# ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ ПО ОВ2-ЗВЕЗДАМ С СОБСТВЕННЫМИ ДВИЖЕНИЯМИ И ПАРАЛЛАКСАМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA EDR3

© 2022 г. В. В. Бобылев<sup>1, \*</sup>, А. Т. Байкова<sup>1, \*\*</sup>

<sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Россия

\*E-mail: vbobylev@gaoran.ru \*\*E-mail: bajkova@gaoran.ru Поступила в редакцию 15.11.2021 г. После доработки 07.12.2021 г. Принята к публикации 27.12.2021 г.

Проведен анализ кинематики OB2-звезд с собственными движениями и параллаксами, отобранными Сюем и др. из каталога Gaia EDR3. Причем относительные ошибки параллаксов для всех звезд этой выборки не превышают 10%. По выборке из 9750 звезд получены следующие значения компонентов групповой скорости  $(U, V, W)_{\odot} = (7.21, 7.46, 8.52) \pm (0.13, 0.20, 0.10)$  км/с и параметров угловой скорости вращения Галактики:  $\Omega_0 = 29.712 \pm 0.062$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -4.014 \pm 0.018$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.674 \pm 0.009$  км/с/кпк<sup>3</sup>. Круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики здесь составляет  $V_0 = 240.7 \pm 3.0$  км/с для принятого расстояния Солнца до галактического центра  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк. Показано, что влияние систематической поправки к тригонометрическим параллаксам каталога Gaia EDR3 с величиной  $\Delta \pi = -0.040$  mas не превышает уровня  $\sim 1\sigma$  ошибок искомых кинематических параметров модели. По собственным движениям OB-звезд определены следующие дисперсии остаточных скоростей ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) = (11.79, 9.66, 7.21)  $\pm (0.06, 0.05, 0.04)$  км/с. Показано, что первая ось этого эллипсоида слегка отклонена от направления на центр Галактики  $L_1 = 12.4 \pm 0.1^\circ$ , а третья ось направлена практически точно на северный полюс Галактики,  $B_3 = 83.7 \pm 0.1^\circ$ .

*Ключевые слова:* ОВ-звезды, кинематика, вращение Галактики **DOI:** 10.31857/S0004629922040016

#### 1. ВВЕДЕНИЕ

Звезды спектрального класса О и ранние В — это очень молодые (несколько млн. лет) массивные (более 10  $M_{\odot}$ ) звезды высокой светимости. Благодаря этим свойствам они представляют большое значение для изучения структуры и кинематики Галактики на различных масштабах.

С использованием OB-звезд изучают структуру и кинематику околосолнечной окрестности, где расположены молодые рассеянные звездные скопления [1], OB-ассоциации [2–4], пояс Гулда [5, 6] и Местный рукав [7].

Известно большое количество так называемых убегающих звезд. В основном это как раз OB-звезды, покинувшие с большими скоростями родительское скопление или ассоциацию [8–11].

Благодаря высокой светимости, OB-звезды видны с очень далеких от Солнца расстояний. По OB-звездам оцениваются спектрофотометрические расстояния с относительными ошибками 15–25% [12–14], которые вплоть до последнего времени служили основным источником расстояний до этих звезд. Многие О-звезды окружены компактными оболочками из ионизованного водорода, так называемыми зонами HII. Зоны HII и OB-звезды хорошо трассируют крупномасштабную структуру Галактики. Их, например, используют для изучения искривления тонкого диска [15, 16] или галактического спирального узора [7, 14, 16–19].

ОВ-звезды используются для определения параметров галактического вращения [3, 20–31]. Причем зачастую анализируются только их собственные движения, так как лучевые скорости одиночных ОВ-звезд измеряются с большими ошибками.

В рамках космического эксперимента Gaia [33] опубликована версия каталога Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3 [34]), в которой по сравнению с предыдущей версией, Gaia DR2 [35] уточнены примерно на 30% значения тригонометрических параллаксов и собственных движений для около 1.5 млрд. звезд. Тригонометрические параллаксы для примерно 500 млн. звезд измерены с ошибками менее 0.2 mas<sup>1</sup>. Для звезд со

звездными величинами  $G < 15^m$  случайные ошибки измерения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 mas/год, и они сильно возрастают у более слабых звезд. В целом собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%. Новых измерений лучевых скоростей в каталоге Gaia EDR3 нет.

