

УДК 524.62-32

С. П. Рыбка

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

Кинематические параметры звезд по данным сводного каталога GPM в областях неба с галактиками

Из анализа абсолютных собственных движений 44 425 звезд каталога GPM с известными показателями цвета $B - V$ определены компоненты движения Солнца по шести группам звезд с различным блеском, а также параметры галактического вращения. Использован метод представления собственных движений системой ортогонализированных функций галактических координат звезд в рамках трехмерной модели Огородникова—Милна. Обнаружены различия в значениях постоянных Оорта для двух выборок звезд с цветами $B - V < 0.55^m$ и $B - V > 0.55^m$. Показано, что собственным движениям первой выборки свойственно дополнительное деформационное смещение в плоскости Галактики, которое составляет $-0.0030 \pm 0.0005''/\text{год}$.

КІНЕМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗІР ЗА ДАНИМИ ЗВЕДЕНОГО КАТАЛОГУ GPM У ДІЛЯНКАХ НЕБА З ГАЛАКТИКАМИ, Рыбка С. П. — На основі аналізу абсолютних власних рухів 44425 зірок зведеного каталогу GPM з відомими показниками кольору $B - V$ визначено складові руху Сонця за шістьма групами зірок з різним блиском, а також параметри обертання Галактики. Використовувався метод зображення власних рухів системами ортогоналізованих функцій галактичних координат зір у межах тривимірної моделі Огородникова—Мілна. Знайдено розбіжності між сталими Оорта для зір з кольорами $B - V < 0.55^m$ та $B - V > 0.55^m$. Показано також, що власним рухам першої сукупності властиве додаткове деформаційне зміщення у площині Галактики, яке дорівнює $-0.0030 \pm 0.0005''/\text{рік}$.

KINEMATIC PARAMETERS OF STARS FROM THE GPM DATA IN SKY REGIONS WITH GALAXIES, by Rybka S. P. — The kinematics of the GPM stars with known $B - V$ colors was studied with the Ogorodnikov—Milne model of a three-dimensional differential velocity field. The technique based on the representation of proper motions by means of orthogonal functions was used to derive the parameters of the model. It was found that two samples of stars with $B - V < 0.55^m$ and $B - V > 0.55^m$ have different values of the Oort constants. In addition, a differential deformation of -0.0030 ± 0.0005 arcsec per year parallel to the galactic plane was detected for the first star sample.

ВВЕДЕНИЕ

Авторы многочисленных работ, например [5—7], посвященных изучению кинематики звезд в рамках трехмерной модели Огородникова—Милна, обнаружили существенные отклонения от плоской модели вращения Галактики. Несомненно, такие исследования необходимо выполнять по данным каждого нового каталога собственных движений звезд, полученных в невращающейся системе координат с достаточной точностью. Собственные движения 52805 звезд от 8^m до 16^m , которые определены относительно галактик и содержатся в сводном каталоге GPM [4], можно рассматривать как удовлетворяющие этим условиям. Во-первых, они получены в квазиинерциальной системе координат и должны быть свободными от ошибок прецессии, которые искажают оценки реального галактического вращения звезд. Так, если собственные движения получены в системе координат, обладающей остаточным вращением, можно определить только одну из трех составляющих твердотельного вращения Галактики (постоянную Оорта V), а две других приходится полагать равными нулю. Таким образом, появляется возможность провести анализ собственных движений звезд GPM на основе полной трехмерной модели вращения Галактики Огородникова—Милна [3]. Во-вторых, собственные движения в GPM найдены с точностью $0.008''/\text{год}$, что является достаточным для определения ожидаемых кинематических параметров порядка $0.001''/\text{год}$ по всей совокупности звезд этого каталога. Помимо этого, имеющиеся в каталоге показатели цвета $B - V$ позволяют распределить звезды по присущим им физическим признакам и изучить особенности их движения.

Традиционный способ решения уравнений, составленных для вычисления кинематических параметров по собственным движениям GPM, а именно метод наименьших квадратов (МНК), затрудняет определение статистической значимости оценок искомых неизвестных. Причина этого объясняется неравномерным распределением звезд по небу и ограниченностью зоны задания каталога, что приводит к плохой обусловленности системы уравнений. Так, сводный каталог содержит данные севернее -25° по склонению вне области Млечного Пути. В связи с этим анализ собственных движений звезд GPM проводился другим методом, который позволяет проверить соответствие исследуемой модели наблюдательным данным. Главные его положения базируются на выводах и рекомендациях работы [2], выполненной для изучения систематических разностей положений звезд при помощи ортогональных функций. Кроме того, использована основная идея работы [1], в которой для представления систематической части собственных движений также применяются ортогональные функции координат звезд. Более детальное описание этого метода ортогонализации, именуемого далее МО, приводится ниже.

УСЛОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Исследование движений звезд в небольшом объеме пространства основывается на гидродинамической модели первого порядка. Она предложена впервые Огородниковым [3], а впоследствии развита Милном. Согласно этой модели систематическая часть скорости центроидов звезд в окрестности Солнца представляется в виде суммы скорости твердотельного вращения, скорости деформации и скорости отраженного движения Солнца. В прямоугольной галактической системе координат матрица вращения содержит три независимых элемента (W_{21} , W_{13} , W_{32}), матрица деформации — шесть (M_{12} , M_{13} , M_{23} , M_{11} , M_{22} , M_{33}), а движение Солнца включает три составля-

ющих (X, Y, Z) . Из анализа собственных движений можно найти лишь две комбинации трех диагональных элементов матрицы деформации, описывающих пространственное расширение или сжатие. В этом случае используемые уравнения содержат 11 неизвестных:

$$\begin{aligned} \mu_l \cos b = X \sin l - Y \cos l + Q \cos b + P \cos 2l \cos b - C \sin 2l \cos b - \\ - 2N \sin l \sin b - 2D \cos l \sin b, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \mu_b = X \cos l \sin b + Y \sin l \sin b - Z \cos b - 0.5P \sin 2l \sin 2b - \\ - 0.5C \cos 2l \sin 2b - 0.5(K - H) \sin 2b - 2N \cos l \sin^2 b + \\ + 2D \sin l \sin^2 b - 2S \cos l \cos^2 b + 2R \sin l \cos^2 b, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\mu_l \cos b$ и μ_b — компоненты собственных движений по галактической долготе l и широте b ; $P = M_{12}$ и $Q = W_{21}$ — постоянные Оорта; $C = 0.5(M_{11} - M_{22})$, $K - H = 0.5(M_{11} + M_{22}) - M_{33}$, $N = 0.5(W_{13} + M_{13})$, $D = 0.5(W_{32} - M_{23})$, $S = 0.5(W_{13} - M_{13})$ и $R = 0.5(W_{32} + M_{23})$ — остальные кинематические параметры. Представление неизвестных N, D, S, R , в уравнениях (1) и (2) суммой или разностью соответствующих элементов матриц твердотельного вращения и местной деформации вызвано тем, что эти элементы не разделяются в первом уравнении. Следует заметить, что в плоской модели Оорта—Линдблада $C = K - H = N = D = S = R = 0$.

Обычно оценки неизвестных находят из совместного решения уравнений (1) и (2) МНК, а условные уравнения составляются для отдельных групп звезд, различие блеска которых не превышает 1^m . Последнее выполняется, чтобы уменьшить дисперсию расстояний. Однако есть возможность получить решение этих уравнений для всех групп звезд одновременно, если ввести для каждой из них неизвестные X_j, Y_j, Z_j , где $j = 1, 2, \dots, k$, а k — количество таких групп. Несмотря на увеличение количества неизвестных, а оно составляет $(3k + 8)$, можно ожидать повышения точности определения параметров вращения Галактики, так как решение будет выполняться по значительно большему числу уравнений.

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗД

Обычно после решения уравнений (1) и (2) возникает задача определения значимости найденных оценок неизвестных. Как уже упоминалось выше, это довольно трудно выполнить из-за появления значительных корреляций между неизвестными, если используется МНК для неравномерного распределения звезд по небу. Для решения поставленной задачи будем применять метод ортогонализации. Он основан на представлении собственных движений рядом специальных ортогональных функций координат звезд [1]. В силу ортогональности таких функций обеспечивается независимое определение неизвестных, и с некоторой вероятностью можно отделить совокупность систематических от случайных составляющих. Кроме того, используются только те систематические компоненты, которые вносят существенный на принятом уровне значимости вклад в общее движение звезд. Для исследования собственных движений применяется формальная модель, построенная на системе ортогональных функций, например сферических [1]. Поэтому, коэффициенты такого разложения не соответствуют параметрам физической модели (1) и (2), но между ними можно установить связь. Таким образом, необходимо выполнить дополнительные вычисления, чтобы найти значения кинематических параметров. Нам удалось избежать введе-

