

УДК 524.3—325.2

## Определение апекса Солнца и галактического вращения по собственным движениям слабых звезд в площадках с галактиками

С. П. Рыбка

Совокупность слабых звезд ( $13.0^m$ — $14.5^m$ ) в 30 площадках неба с галактиками ( $|b| > 30^\circ$ ) разделена методом максимума правдоподобия на две группы по расстоянию и, возможно, по классу светимости. Положение апекса Солнца и параметр галактического вращения  $Q$ , найденные по собственным движениям этих групп звезд, существенно различаются. Применение трехмерной модели вращения Галактики Огородникова-Милна показало, что движение далеких звезд отличается от модели Оорта-Линдблада.

*SOLAR MOTION AND GALACTIC ROTATION OBTAINED FROM THE PROPER MOTIONS OF FAINT STARS IN THE AREAS WITH GALAXIES, by Rybka S. P.*—The maximum likelyhood method is used to divide 2463 faint stars in 30 areas with galaxies into two groups at different distances. The Ogorodnikov—Milne model of a three-dimensional differential centroid velocity field is applied to the proper motions of these stars. The kinematics of distant stars ( $\sim 1700$  pc) is shown to have departures from Oort-Lindblad model.

В связи с планом создания Каталога слабых звезд в ГАО АН УССР ведется работа по фотографированию снимков вторых эпох площадок с галактиками и определению собственных движений звезд относительно этих объектов. В настоящее время автором составлен каталог собственных движений  $\sim 4000$  звезд относительно 92 галактик в 30 площадках неба на галактических широтах  $|b| > 30^\circ$ . Четвертая часть этого каталога опубликована ранее [6]. Список координат центров площадок, исследуемых в данной работе, приведен в табл. 1. Собственные движения звезд определены в среднем по 1.5 парам пластинок со средней разностью эпох 22.0 года. Внутренняя точность одного относительного собственного движения звезды  $14^m$  составляет  $\pm 0.006''$  в год.

Блеск звезд определялся по измеренным диаметрам их изображений. Стандартными служили звездные величины звезд AGK3 или SAO. Для распространения зависимости диаметр — звездная величина на более слабые звезды использовалась короткая  $5^m$  экспозиция, которая обычно делается наряду с главной часовой при фотографировании площадок неба с галактиками. Средняя квадратичная ошибка определения блеска звезд в каталоге составляет  $\pm 0.3^m$ .

Редукции абсолютизации относительных собственных движений звезд находились по галактикам. Чтобы повысить точность и надежность определения редукций, значения их вычислялись как средние с противоположным знаком «собственные движения» совокупности галактик близких по координатам площадок. Точность определения редукций в этом случае повышается примерно в два раза и составляет в среднем  $\pm 0.003''$  в год [7]. Объединение площадок в более обширные области производилось после предварительного анализа ожидаемых паралактических движений опорных звезд в отдельных площадках и величины эффекта галактического вращения. Для этого использовались таблицы [3], полученные по данным Биннендайка. Расхождения в движении опорных звезд центра области и отдельных площадок, вхо-

дящих в данную область, не превышали  $0.001''$  в год. Такие расхождения можно считать допустимыми, поскольку их величина в три раза меньше ошибок определения редуций. Голосеевский каталог создан с целью определения параметров галактического вращения и компонент солнечного движения по собственным движениям звезд на средних и высоких галактических широтах. Обычно галактическое вращение исследуется на основании движения звезд вблизи плоскости Галактики, где его влияние наиболее заметно. Здесь преобладают объекты плоской составляющей, в основном, звезды высокой светимости, для которых можно определить пространственные скорости до расстояния  $2-2.5$  кпс, что существенно при исследовании галактического вращения. На высоких галактических широтах увеличивается относительная численность звезд промежуточной и сферической составляющих, поэтому представляет интерес изучение кинематики расположенных здесь звезд [4].