В работе Сюя и др. [19] был представлен каталог 5772 звезд спектральных классов О-В2, в котором собственные движения и тригонометрические параллаксы звезд были взяты из каталога Gaia DR2. Кинематический анализ этих OB-звезд был выполнен в работе Бобылева и Байковой [32]. В работе Сюя и др. [7] создана новая, более обширная, выборка OB-звезд с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia EDR3. Целью настоящей работы является переопределение параметров вращения Галактики с использованием новейших данных о звездах спектральных классов О и В из работы [7].

#### 2. МЕТОДЫ

#### 2.1. Параметры вращения Галактики

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую скорость  $V_r$  и две проекции тангенциальной скорости  $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$  и  $V_b = 4.74r\mu_b$ , направленные вдоль галактической долготы *l* и широты *b* соответственно, выраженные в км/с. Коэффициент 4.74 является коэффициентом размерности, а *r* – гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое вычисляется через параллакс  $\pi$  как  $r = 1/\pi$ . Компоненты собственного движения  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$  выражены в mas/год.

Для определения параметров кривой галактического вращения мы используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых произведено разложение угловой скорости  $\Omega$  в ряд до членов второго порядка малости  $r/R_0$ :

$$V_{r} = -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l -$$
  
-  $W_{\odot} \sin b + R_{0}(R - R_{0}) \sin l \cos b\Omega_{0}' +$  (1)  
+  $0.5R_{0}(R - R_{0})^{2} \sin l \cos b\Omega_{0}'',$ 

$$V_{l} = U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r\Omega_{0} \cos b + + (R - R_{0})(R_{0} \cos l - r \cos b)\Omega_{0}' + (2) + 0.5(R - R_{0})^{2}(R_{0} \cos l - r \cos b)\Omega_{0}'', V_{b} = U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b - - W_{\odot} \cos b - R_{0}(R - R_{0}) \sin l \sin b\Omega_{0}' - (3) - 0.5R_{0}(R - R_{0})^{2} \sin l \sin b\Omega_{0}'',$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики,  $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$ . Скорости  $(U, V, W)_{\odot}$  являются средней групповой скоростью выборки, берутся с обратным знаком и отражают пекулярное движение Солнца.  $\Omega_0$  — угловая скорость вращения Галактики на солнечном расстоянии  $R_0$ , параметры  $\Omega'_0$  и  $\Omega''_0$  — соответствующие производные угловой скорости.

Имея значения  $\Omega_0$  и  $R_0$ , можем вычислить линейную скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии  $V_0 = R_0 \Omega_0$ . В настоящей работе значение  $R_0$  принимается равным  $8.1 \pm 0.1$  кпк согласно обзору Бобылева, Байковой [36], где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

#### 2.2. Эллипсоид остаточных скоростей

Для оценки дисперсий остаточных скоростей звезд используем следующий известный метод. Рассматриваются шесть моментов второго порядка a, b, c, f, e, d:

$$a = \langle U^{2} \rangle - \langle U_{\odot}^{2} \rangle, \quad b = \langle V^{2} \rangle - \langle V_{\odot}^{2} \rangle,$$

$$c = \langle W^{2} \rangle - \langle W_{\odot}^{2} \rangle, \quad f = \langle VW \rangle - \langle V_{\odot}W_{\odot} \rangle, \quad (4)$$

$$e = \langle WU \rangle - \langle W_{\odot}U_{\odot} \rangle, \quad d = \langle UV \rangle - \langle U_{\odot}V_{\odot} \rangle,$$

которые являются коэффициентами уравнения поверхности

$$ax^{2} + by^{2} + cz^{2} + 2fyz + 2ezx + 2dxy = 1, \qquad (5)$$

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}.$$
 (6)

Основное внимание в настоящей работе уделяется анализу собственных движений ОВ-звезд, лучевых скоростей в этой выборке мало, поэтому для определения элементов тензора остаточных скоростей используем три следующих уравнения:

$$V_l^2 = a\sin^2 l + b\cos^2 l\sin^2 l - 2d\sin l\cos l, \quad (7)$$

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 № 4 2022

 $<sup>^{1}</sup>$  mas (milli arc second) — миллисекунда дуги.