ния этого промежуточного этапа путем непосредственного представления собственных движений рядом ортогонализованных функций физической модели. Они получены из исходных функций уравнений (1) и (2) методом ортогонализации Грама—Шмидта. В результате такой процедуры создается искусственное равномерное распределение звезд и неизвестные не коррелируют между собой, что позволяет найти их значения по формулам [2]. Затем при помощи статистических критериев оценивается вклад каждого члена разложения в совокупное систематическое движение звезд и решается вопрос об его значимости. Для этого используется v^2 -критерий, который основан на сравнении двух независимых оценок дисперсии остаточных уклонений: одна вычисляется в предположении, что данное неизвестное имеет нулевое значение, а другая — после учета предыдущего члена. Если отношение этих дисперсий v^2 больше α -%-й точки распределения Фишера, то такое предположение не соответствует действительности и исследуемый член является значимым. В любом случае, степень значимости всех членов характеризуется значением v^2 . В дальнейшем найденные в ортогональном базисе неизвестные преобразуются в исходные их значения по методике, подробно описанной в работе [2]. Последние соответствуют реальному распределению звезд в исследуемом каталоге. Следует заметить, что оба способа решения уравнений дают совершенно идентичные результаты, если уровень значимости искомых кинематических параметров звезд в МО положить равным нулю. В противном случае, когда этот уровень принимается во внимание, метод ортогонализации имеет преимущество в том, что определяются только значимые, т. е. существенные кинематические эффекты. В итоге повышается надежность решения и появляется возможность оценить реальность обнаруженной систематической части движения звезд.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Применяя все вышеизложенное к собственным движениям звезд сводного каталога, мы выполнили несколько вариантов решений уравнений (1) и (2) МО. Условные уравнения составлялись следующим образом. В каждой площадке все звезды с собственными движениями менее $0.1''/\text{год}$ и известными показателями цвета $B - V$ разбивались на шесть групп по блеску:

$$\begin{array}{lll} \text{I} — \text{ярче } 10.5^m, & \text{II} (10.6^m — 11.5^m), & \text{III} (11.6^m — 12.5^m), \\ \text{IV} (12.6^m — 13.5^m), & \text{V} (13.6^m — 14.5^m), & \text{VI} — \text{слабее } 14.6^m. \end{array}$$

Если в группу попадало три и больше звезд, вычислялись средние значения галактических координат и двух компонентов собственных движений $\mu_1 \cos b$ и μ_b . В конечном итоге получилось 1080 групп. Средние оценки координат и собственных движений были использованы для составления уравнений вида (1) и (2) с 26 неизвестными: 18 из них являются компонентами движения Солнца для шести групп звезд по блеску, а восемь — параметрами вращения Галактики. Кроме этого, звезды также распределены на две части по величине показателей цвета: $B - V < 0.55^m$ и $B - V > 0.55^m$. В связи с четкой зависимостью между показателями цвета и спектральными характеристиками можно полагать, что в первую выборку входят звезды более ранних $B - G$, а во вторую — более поздних спектральных классов $K - M$.

Условные уравнения решались методом ортогонализации при уровне значимости 5 %, которому соответствует критическое значение $v^2 = 6.7$, а также для сравнения использовался МНК. Результаты решения уравнений двумя методами Q , P , C , $K - H$, N , D , S , R и их средние квадратичные ошибки ε представлены в табл. 1. Приведены лишь значимые параметры,

Таблица 1. Параметры вращения Галактики и их средние квадратичные ошибки, найденные двумя методами для групп звезд с разными показателями цвета (в $0.0001''/\text{год}$)

Параметры	Для всех 44425 звезд		Для 22510 звезд $B - V > 0.55^m$		Для 21915 звезд $B - V < 0.55^m$	
	МО	МНК	МО	МНК	МО	МНК
Q	-17 ± 4	$-12^* \pm 4$	-12 ± 5	$-10^* \pm 5$	-22 ± 5	$-16^* \pm 5$
P	18 ± 5	$16^* \pm 5$	16 ± 6	$13^* \pm 6$	25 ± 6	$24^* \pm 6$
C	-18 ± 4	$-11^* \pm 5$	—	-7 ± 6	-30 ± 5	$-22^* \pm 6$
$K-H$	—	7 ± 8	—	10 ± 9	—	2 ± 9
N	—	-5 ± 2	—	-5 ± 3	—	-4 ± 3
D	—	3 ± 3	—	2 ± 3	—	6 ± 3
S	—	-7 ± 4	—	$-10^* \pm 5$	—	-6 ± 5
R	—	7 ± 4	—	1 ± 4	—	$11^* \pm 4$

