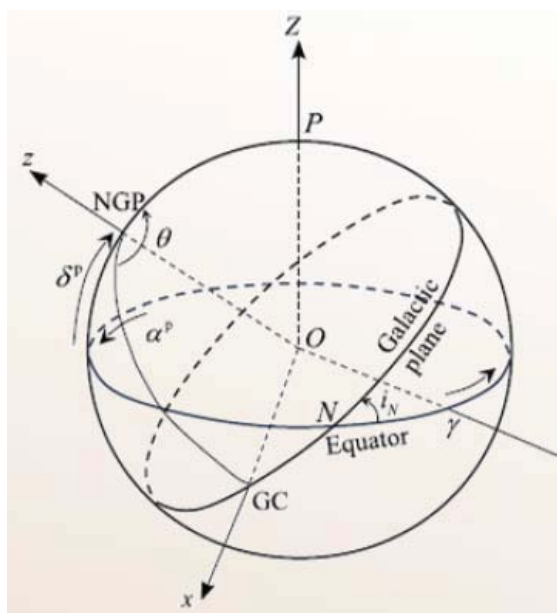
### **2. Сравнение стандартной Галактической системы отсчета с ее новыми вариантами**

Как известно, Галактическая система координат реализуется долготами и широтами звезд, которые получаются из их экваториальных координат с помощью матричного преобразования

$$\begin{bmatrix} \cos l \cos b \\ \cos l \sin b \\ \sin b \end{bmatrix} = N \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta \\ \cos \alpha \sin \delta \\ \sin \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$N = R_z(90^\circ - \theta) R_x(90^\circ - \delta^p) R_z(90^\circ + \alpha^p), \quad (2)$$

где  $R_x, R_z$  – стандартные матрицы, описывающие повороты систем координат вокруг осей  $x, z$  соответственно,  $\alpha^p, \delta^p$  – экваториальные координаты северного полюса Галактики, а  $\theta$  – позиционный угол центра Галактики, отсчитываемый от большого круга, проходящего через полюс мира и северный полюс Галактики (рис. 1).



**Рис. 1.** Параметры ориентации Галактической системы координат относительно экваториальной системы координат.

Для вычисления собственных движений звезд в Галактической системе координат можно воспользоваться нижеследующими формулами:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \mu_b \\ \mu_l \cos b \end{bmatrix} = A^{-1}(l, b) N A(\alpha, \delta) \begin{bmatrix} 1 \\ \mu_\delta \\ \mu_\alpha \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$A(\alpha, \delta) = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \delta & -\cos \alpha \sin \delta & -\sin \alpha \\ \sin \alpha \cos \delta & -\sin \alpha \sin \delta & \cos \alpha \\ \sin \delta & \cos \delta & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

По решению Международного астрономического союза [2] в 1958 году численные значения параметров ориентации Галактической системы координат, отнесенные к эпохе B1950.0, были введены во всеобщее употребление. Их новые значения, редуцированные на систему FK5, J2000.0, имеют следующий вид:

$$\alpha^p = 12^h 51^m 26^s.2755; \quad \delta^p = 27^\circ 07' 41''.705; \quad \theta^p = 122^\circ.93191857. \quad (5)$$

В настоящее время Галактическая система координат, задаваемая выражениями (5), является стандартной. Она была получена на основе изучения распределения нейтрального водорода во внутренних частях диска Галактики. В работах [6, 7] предложены другие значения параметров (5), основанные на современных наблюдательных данных в инфракрасной области – каталог 2MASS [10], и в радиодиапазоне – каталог SPECFIND 2.0 [12]:

$$\alpha_{2MASS}^p = 12^h 50^m 46^s .5444; \quad \delta_{2MASS}^p = 26^\circ 48' 56'' .706; \quad \theta_{2MASS}^p = 122^\circ .912729244; \quad (6)$$

$$\alpha_{SPEC}^p = 12^h 49^m 58^s .7360; \quad \delta_{SPEC}^p = 26^\circ 32' 24'' .989; \quad \theta_{SPEC}^p = 122^\circ .823292026. \quad (7)$$

К этому следует добавить, что работе [3] приведены параметры еще одной Галактической системы координат, построенной по данным многоволновых каталогов AKARI [8] и WISE [9]:

$$\alpha_{AK-WI}^p = 192^\circ .777; \quad \delta_{AK-WI}^p = 26^\circ .9298; \quad \theta_{AK-WI}^p = 122^\circ .95017. \quad (8)$$