 $+ d(\sin^2 l \sin b - \cos^2 \sin b),$ которые решаются методом наименьших квадратов

относительно шести неизвестных a, b, c, f, e, d. Затем находятся собственные значения тензора (6)  $\lambda_{1,2,3}$  из решения векового уравнения

 $V_b^2 = a\sin^2 b\cos^2 l + b\sin^2 b\sin^2 l + b\sin^2 b\sin^2 l + b\sin^2 b\sin^2 l + b\sin^2 b\sin^2 b \sin^2 l + b\sin^2 b \sin^2 b \sin^2$ 

 $+c\cos^2 b - 2f\cos b\sin b\sin l -$ 

 $-2e\cos b\sin b\cos l + 2d\sin l\cos l\sin^2 b$ 

 $+ f \cos l \cos b - e \sin l \cos b +$ 

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$
(10)

Собственные значения данного уравнения равны обратным значениям квадратов полуосей эллипсоида моментов скоростей и, в то же время, квадратам полуосей эллипсоида остаточных скоростей:

$$\lambda_1 = \sigma_1^2, \quad \lambda_2 = \sigma_2^2, \quad \lambda_3 = \sigma_3^2, \\ \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3.$$
(11)

Направления главных осей тензора (10) L<sub>1.2.3</sub> и *B*<sub>1,2,3</sub> находятся из соотношений

$$\operatorname{tg} L_{1,2,3} = \frac{ef - (c - \lambda)d}{(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2},$$
(12)

$$\operatorname{tg} B_{1,2,3} = \frac{(b-\lambda)e - df}{f^2 - (b-\lambda)(c-\lambda)} \cos L_{1,2,3}.$$
(13)

## 3. ЛАННЫЕ

ОВ-звезд из компилляции Сюя и др. [7], для которых собственные движения и тригонометрические параллаксы были взяты из каталога Gaia EDR3. Для этого с каталогом Gaia EDR3 в работе [7] были отождествлены спектроскопически подтвержденные Скифом [37] 9750 звезд спектральных классов от О до В2. Причем в [7] были отобраны звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%, а звезды с |z| > 300 пк этими авторами не были включены в выборку.

В параллаксах каталога Gaia EDR3, по-видимому, сохранился небольшой систематический сдвиг по отношению к инерциальной системе координат [38-43]. Впервые такой сдвиг был выявлен в параллаксах Gaia DR2 с величиной  $\Delta \pi = -0.029$  mas [44], позже подтвержденный из анализа различных высокоточных данных. Такую

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 Nº 4 2022

поправку необходимо прибавлять к измеренным параллаксам, поэтому истинные расстояния до звезд должны уменьшиться. Значение поправки  $\Delta \pi$  к параллаксам каталога Gaia EDR3 колеблется от -0.015 [41] до -0.039 mas [40]. Значение поправки сильно зависит от звездной величины, простыми методами полностью она не исключается.

В работе Сюя и др. [7] было изучено влияние поправки  $\Delta \pi = -0.017$  mas на характеристики спирального узора. Эти авторы заключили, что такая систематическая поправка не оказывает значительного влияния на характер пространственного распределения исследуемых ОВ-звезд. В настоящей работе мы хотим проверить влияние поправки на искомые кинематические параметры ОВ-звезд.

На рис. 1 дано распределение ОВ-звезд с относительными ошибками параллаксов менее 7% в проекции на галактическую плоскость ХҮ. Использована система координат, в которой ось Х направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси У совпадает с направлением вращения Галактики. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки  $i = -13^{\circ}$  [45], построенный со значением  $R_0 = 8.1$  кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: І – Щита, ІІ – Киля-Стрельца, III – Персея и IV – Внешний рукав.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Система условных уравнений вида (1)–(3) решается методом наименьших квадратов (МНК) с весами вида  $w_{r,l,b} = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_{r,l,b}}^2}$ , где  $S_0 -$ "космическая" дисперсия,  $\sigma_{V_r}, \sigma_{V_l}, \sigma_{V_b}$  – дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S<sub>0</sub> сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ<sub>0</sub> (ошибка единицы веса) при решении условных уравнений вида (1)-(3). Мы приняли  $S_0 = 10$  км/с. Система уравнений решалась в несколько итераций с применением критерия 3 для исключения звезд с большими невязками.