Таблица 1. Сведения об исследуемых площадках

Номер области	Номер площадки	$\alpha_{1950}$	$\delta_{1950}$	$l$	$b$	Количество галактик в области
1	3	$0^h 26.7^m$	$+2^{\circ} 33'$	112°	-60°	8
	6	0 41.9	-1 54	119	-64	
	152	23 15.4	-4 56	74	-58	
	205	23 37.0	-12 55	70	-68	
2	11	1 20.9	+9 01	136	-53	2
	17	2 02.6	+10 46	150	-48	
3	46	8 46.6	+19 16	207	+34	5
	56	9 19.3	+34 24	190	+45	
4	65	10 11.1	+3 40	238	+46	8
	73	10 45.2	+12 52	233	+58	
	76	11 03.2	+0 14	256	+53	
5	92	12 17.4	+29 53	191	+83	18
	96	12 24.5	+13 14	280	+75	
	105	13 06.8	+29 35	63	+86	
	109	13 26.8	+17 20	346	+77	
6	110	13 27.7	+47 28	105	+68	16
	113	13 51.3	+40 32	83	+72	
7	116	14 03.0	+55 08	102	+59	8
	126	15 08.5	+57 12	93	+51	
	129	15 38.6	+59 29	93	+47	
8	117	14 14.4	+11 02	358	+64	8
	124	14 59.4	+1 45	359	+50	
	128	15 34.7	+12 10	20	+48	
9	133	16 41.4	+36 56	60	+40	1
10	132	16 34.9	+78 19	111	+33	2
	134	17 11.1	+72 22	104	+33	
11	150	22 58.6	+15 50	88	-39	5
12	153	23 17.8	+ 8 00	88	-48	11
	155	23 26.2	+ 3 15	87	-53	
	156	23 41.7	+10 05	97	-49	

Для этой цели использовалась трехмерная модель вращения Галактики Огородникова-Милна [5]. За последнее десятилетие появился целый ряд работ [1, 2, 10, 11, 12, 13], где приводятся результаты определения кинематических параметров этой модели. Так, Клабе [10, 11] применил метод Огородникова-Милна, анализируя собственные движе-

ния звезд FK4, AGK3 и Ликского каталогов. Он обнаружил значительные отклонения от модели Оорта-Линдблада. Дюмон [12] и Балакирев [1] по собственным движениям и лучевым скоростям звезд FK4 показали, что движение близких  $B$  звезд значительно отличается от общего поля скоростей.

Сущность метода Огородникова-Милна заключается в следующем. Предполагается, что с точностью до членов второго порядка по расстоянию звезд от Солнца  $r$  непрерывное поле их скоростей  $\vec{v}$  можно представить довольно общим образом [5, 11]:

$$\vec{v} = \vec{u} + Mr, \quad M = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $\vec{u}$  — отражение движения Солнца,  $u_i$ ,  $x_j$  — компоненты скорости и расстояния звезд вдоль трех основных осей галактической системы координат (ось  $x_1$  направлена в центр Галактики,  $x_2$  — в сторону галактического вращения,  $x_3$  — к северному полюсу Галактики). Матрица смещения  $M$  раскладывается на симметрическую  $M^+$  и антисимметрическую  $M^-$  матрицы

$$\vec{v} = \vec{u} + M^+\vec{r} + M^-\vec{r},$$

$$\left. \begin{matrix} M^+ \\ M^- \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \pm \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где  $M^+\vec{r}$  — скорость деформации центроида звезд,  $M^-\vec{r}$  — скорость его твердотельного вращения. Модель Оорта-Линдблада является частным случаем этой модели:  $M_{21}^- \equiv Q \equiv B/4.74$ ,  $M_{12}^+ \equiv P \equiv A/4.74$ , где  $B$ ,  $A$  — известные постоянные Оорта, а остальные элементы матриц  $M^+$  и  $M^-$  равны 0.

Кинематические параметры дифференциального поля скоростей звезд определяются по наблюдаемым их собственным движениям, полученным относительно галактик из уравнений [13]:

$$\begin{aligned} \mu_\alpha \cos \delta = \mu_x = & f(X \sin \alpha - Y \cos \alpha) + M_{21}^- \cos b \cos \varphi + \frac{1}{2} M_{11}^+ (\cos^2 l \sin 2b \times \\ & \times \sin \varphi - \sin 2l \cos b \cos \varphi) + M_{12}^+ \left( \cos 2l \cos b \cos \varphi + \frac{1}{2} \sin 2l \sin 2b \sin \varphi \right) - \\ & - M_{13}^+ (\cos l \cos 2b \sin \varphi + \sin l \sin b \cos \varphi) + \frac{1}{2} M_{22}^+ (\sin 2l \cos b \cos \varphi + \\ & + \sin^2 l \sin 2b \sin \varphi) + M_{23}^+ (\cos l \sin b \cos \varphi - \sin l \cos 2b \sin \varphi) - \\ & - \frac{1}{2} M_{33}^+ \sin 2b \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \mu_\delta = \mu_y = & f(X \cos \alpha \sin \delta + Y \sin \alpha \sin \delta - Z \cos \delta) + M_{21}^- \cos b \sin \varphi - \\ & - \frac{1}{2} M_{11}^+ (\sin 2l \cos b \sin \varphi + \cos^2 l \sin 2b \cos \varphi) + M_{12}^+ \left( \cos 2l \cos b \sin \varphi - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} \sin 2l \sin 2b \cos \varphi \right) + M_{13}^+ (\cos l \cos 2b \cos \varphi - \sin l \sin b \sin \varphi) + \\ & + \frac{1}{2} M_{22}^+ (\sin 2l \cos b \sin \varphi - \sin 2l \sin 2b \cos \varphi) + M_{23}^+ (\sin l \cos 2b \cos \varphi + \\ & + \cos l \sin b \sin \varphi) + \frac{1}{2} M_{33}^+ \sin 2b \cos \varphi, \end{aligned}$$