Примечание: звездочкой отмечены значимые параметры, полученные МНК

Таблица 2. Галактические координаты апекса движения Солнца L_0 , D_0 и вековые параллаксы звезд h/ρ

Группа звезд	Для всех звезд			Для звезд $B - V > 0.55^m$			Для звезд $B - V < 0.55^m$		
	L_0 , град	D_0 , град	h/ρ , $0.0001''/\text{год}$	L_0 , град	D_0 , град	h/ρ , $0.0001''/\text{год}$	L_0 , град	D_0 , град	h/ρ , $0.0001''/\text{год}$
I	62 ± 2	17 ± 3	183 ± 8	69 ± 3	20 ± 4	204 ± 10	54 ± 3	15 ± 3	193 ± 10
II	64 ± 2	12 ± 3	166 ± 7	71 ± 3	12 ± 3	178 ± 9	52 ± 5	22 ± 6	128 ± 10
III	68 ± 3	12 ± 3	150 ± 7	71 ± 3	12 ± 4	147 ± 9	66 ± 4	13 ± 5	134 ± 9
IV	71 ± 3	9 ± 4	125 ± 7	73 ± 4	9 ± 5	129 ± 9	62 ± 4	7 ± 5	110 ± 9
V	69 ± 3	10 ± 4	116 ± 5	72 ± 4	9 ± 5	118 ± 9	65 ± 4	10 ± 5	110 ± 8
VI	76 ± 4	10 ± 5	98 ± 7	79 ± 5	12 ± 6	103 ± 9	74 ± 5	9 ± 6	92 ± 8

полученные МО при уровне значимости 5 %, а значимые на таком же уровне параметры, вычисленные МНК, помечены звездочкой. Из сравнения приведенных данных можно сделать следующие выводы. Во-первых, когда искомые параметры оказываются значимыми в обоих методах, их значения близки между собой (Q , P и C). Во-вторых, только в МНК есть дополнительные значимые неизвестные (S для $B - V > 0.55^m$ и R для $B - V < 0.55^m$). Маловероятно, что кинематические эффекты, соответствующие S и R , действительно имеют место. Вследствие имеющейся корреляции в МНК происходит перераспределение значений между неизвестными, и в результате некоторые из них могут стать значимыми, не являясь таковыми на самом деле. Ведь при помощи метода ортогонализации, который дает независимое определение неизвестных, аналогичные эффекты не обнаруживаются. Поэтому для получения более надежных оценок кинематических параметров звезд в нашей работе использовался МО.

В табл. 2 приведены вычисленные по X_j , Y_j , Z_j положения апекса движения Солнца L_0 , D_0 в галактической системе координат и вековые параллаксы h/ρ , полученные МО.

Следует отметить, что компоненты движения Солнца X_j , Y_j , Z_j определяются надежно. Так, соответствующие им значения v^2 на порядок выше, чем для остальных неизвестных. Этот вывод имеет не только статистический смысл, но и находит реальное объяснение. Известно, что движение Солнца отражается на видимых перемещениях звезд гораздо больше галактического вращения. Постоянные Оорта Q и P оказались значимыми во всех

вариантах решений при среднем $v^2 = 17$. Что касается результатов определения других параметров модели Огородникова—Милна, то только один из них C , характеризующий эффект дифференциальной деформации, обнаруживается в собственных движениях звезд с показателями цвета $B - V < 0.55^m$ при $v^2 = 18$. Необходимо заметить, что для этой же выборки значения постоянных Оорта больше, чем для звезд с $B - V > 0.55^m$ (см. табл. 1).

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Величины Q и P из табл. 1 можно преобразовать в постоянные Оорта $B = 4740Q$ и $A = 4740P$, выраженные в единицах $\text{км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$:

- а) для всех звезд $B = -8.0 \pm 1.9$, $A = 8.5 \pm 2.4$;
- б) для звезд $B - V > 0.55^m$ $B = -5.7 \pm 2.4$, $A = 7.6 \pm 2.8$;
- в) для звезд $B - V < 0.55^m$ $B = -10.4 \pm 2.4$, $A = 11.8 \pm 2.8$.