Первый способ заключается в поиске решения с использованием только одного условного уравнения (2). Найденные параметры галактического вращения для трех выборок ОВ-звезд с различным уровнем ошибок параллаксов даны в табл. 1. Для каждой выборки дано среднее значение координаты  $\overline{z}$  (отражает "эффект возвышения", т.е. высоту Солнца над плоскостью Галактики). Полученные оценки  $\overline{z}$  находятся в очень хорошем

(8)

(9)



**Рис. 1.** Распределение OB-звезд с относительными ошибками параллаксов менее 7% в проекции на галактическую плоскость XY, желтым кружком отмечено положение Солнца, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки  $i = -13^{\circ}$  согласно [45].

согласии, например, со значением  $\overline{z} = -23 \pm 3$  пк, найденным из анализа РЗС с данными из каталога Gaia DR2 в работе [46]. В нижней части таблицы даны значения постоянных Оорта  $A = 0.5\Omega'_0R_0$  и  $B = A - \Omega_0$ , вычисленные с использованием полученных зна-

Параметры	$\sigma_{\pi}/\pi < 5\%$	$\sigma_{\pi}/\pi < 7\%$	$\sigma_{\pi}/\pi \le 10\%$
$N_{\star}$	6861	8766	9750
$N_{ m eq}$	6764	8640	9610
$\overline{z}$ , пк	$-14.5 \pm 1.0$	$-18.7\pm0.9$	$-19.3\pm0.9$
$\overline{r}$ , кпк	1.89	2.12	2.27
$U_{\odot}$ , км/с	$6.80\pm0.19$	$6.92\pm0.17$	$7.17\pm0.16$
$V_{\odot}$ , км/с	$6.76\pm0.37$	$7.43\pm0.29$	$7.37\pm0.24$
$\Omega_0$ , км/с/кпк	$29.633 \pm 0.084$	$29.696 \pm 0.076$	$29.700 \pm 0.076$
$\Omega_0',$ км/с/кпк $^2$	$-4.013 \pm 0.023$	$-4.007 \pm 0.022$	$-4.008 \pm 0.022$
$\Omega_0^{\prime\prime}$ , км/с/кпк $^3$	$0.655\pm0.018$	$0.670\pm0.011$	$0.671\pm0.011$
σ <sub>0</sub> , км/с	11.3	11.6	11.8
<i>А</i> , км/с/кпк	$16.37\pm0.23$	$16.25\pm0.22$	$16.23\pm0.22$
<i>В</i> , км/с/кпк	$-13.29 \pm 0.25$	$-13.38 \pm 0.24$	$-13.47 \pm 0.23$
<i>V</i> <sub>0</sub> , км/с	$240.3 \pm 3.1$	$240.0 \pm 3.0$	$240.6 \pm 3.0$

Таблица 1. Параметры вращения Галактики, найденные по ОВ-звездам только на основе уравнения (2)

Примечание.  $N_{\star}$  – общее количество звезд в выборке,  $N_{\rm eq}$  – количество использованных уравнений.

Параметры	$\sigma_{\pi}/\pi < 5\%$	$\sigma_{\pi}/\pi < 7\%$	$\sigma_{\pi}/\pi \le 10\%$
$N_{\star}$	6861	8766	9750
$N_{ m eq}$	13 513	17 263	19202
$U_{\odot}$ , км/с	$6.90 \pm 0.15$	$7.00 \pm 0.14$	$7.21\pm0.13$
$V_{\odot}$ , км/с	$7.00 \pm 0.30$	$7.57\pm0.24$	$7.46\pm0.20$
$W_{\odot}$ , км/ с	$8.27 \pm 0.11$	$8.53\pm0.10$	$8.52\pm0.10$
$\Omega_0$ , км/с/кпк	$29.650 \pm 0.069$	$29.704 \pm 0.062$	$29.712 \pm 0.062$
$\Omega_0',$ км/с/кпк $^2$	$-4.022 \pm 0.019$	$-4.013 \pm 0.018$	$-4.014 \pm 0.018$
$\Omega_0^{\prime\prime}$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$0.666 \pm 0.015$	$0.674 \pm 0.009$	$0.674\pm0.009$
<b>σ</b> <sub>0</sub> , км/с	9.2	9.4	9.6
<i>А</i> , км/с/кпк	$16.39 \pm 0.23$	$16.29 \pm 0.22$	$16.26 \pm 0.21$
<i>B</i> , км/с/кпк	$-13.22 \pm 0.24$	$-13.36 \pm 0.23$	$-13.45 \pm 0.22$
<i>V</i> <sub>0</sub> , км/с	$239.9 \pm 3.0$	$240.2 \pm 3.0$	$240.7 \pm 3.0$