где  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  — компоненты собственного движения звезд в экваториальной системе координат  $\alpha$ ,  $\delta$ ;  $f$  — параллактический фактор, зависящий от расстояния до звезд;  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  — компоненты движения Солнца в прямоугольной экваториальной системе координат;  $\varphi$  — угол между направлениями на полюс мира и полюс Галактики;  $l$ ,  $b$  — галактические координаты звезд. Поскольку по собственным движениям невозможно получить абсолютные значения компонент пространственного расширения или сжатия  $M_{11}^+$ ,  $M_{22}^+$ ,  $M_{33}^+$ , одной из них произвольно присваивается нулевое значение, например  $M_{22}^+ = 0$ , и из уравнений (3) определяются разности  $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$  и  $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$ . Таким образом, уравнения (3) содержат 9 неизвестных:  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ,  $M_{21}^-$ ,  $M_{12}^+$ ,  $M_{13}^+$ ,  $M_{23}^+$ ,  $(M_{11}^+ - M_{22}^+)$ ,  $(M_{33}^+ - M_{22}^+)$ .

Необходимо отметить, что при анализе собственных движений звезд, определенных в какой-либо из фундаментальных систем координат, в эти уравнения вводятся добавочные члены из-за неточности принятого значения постоянной прецессии. Эти добавочные неизвестные могут сильно искажаться движениями звезд, перпендикулярными к галактической плоскости, если таковые имеются [2, 10]. Каталоги собственных движений звезд, определенных относительно галактик, лишены этого недостатка.

Искомые неизвестные компоненты движения Солнца и кинематические параметры поля скоростей звезд определялись из уравнений (3) по абсолютным собственным движениям слабых звезд. В их число были отобраны 2463 звезды ( $13.0^m - 14.5^m$ ) с движениями менее  $0.05''$  в год. Эта группа звезд каталога лучше всего подходит для решения поставленной задачи, так как она самая многочисленная. Кроме того, можно пренебречь влиянием ошибки уравнения блеска на собственные движения этих звезд. Выбранная группа звезд была разделена на две по расстоянию и, возможно, по классу светимости, а затем отдельно исследовались их кинематические характеристики. Для этого применялся метод максимума правдоподобия, подробно изложенный в [7, 9, 15]. Разделение звезд основывается на том, что общая функция распределения собственных движений звезд в узких интервалах звездных величин раскладывается на две с резко отличающимися параметрами, значения которых подбираются методом максимума правдоподобия. Одно распределение характеризует движения более далеких звезд, в основном, красных гигантов, второе — более близких звезд главной последовательности [9].

Чтобы повысить точность определения неизвестных параметров двух распределений — центров  $\mu_{x1}$ ,  $\mu_{y1}$  и  $\mu_{x2}$ ,  $\mu_{y2}$ , стандартов  $\sigma_{x1}$ ,  $\sigma_{y1}$  и  $\sigma_{x2}$ ,  $\sigma_{y2}$  — разделение звезд производилось не в отдельных площадках, а в более обширных областях, указанных в табл. 1. Результаты определения параметров распределений абсолютных собственных движений двух групп звезд в каждой из 12 областей неба приведены в табл. 2. Затем были вычислены параметры распределений абсолютных собственных движений каждой группы звезд в отдельных площадках. Значения этих параметров сравнивались с соответствующими параметрами областей в целом. Так как реальное движение опорных звезд в отдельных площадках может отличаться от среднестатистического, то такая процедура позволяет проверить правильность ранее выполненного объединения площадок в любой области [7]. Проверка с использованием статистических критериев показала, что расхождения параметров распределений движений звезд в отдельных площадках каждой области можно считать случайными на 5 %-ном уровне значимости.