Для того чтобы выяснить отличия стандартной Галактической системы координат от ее новых вариантов, мы проделали следующие вычисления:

1. В центрах HealPix-площадок [5] был образован искусственный каталог экваториальных координат

$$\alpha_j, \delta_j, j = 0, \dots, N - 1; (N = 1200).$$

2. С помощью преобразования (1) с наборами параметров (5–8) были получены четыре каталога с Галактическими координатами, которые мы в дальнейшем будем обозначать как и Gal(FK5), Gal(2MASS), Gal(SPEC), Gal(AK-WI);

3. Для сравнения новых Галактических систем со стандартной системой были вычислены разности галактических координат  $\Delta l \cos b, \Delta b$  вида Gal(2MASS) – Gal(FK5) и Gal(SPEC) – Gal(FK5); Gal(AK-WI) – Gal(FK5);

4. Поля систематических разностей

$$\Delta \mathbf{G}(l, b) = \Delta l \cos b \mathbf{e}_l + \Delta b \mathbf{e}_b, \quad (\mathbf{e}_l, \mathbf{e}_b - \text{орты в направлениях долгот и широт}) \quad (8)$$

были представлены в виде разложения по векторным сферическим функциям (ВСФ):

$$\Delta \mathbf{G}(l, b) = \sum_{nkp} t_{nkp} \mathbf{T}_{nkp} + \sum_{nkp} s_{nkp} \mathbf{S}_{nkp}. \quad (9)$$

В этой формуле  $\mathbf{T}_{nkp}, \mathbf{S}_{nkp}$  – тороидальные и сфероидальные сферические функции, явные выражения для которых даны работе [1]. Коэффициенты аппроксимации для каждой пары галактических каталогов вычислялись по формулам

$$t_{nkp} = \frac{4\pi}{N} \sum_j \Delta \mathbf{G}(l_j, b_j) \mathbf{T}_{nkp}(l_j, b_j), \quad (10)$$

$$s_{nkp} = \frac{4\pi}{N} \sum_j \Delta \mathbf{G}(l_j, b_j) \mathbf{S}_{nkp}(l_j, b_j). \quad (11)$$

5. С помощью формул,

$$\varepsilon_x = -t_{111} / 2.89; \quad \varepsilon_y = -t_{110} / 2.89; \quad \varepsilon_z = -t_{101} / 2.89; \quad (12)$$

взятых из работы [11], были вычислены углы поворота осей прямоугольной Галактической системы Gal(FK5) для их совмещения с осями новых версий Галактической системы координат. Полученные результаты представлены в таблице 1.

**Таблица 1.** Компоненты вектора поворота осей ГСК Gal(FK5) для их совмещения с осями систем Gal(2MASS), Gal(SPEC), Gal(AK-WI). Единицы измерения – минуты дуги.

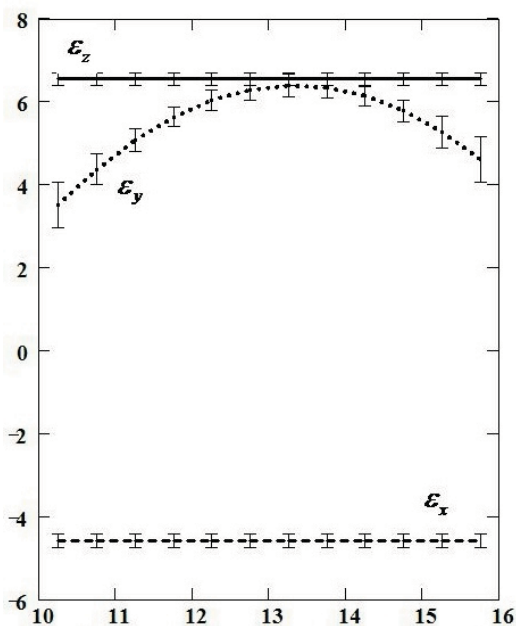
	$\varepsilon_x$	$\varepsilon_y$	$\varepsilon_z$
Gal(2MASS)	20.58	2.75	-3.36
Gal(SPEC)	40.29	2.74	-3.37
Gal(AK-WI)	12.41	2.78	-3.35

Мы видим, что ориентация осей новых Галактических систем относительно стандартной измеряются минутами дуги, при этом наблюдается хорошее согласие углов поворота вокруг осей  $y$  и  $z$  для систем Gal(2MASS), Gal(NSPEC) и Gal(AK-WI) в противовес сильному различию значений угла поворота вокруг оси  $x$ . Все это говорит о том, что для построения новой стандартной Галактической системы координат требуется дальнейшая работа, однако уже сейчас можно сказать, что ориентация осей стандартной системы, основанной на параметрах (5), установлена не на секундном, а минутном уровне точности.