Таблица 2. Параметры вращения Галактики, найденные по ОВ-звездам в результате использования двух уравнений вида (2), (3)

Примечание.  $N_{\star}$  — общее количество звезд в выборке,  $N_{\rm eq}$  — количество использованных уравнений.

чений  $\Omega_0$  и  $\Omega'_0$ . Дана также линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии  $V_0 = R_0 \Omega_0$  для принятого значения  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк.

Для проверки влияния систематической поправки к параллаксам звезд каталога Gaia EDR3 на кинематические параметры OB-звезд используем два значения 0.020 и 0.040 mas. По всей выборке из 9750 звезд этим методом, с исправленными параллаксами  $\pi = \pi + 0.020$  mas, найдены следующие компоненты скорости:  $(U,V)_{\odot} = (6.96,7.74) \pm \pm (0.16,0.24)$  км/с и параметры угловой скорости галактического вращения:

$$Ω_0 = 29.469 \pm 0.076 \text{ км/c/кпк},$$
  

$$Ω'_0 = -3.965 \pm 0.021 \text{ км/c/кпк}^2, \qquad (14)$$
  

$$Ω''_0 = 0.663 \pm 0.013 \text{ км/c/кпк}^3.$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет  $\sigma_0 = 11.2$  км/с. Линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет  $V_0 = 238.7 \pm 3.0$  км/с, а постоянные Оорта  $A = 16.06 \pm 0.22$  км/с/кпк и  $B = -13.41 \pm 0.23$  км/кпк.

Повтор решения (14) с новыми значениями параллаксов  $\pi = \pi + 0.040$  мсд дает  $(U,V)_{\odot} = (6.79,7.99) \pm (0.15,0.24)$  км/с и параметры угловой скорости галактического вращения:

$$\Omega_0 = 29305 \pm 0.077 \text{ Km/c/kmk},$$
  

$$\Omega'_0 = -3.933 \pm 0.021 \text{ Km/c/kmk}^2,$$
(15)  

$$\Omega''_0 = 0.653 \pm 0.015 \text{ Km/c/kmk}^3.$$

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 № 4 2022

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет  $\sigma_0 = 10.7$  км/с. Линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет  $V_0 = 237.4 \pm 3.0$  км/с, а постоянные Оорта  $A = 15.93 \pm 0.21$  км/с/кпк и  $B = -13.38 \pm 0.23$  км/кпк. Значения параметров (14) и (15) необходимо, в первую очередь, сравнивать со значениями из последнего столбца табл. 1, так как они найдены по одним и тем же звездам.

Второй способ заключается в совместном решении системы условных уравнений вида (2)– (3). Найденные этим способом параметры галактического вращения для трех выборок OB-звезд даны в табл. 2. По всей выборке OB-звезд этим методом, с экспериментальной коррекцией параллаксов  $\pi = \pi + 0.020$  mas, найдены следующие параметры  $(U,V,W)_{\odot} = (6.98,7.81,8.14) \pm \pm (0.13,0.20,0.09)$  км/с и

$$Ω0 = 29.461 ± 0.062 κm/c/кпк,
Ω'0 = -3.969 ± 0.018 κm/c/кпк2, (16)
Ω''0 = 0.665 ± 0.011 κm/c/кпк3.$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет  $\sigma_0 = 9.1$  км/с. Линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет  $V_0 = 238.6 \pm 3.0$  км/с, а постоянные Оорта  $A = 16.07 \pm 0.21$  км/с/кпк и  $B = -13.39 \pm 0.22$  км/кпк. Значения (16) необходимо сравнивать с теми, что даны в последнем столбце табл. 2.