Средние по площадкам собственные движения каждой группы звезд и всех звезд вместе использовались для определения компонент движения Солнца и параметров галактического вращения из решения уравнений (3) способом наименьших квадратов. Параллактический фактор  $f$  принимался равным 1, а также вводились веса, зависящие от

количества галактик в области и степени пригодности их для измерений. Выполнялось три варианта решений: 1) определялись три неизвестных компоненты движения Солнца, причем  $\mu_x$ ,  $\mu_y$  предварительно исправлялись за эффект галактического вращения при помощи постоянных Оорта  $P=0.0032''$ ,  $Q=-0.0021''$  в год; 2) находились компоненты движения Солнца и постоянные Оорта; 3) определялись все 9 искомым неизвестных. Результаты исследований приведены в табл. 3. Даны так-

Таблица 2. Параметры распределений абсолютных собственных движений двух групп звезд (в  $0,0001''$  в год)

Номер области	I группа звезд					II группа звезд				
	Количество звезд	$\bar{\mu}_{x1}$	$\bar{\mu}_{y1}$	$\sigma_{x1}$	$\sigma_{y1}$	Количество звезд	$\bar{\mu}_{x2}$	$\bar{\mu}_{y2}$	$\sigma_{x2}$	$\sigma_{y2}$
1	74	+37	+9	$\pm 77$	$\pm 46$	140	+15	-79	$\pm 204$	$\pm 156$
2	61	+34	-68	96	85	89	+145	-141	153	124
3	61	-14	0	70	63	88	-98	-109	165	157
4	83	-91	-47	98	77	81	-190	-149	195	172
5	144	-24	-33	96	79	185	-84	-144	234	196
6	135	-42	-19	82	79	71	-213	+50	180	195
7	112	-32	-2	76	71	126	-98	-42	196	190
8	148	+21	+13	86	61	113	-138	-33	127	168
9	68	-9	+21	69	88	41	-106	-35	163	203
10	94	-94	+56	51	62	158	-167	+178	119	175
11	82	+50	+3	81	76	93	+159	-49	179	113
12	83	-7	-9	72	63	133	+68	-60	170	152

Таблица 3. Результаты определения компонент движения Солнца и кинематических параметров поля скоростей звезд ( $A_{\odot}$  и  $D_{\odot}$  в градусах, остальные данные в  $0.0001''$  в год)

Параметры	I группа звезд			II группа звезд			Все звезды		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$A_{\odot}$	268 $\pm 8$	260 $\pm 13$	250 $\pm 14$	297 $\pm 7$	298 $\pm 8$	305 $\pm 9$	286 $\pm 7$	291 $\pm 6$	296 $\pm 6$
$D_{\odot}$	+9 $\pm 8$	+22 $\pm 9$	+11 $\pm 11$	+30 $\pm 5$	+31 $\pm 6$	+32 $\pm 7$	+24 $\pm 5$	+28 $\pm 5$	+31 $\pm 7$
$\rho$	44 $\pm 6$	40 $\pm 8$	42 $\pm 8$	162 $\pm 11$	158 $\pm 13$	175 $\pm 16$	98 $\pm 7$	97 $\pm 7$	101 $\pm 10$
$X$	-1 $\pm 10$	-6 $\pm 8$	-14 $\pm 11$	+63 $\pm 18$	+63 $\pm 19$	+86 $\pm 26$	+25 $\pm 10$	+31 $\pm 10$	+38 $\pm 10$
$Y$	-43 $\pm 6$	-34 $\pm 7$	-39 $\pm 7$	-124 $\pm 12$	-120 $\pm 13$	-121 $\pm 15$	-86 $\pm 7$	-80 $\pm 8$	-79 $\pm 9$
$Z$	+7 $\pm 6$	+14 $\pm 6$	+8 $\pm 8$	+82 $\pm 11$	+82 $\pm 13$	+92 $\pm 16$	+40 $\pm 7$	+45 $\pm 7$	+52 $\pm 10$
$Q$	-	+29 $\pm 11$	+30 $\pm 11$	-	-9 $\pm 20$	-10 $\pm 24$	-	+22 $\pm 13$	+29 $\pm 14$
$P$	-	+49 $\pm 12$	+61 $\pm 12$	-	+58 $\pm 23$	+47 $\pm 26$	-	+52 $\pm 14$	+50 $\pm 15$
$M_{13}^+$	-	-	+7 $\pm 7$	-	-	-15 $\pm 17$	-	-	-10 $\pm 8$
$M_{23}^+$	-	-	-8 $\pm 12$	-	-	+11 $\pm 27$	-	-	-1 $\pm 15$
$M_{11}^+ - M_{22}^+$	-	-	+48 $\pm 25$	-	-	-41 $\pm 57$	-	-	-14 $\pm 32$
$M_{33}^+ - M_{22}^+$	-	-	-18 $\pm 18$	-	-	-73 $\pm 46$	-	-	-29 $\pm 23$
$\sigma_0$	$\pm 31$	$\pm 27$	$\pm 25$	$\pm 55$	$\pm 55$	$\pm 55$	$\pm 34$	$\pm 32$	$\pm 32$