### 3. Систематические разности положений в галактической системе координат

Систематические разности галактических долгот и широт вида XPM-UCAC4 были получены в виде разложений по векторным сферическим функциям с учетом уравнения блеска. Описание алгоритма дано в статье [1]. Эти разности можно использовать для анализа взаимной ориентации Галактических систем отсчета, реализуемых каталогами XPM и UCAC4. Как было сказано выше, углы поворота осей систем координат, реализуемых нашими каталогами, определяются через тороидальные коэффициенты первого порядка разложения по ВСФ разностей координат звезд. Зависимость этих компонент от блеска звезд показана на рис. 2. Здесь мы видим, что для совмещения с системой XPM углы поворота системы UCAC4 вокруг оси  $OY$  зависят от яркости звезд и заключены в пределах

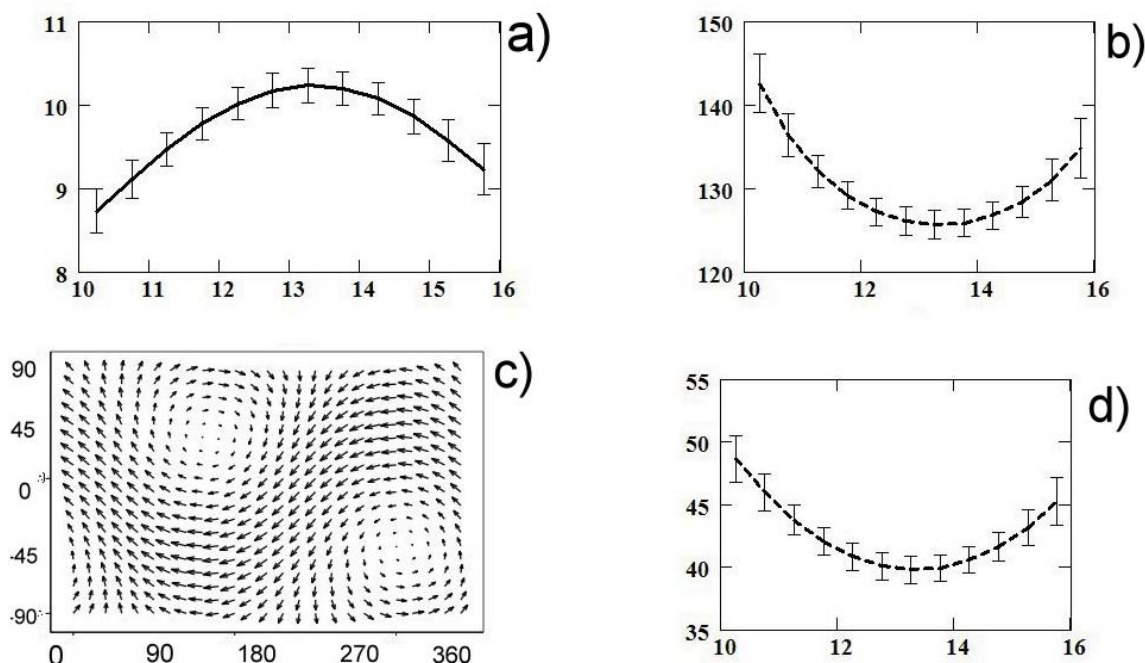
$$(6.39 \pm 0.26) \text{ мсд} \leq \varepsilon_y \leq (3.51 \pm 0.55) \text{ мсд}.$$



**Рис. 2.** Углы взаимной ориентации галактических систем отсчета каталогов XPM и UCAC4 в мсд. По горизонтальным осям отложены звездные величины выборок в полосе J.

Зависимость от блеска этого угла приводит к изменению координат полюса взаимного вращения, как это показано на рис. 3. Углы поворота вокруг осей OX и OY не зависят от яркости звезд и равны:

$$\varepsilon_x = -4.58 \pm 0.16 \text{ мсд}, \quad \varepsilon_z = 6.55 \pm 0.16 \text{ мсд}.$$



**Рис. 3.** а) Значения углов (мсд) поворота галактической системы отсчета каталога UCAC4 относительно XPM вокруг полюса, долготы и широты которого для звезд различной яркости показаны в боксах b) и d). Векторная карта в координатах (l,b), соответствующая повороту вокруг полюса для  $J = 15$  m, показана в боксе c). В боксах a, b, d по горизонтальным осям отложены звездные величины выборок в полосе J.