В таблицах указано значение  $N_{eq}$ , которое указывает на фактическое количество звезд при поиске решения после отбрасывания по критерию  $3\sigma$ . В табл. 1 на количество отброшенных по этому критерию звезд указывает простая разность  $N_{\star} - N_{\rm eg}$ . И здесь количество отброшенных звезд очень мало (менее 1%). Во втором случае на количество отброшенных звезд указывает разность  $2N_{\star} - N_{\rm eg}$ , и это количество возрастает, но также не критично.

Сюем и др. [7] была сформирована выборка из 5772 звезд спектральных классов О-В2 с кинематическими параметрами из каталога Gaia DR2. Для более 2500 из них были взяты значения лучевых скоростей из электронной базы SIMBAD<sup>2</sup>.

Мы отождествили выборки OB-звезд из работ [7, 19], и в новой выборке обнаружили 1812 звезд с лучевыми скоростями. Лучевые скорости OB-звезд в каталоге Сюя и др. [7] даны относительно местного стандарта покоя, поэтому мы переводим их обратно в гелиоцентрические с известными параметрами стандартного движения Солнца  $(U, V, W)_{\odot} = (10.3, 15.3, 7.7)$  км/с.

Интерес к этим звездам связан в первую очередь с тем, что по ним можно построить график кривой вращения Галактики. Для этого вычисляем пространственные скорости U, V, W, а затем еще две скорости:  $V_R$ , направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость  $V_{\rm circ}$  в направлении вращения Галактики на основе следующих соотношений:

$$V_{\text{circ}} = U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta,$$
  

$$V_R = -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta,$$
(17)

где позиционный угол  $\theta$  удовлетворяет соотношению  $\tan \theta = y/(R_0 - x)$ , *x*, *y*, *z* – прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды (вдоль соответствующих осей *x*, *y*, *z* направлены скорости *U*, *V*, *W*).

Отметим, что в выборке 1812 OB-звезд с лучевыми скоростями для более половины звезд не даны ошибки определения лучевых скоростей, а для значительной части звезд ошибки определения лучевых скоростей превышают 10 км/с.

Наличие лучевых скоростей позволяет искать совместное решение системы из трех условных уравнений вида (1)—(3). Этим способом по OB-звездам с лучевыми скоростями и собственными движениями найдены следующие параметры  $(U,V,W)_{\odot} = (7.17,10.03,8.15) \pm (0.30,0.35,0.29)$  км/с и

$$\Omega_0 = 29.22 \pm 0.19 \text{ KM/c/kIIK},$$
  

$$\Omega_0' = -3.885 \pm 0.042 \text{ KM/c/kIIK}^2,$$
(18)  

$$\Omega_0'' = 0.685 \pm 0.031 \text{ KM/c/KIIK}^3,$$

где ошибка единицы веса составила  $\sigma_0 = 12.2$  км/с, а линейная скорость вращения Галактики на око-

лосолнечном расстоянии  $V_0 = 236.7 \pm 3.3$  км/с. После отбрасывания звезд с большими ошибками лучевых скоростей (более 20 км/с), а также по критерию 3 $\sigma$  осталось 1726 ОВ-звезд, по которым и было найдено решение (18), а также построен рис. 2.

На рис. 2 даны круговые скорости вращения  $V_{\rm circ}$ , радиальные  $V_R$  и вертикальные W скорости 1726 ОВ-звезд в зависимости от расстояния R. Дана кривая вращения, найденная только по собственным движениям (последний столбец табл. 2), которую мы считаем наилучшей. Как видно из рис. 2а, кривая вращения имеет очень узкую доверительную область.

Как на рис. 2а, так и на рис. 2б легко прослеживается волнообразное поведение скоростей, которое связано с влиянием галактической спиральной волны плотности. В работе Бобылева и Байковой [32] был выполнен кинематический Фурье-анализ более 2000 ОВ-звезд из списка [7], где был построен рис. 4 с периодическими кривыми, описывающими влияние спиральной волны плотности. Бобылев и Байкова [32] нашли, что амплитуды тангенциальных и радиальных скоростей возмущений составляют  $f_{\theta} = 4.4 \pm 1.4$  км/с и  $f_{R} = 5.1 \pm 1.2$  км/с соответственно.