же экваториальные координаты апекса Солнца  $A_{\odot}$ ,  $D_{\odot}$  и вековые параллаксы  $\rho$ , найденные на основании  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ , и значения ошибок единиц веса  $\sigma_0$ . По значениям  $\rho$  для двух групп звезд были оценены их средние расстояния  $\bar{r}$ :

$$\bar{r} = \frac{a \cdot V_{\odot}}{4.74\rho}, \quad (4)$$

где  $a=2$ , а  $V_{\odot}=19.5$  км/сек — стандартная скорость Солнца. Оказалось, что I группа звезд находится на расстоянии  $\sim 1700$  пс, II — 500 пс. На основании данных, представленных в табл. 3, были сделаны следующие выводы.

1. Положение апекса Солнца относительно далеких звезд существенно отличается от того, которое было получено относительно более близких звезд. В то же время его положение относительно всех звезд хорошо согласуется с другими определениями. Например, по собственным движениям слабых звезд Пулковского каталога были получены следующие значения:  $A_{\odot} = 301^{\circ} \pm 6^{\circ}$ ,  $D_{\odot} = +32^{\circ} \pm 5^{\circ}$  [8].

2. Движение близких звезд может быть описано моделью Орта-Линдблада, тогда как движение далеких звезд отклоняется от этой модели: значение параметра  $Q$  существенно отличается от ортовского, матрица деформации  $M^+$  имеет значимый элемент  $(M_{11}^+ - M_{22}^+) = +0.0048'' \pm 0.0025''$  в год.

3. Значения  $P$  и  $Q$ , определенные по всем звездам, отличаются от приведенных в [8, 14], которые были получены по слабым звездам Пулковского и Ликского каталогов. Эти расхождения можно объяснить тем, что последние определения производились без исключения площадок вблизи галактического экватора, а также влиянием возможных систематических ошибок каталогов.

1. Балакирев А. Н. Исследование поля пространственных скоростей В-звезд.—Астрон. журн., 1978, 55, с. 708—712.
2. Балакирев А. Н. Кинематика звезд и определение поправок прецессии.—Астрон. журн., 1980, 57, с. 1102—1104.
3. Жуков Л. В. К вопросу о редукции относительных фотографических собственных движений к абсолютным.—Астрон. журн., 1966, 43, с. 1107—1110.
4. Каримова Д. К., Павловская Е. Д. О галактическом вращении центровдов различных объектов.—Астрон. журн., 1973, 50, с. 737—746.
5. Огородников К. Ф. Динамика звездных систем.—М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1958.—627 с.
6. Рыбка С. П. Каталог собственных движений звезд в избранных площадках неба с галактиками.—Киев, 1978.—Ч. I. 72 с.—Рукопись деп. в ВИНТИ 13.12.1978, № 3792—78 Деп.
7. Рыбка С. П. Исследование движения опорных звезд на высоких галактических широтах  $|b| > 45^{\circ}$ .—Кинематика и физика небесных тел. 1985, 1, № 1, с. 88—93.
8. Фатчихин Н. В. Вековые параллаксы звезд и скорость Солнца в пространстве по абсолютным собственным движениям 14600 звезд относительно галактик.—Астрон. журн., 1973, 50, с. 377—389.
9. Харченко Н. В. О разделении гигантов и звезд главной последовательности по абсолютным собственным движениям.—Астрометрия и астрофизика, 1980, вып. 40, с. 44—51.
10. Clube S. V. M. Galactic Rotation and the Precession constant.—Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 1972, 159, p. 289—314.
11. Clube S. V. M. Stellar kinematic and galactic research involving proper motion.—In: New problems in astrometry. Dordrecht: D. Reidel Publ. Company, 1974, p. 217—220.
12. du Mont B. A three-dimensional analysis of the kinematics of FK4/FK4 Sup.—Astron. and Astrophys., 1977, 61, p. 127—132.
13. 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.
14. Klemola A. R., Vasilevskis S. A study of Solar Motion and galactic Rotation.—Publ. Lick Observ., 1971, 22, part 3, p. 1—13.
15. Sanders W. L. An improved method for computing membership probabilities in open clusters.—Astron. and Astrophys., 1971, 14, p. 226—232.