### Заключение

Учитывая то, что фиксация направления осей стандартной Галактической системы координат произведена с точностью до нескольких минут дуги, можно сказать, что ориентация осей стандартной Галактической системы координат, реализуемых каталогами XPM и UCAC4, практически совпадает, так как найденные различия (хотя и имеют высокую статистическую надежность) оказались существенно меньше точности ориентации самой стандартной системы отсчета.

Работа выполнена при поддержке гранта СПбГУ 6.37.343.2015.

### Литература

1. Витязев В.В., Цветков А.С. Систематические разности положений и собственных движений звезд каталогов PPMXL и UCAC4 // Письма в АЖ, 2015, т. 41, № 7, 350–366; [V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov, Astron. Lett. 41, 317 (2015)].
2. Blaauw, A., Gum, C.S., Pawsey, J.L., Westerhout, G. The new I.A.U. system of galactic coordinates (1958 revision, MNRAS, 121, (1960).
3. P.-J.Ding, J.-C. Liu, and Zi Zhu. Galactic coordinate system based on multi-wavelength catalogues. Proceedings of the Journées 2014 "Systemes de reference spatio-temporels", Z. Malkin and N. Capitaine (eds), Pulkovo observatory, 32, (2015).
4. P.N. Fedorov et al. The XPM Catalogue: absolute proper motions of 280 million stars // Mon. Not. R. Astron. Soc. 393, 133 (2009).

5. *K.M. Gorski, E. Hivon, A.J. Banday et al.* HEALPix: A Framework for High-Resolution Discretization and Fast Analysis of Data Distributed on the Sphere // *Astrophys. J.* v. 622, p.759, (2005).
6. *J.-C. Liu, Z. Zhu, and H. Zhang.* Reconsidering the Galactic coordinate system // *Astronomy and Astrophysics.* 526, A16, (2011a).
7. *J.-C. Liu, Z. Zhu, and B. Hu.* Constructing a Galactic coordinate system based on near-infrared and radio catalogs // *Astronomy and Astrophysics.* 536, A102, (2011b).
8. *Murakami, H., Baba, H., Barthel, P., et al.* The Infrared Astronomical Mission AKARI // *PASJ*, 59, 369, (2007).
9. *Wright, Edward L. Peter R. M. Eisenhardt, Amy K. Mainzer, et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *The Astronomical Journal*, 140, 1868–1881, (2010).
10. *Skrutskie, M.F., and 30 colleagues.* The Two Micron All Sky Survey (2MASS) // *The Astronomical Journal* 131, 1163–1183, (2006).
11. *V.V. Vityazev, A.S. Tsvetkov.* Intercomparison of kinematics derived from catalogues UCAC4, PPMXL and XPM with vector spherical harmonics // *MNRAS* 442, pp. 1249–1264, (2014).
12. *Vollmer, B., Gassmann, B., Derriere, S., et al.* Reconsidering the Galactic coordinate system (SPECFIND v.2.0 // *Astronomy and Astrophysics.* 511, A53, (2010).
13. *N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, A. Henden, J.L. Bartlett, D.G. Monet, and M.I. Zacharias.* The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4) // *Astron. J.* 145, 44 (2013).

## **A COMPARISON OF GALACTIC COORDINATE SYSTEMS XPM AND UCAC4**

**Vityazev V.V., Tsvetkov A.S.**

*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

Three versions of possible new Galactic coordinate systems based on modern catalogues *2MASS*, *SPECFIND*, *AKARI*, *WISE* have been compared with the standard one. It was shown that the standard system is oriented in space with accuracy not better than several arcminutes. The comparison of the XPM and UCAC4 catalogues based on more than 40 million common stars in the Galactic coordinate system is presented. The systematic differences between positions and proper motions in 12 J-magnitude bins in the range 10.25–15.75 mag. were expressed by decompositions on the vector spherical harmonics. An analytical method to describe the magnitude equation was used. A new statistical criterion adapted to the HealPix data pixelization to determine the significance of all the accessible harmonics is proposed to extract signal from noise. It was found that the mutual orientation of the XPM and UCAC4 Galactic frames is in the range of several mas.