По собственным движениям 9720 OB2-звезд, в результате МНК-решения системы условных уравнений вида (7)—(9), найдены следующие дисперсии остаточных скоростей:

$$σ_1 = 11.79 \pm 0.06 \text{ км/c},$$
  
 $σ_2 = 9.66 \pm 0.05 \text{ км/c},$ 
  
 $σ_3 = 7.21 \pm 0.04 \text{ км/c},$ 
(19)

и параметры ориентации этого эллипсоида

$$L_{1} = 12.4 \pm 0.1^{\circ}, \quad B_{1} = +0.5 \pm 0.1^{\circ}, \\ L_{2} = 102.4 \pm 0.1^{\circ}, \quad B_{2} = +2.3 \pm 0.1^{\circ}, \\ L_{3} = 271.2 \pm 0.1^{\circ}, \quad B_{3} = 87.7 \pm 0.1^{\circ}.$$
(20)

Можем заключить, что имеем дело с действительно очень молодыми звездами, для которых характерна небольшая дисперсия остаточных скоростей. Отметим, что среднее ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )/3 = 9.55 км/с, характеризующее дисперсию средней пространственной скорости, близко́ к значениям ошибки единицы веса  $\sigma_0$ , которые указаны в табл. 2, и к выбранному нами значению "космической" дисперсии  $S_0 = 10$  км/с.

### 5. ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время считается, что наиболее достоверно компоненты пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя, составляющие  $(U, V, W)_{\odot} = (11.1, 12.2, 7.3) \pm$ 

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 99 № 4 2022

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/



**Рис. 2.** Верхняя панель (а) — круговые скорости вращения OB-звезд  $V_{circ}$  в зависимости от расстояния R, приведена кривая вращения с границами доверительной области, соответствующей уровню 1 $\sigma$ . Центральная панель (б) — радиальные  $V_R$ . На нижней панели (в) — вертикальные W скорости OB-звезд в зависимости от расстояния R, вертикальной линией отмечено положение Солнца.

± (0.7,0.5,0.4) км/с, определены Шонрихом и др. [47]. Значения скоростей  $U_{\odot}$  и  $V_{\odot}$ , найденные в настоящей работе по различным выборкам OBзвезд, сильно отличаются от найденных в [47]. Как показано в работе [48], здесь имеется влияние галактической спиральной волны плотности, причем значения скоростей  $U_{\odot}$  и  $V_{\odot}$  сильно зависят от фазы Солнца в волне плотности. Как видно из рис. 1, OB-звезды сильно концентрируются к отрезкам спиральных рукавов, поэтому и в кинематике этих звезд влияния спиральной волны плотности не может не быть. Хотя мы не придаем особого значения решению (18) в части оценки параметров вращения, но значение скорости  $V_{\odot}$ здесь ближе к найденному Шонрихом и др. [47].

Важным параметром является значение линейной скорости  $V_0$ . Известно, что быстрее всего вращаются такие объекты тонкого диска Галактики, как водородные облака, мазерные источники в областях активного звездообразования, OBзвезды, молодые P3C, наиболее молодые цефеиды и др.

В работе [31] из анализа 495 ОВ-звезд из каталога Gaia DR2 была получена оценка  $V_0 = 231 \pm 5$  км/с для принятого значения  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк. Мроз и др. [49] из анализа около 770 классических цефеид получили оценку  $V_0 = 233.6 \pm 2.8$  км/с для принятого  $R_0 = 8.122 \pm 0.031$  кпк. По выборке из около 3500 классических цефеид в работе [50] с очень высокой точностью была найдена скорость  $V_0 = 232.5 \pm 0.9$  км/с для принятого  $R_0 = 8.122 \pm 0.031$  кпк. Из анализа 800 цефеид в работе [51] найдено  $V_0 = 240 \pm 3$  км/с для найденного значения  $R_0 = 8.27 \pm 0.10$  кпк.