Из приведенных выше данных только последние оценки близки к их стандартным значениям $B = -12.0 \pm 2.8$ и $A = 14.4 \pm 1.2 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ [9]. Кроме того, они хорошо согласуются с величинами, найденными Хенсоном по собственным движениям слабых звезд 16^m Ликского каталога $B = -13.9 \pm 0.9$ и $A = 11.3 \pm 1.0 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ [8], а также Бобылевым по данным каталога HIPPARCOS $B = -12.94 \pm 0.39$ и $A = 11.54 \pm 0.54 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{кпк}^{-1}$ [6]. Напротив, для всех звезд с известными показателями цвета и для звезд с $B - V > 0.55^m$ наблюдаются заметные расхождения полученных постоянных Оорта с вышеприведенными значениями. Поэтому можно предположить, что они вызваны особенностями реального движения звезд поздних спектральных классов $K-M$ в общей совокупности звезд. Так, согласно современным представлениям о вращении Галактики даже в «оортовских окрестностях» Солнца (т. е. в пределах 1—1.5 кпк от Солнца), величины A и B могут иметь разные значения для различных по своим физическим характеристикам звезд.

Из табл. 1 видно, что в собственных движениях звезд с $B - V < 0.55^m$ уверенно обнаруживается дифференциальная деформация поля скоростей $C = -0.0030 \pm 0.0005''/\text{год}$. Это свидетельствует об отклонении движения звезд ранних спектральных классов от модели Оорта—Линдблада. Оценка параметра C подтверждается данными других авторов. Так, Дюмон [7], применяя модель Огородникова—Милна к собственным движениям звезд FK4, в одном из решений получил $C = -0.0022 \pm 0.0008''/\text{год}$, а Астериадис [5] по звездам AGK3 — $C = -0.0030 \pm 0.0002''/\text{год}$. Однако имеются работы [6], где подобный эффект не обнаружен, а приведены доказательства существования других отклонений от модели Оорта—Линдблада.

Если рассматривать координаты апекса движения Солнца и вековые параллаксы звезд (см. табл. 2), то эти данные соответствуют выводам классических исследований. А именно, с увеличением видимой звездной величины апекса смещается в сторону галактического вращения ($l = 90^\circ$ и $b = 0^\circ$), а вековые параллаксы уменьшаются.

ВЫВОДЫ

Используя метод представления кинематических компонент в собственных движениях звезд рядом ортогонализированных функций модели Огородникова—Милна показано, что вся совокупность исследуемых в каталоге GPM

звезд не является однородной по своим кинематическим свойствам и разделяется по крайней мере на две части в зависимости от показателей цвета, а следовательно, и от спектральных классов. Во-первых, вращение звезд спектральных классов $B-G$ вокруг центра Галактики с постоянными Оорта $Q = -0.0022 \pm 0.0005$ и $P = 0.0025 \pm 0.0006''/\text{год}$ совмещается с деформацией C , которая составляет $-0.0030 \pm 0.0005''/\text{год}$. При этом оценки Q и P согласуются со стандартными значениями. Во-вторых, у звезд спектральных классов $K-M$ эффект деформации не проявляется, однако полученные для них константы $Q = -0.0012 \pm 0.0005$ и $P = 0.0016 \pm 0.0006''/\text{год}$ заметно отличаются от стандартных.

1. Витязев В. В. Исследование собственных движений звезд с помощью сферических функций // Кинематика и физика небес. тел.—1990.—6, № 3.—С. 22—29.
2. Зверев М. С., Курьянова А. Н., Положенцев Д. Д., Яцкив Я. С. Сводный каталог фундаментальных слабых звезд со склонениями от $+90^\circ$ до -20° (ПФКСЗ-2). — Киев: Наук. думка, 1980.—112 с.
3. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем. — М.: Физматгиз, 1958.—627 с.
4. Рыбка С. П., Яценко А. И. GPM — сводный каталог абсолютных собственных движений звезд в избранных площадках неба с галактиками // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 5.—С. 70—74.
5. Asteriadis G. Determination of precession and galactic rotation from proper motion of the AGK3 // Astron. and Astrophys.—1977.—56, N 1-2.—P. 25—38.
6. Bobylev V. V. How inertial is the Hipparcos catalogue? // Proc. Journess 1999 “Motion of celestial bodies, Astrometry and Astronomical Reference Frames” / Eds. M. Soffel, N. Capitaine. — Paris: Paris observ. publ., 2000.—P. 11—13.
7. du Mont B. A three-dimensional analysis of kinematics of FK4/FK4 Sup // Astron. and Astrophys.—1978.—66, N 3.—P. 441—451.
8. Hanson R. B. Lick Northern Proper Motion Program. II. Solar Motion and Galactic Rotation // Astron. J.—1987.—94, N 2.—P. 409—415.
9. Kerr F. J., Lynden-Bell D. Review of galactic constants // Mon. Notic. Roy. Astron. Sos.—1986.—221, N 4.—P. 1023-1038.

Поступила в редакцию 12.12.01