Расторгуевым и др. [52] по данным о 130 галактических мазерах с измеренными тригонометрическими параллаксами были найдены компоненты скорости Солнца ( $U_{\odot}, V_{\odot}$ ) = (11.40,17.23) ± ± (1.33,1.09) км/с, и следующие значения параметров кривой вращения Галактики:  $\Omega_0 = 28.93 \pm$ ± 0.53 км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -3.96 \pm 0.07$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.87 \pm 0.03$  км/с/кпк<sup>3</sup>,  $V_0 = 243 \pm 10$  км/с для найденного значения  $R_0 = 8.40 \pm 0.12$  кпк.

В работе Рида и др. [53] по выборке из 147 мазеров были найдены следующие значения двух важнейших кинематических параметров:  $R_0 =$ = 8.15 ± 0.15 кпк и  $\Omega_{\odot} = 0.32 \pm 0.27$  км/с/кпк, где  $\Omega_{\odot} = \Omega_0 + V_{\odot}/R$ . Значение скорости  $V_{\odot} = 12.2$  км/с было взято из работы [47]. Эти авторы ипользовали метод, основанный на разложении в ряд линейной скорости вращения Галактики.

По собственным движениям около 6000 OB-звезд из списка [19], с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2 в работе [32] найдены:  $(U_{\odot}, V_{\odot}) = (6.53, 7.27) \pm (0.24, 0.31)$  км/с,  $\Omega_0 = 29.70 \pm 0.11$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -4.035 \pm 0.031$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.620 \pm \pm 0.014$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где  $V_0 = 238 \pm 5$  км/с для принятого  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк. Отметим, эти значения необходимо сравнить с параметрами (16), которые получены на основе совершенно одинакового подхода. Это сравнение показывает, что ошибки определения кинематических параметров (16) оказываются примерно в 1.5 раза меньшими.

По 788 цефеидам из списка Мроза и др. [49] с собственными движениями и лучевыми скоростями из каталога Gaia DR2 в работе [51] было найдено  $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot})(10.1, 13.6, 7.0) \pm (0.5, 0.6, 0.4)$  км/с, а также:  $\Omega_0 = 29.05 \pm 0.15$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -3.789 \pm$   $\pm 0.045$  км/с/кпк<sup>2</sup>,  $\Omega_0^{"} = 0.722 \pm 0.027$  км/с/кпк<sup>3</sup>, при найденном  $R_0 = 8.27 \pm 0.10$  кпк.

Таким образом, можем заключить, что найденные в настоящей работе по OB-звездам значения параметров угловой скорости вращения Галактики  $\Omega_0$ ,  $\Omega'_0$  и  $\Omega''_0$  находятся в хорошем согласии с оценками других авторов и в нашем случае определены с высокой точностью.

Имеется интерес [54–57] к значениям постоянных Оорта *A* и *B*. Эти постоянные характеризуют вид кривой галактического вращения в малой окрестности Солнца. Согласно нашим определениям, сумма  $A + B = -\partial V_{circ}/\partial R$  говорит о том, что линейная скорость галактического вращения  $V_{circ}$  в околосолнечной окрестности уменьшается (небольшой прогиб кривой вращения в области  $R = R_0$  на рис. 2а), что находится в согласии с современными оценками характера вращения Галактики.

Например, Бови [56] из анализа собственных движений и параллаксов локальной выборки из 304267 звезд главной последовательности каталога Gaia DR1 [58] нашел  $A = 15.3 \pm 0.5$  км/с и  $B = -11.9 \pm 0.4$  км/с, на основе которых он получил оценку угловой скорости вращения Галактики  $\Omega_0 = 27.1 \pm 0.5$  км/с/кпк и скорости  $V_0 = 219 \pm 4$  км/с.

По большой выборке звезд из каталога Gaia DR2, которые расположены в окрестности Солнца радиусом 500 пк, в работе [57] получены следующие оценки:  $A = 15.1 \pm 0.1$  км/с,  $B = -13.4 \pm \pm 0.1$  км/с и  $\Omega_0 = 28.5 \pm 0.1$  км/с/кпк.

#### 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения кинематики Галактики использована выборка OB2-звезд из работы Сюя и др. [7] с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia EDR3. Эти очень молодые звезды расположены не выше 300 пк от галактической плоскости, не далее 5— 6 кпк от Солнца, в среднем на расстоянии около 2 кпк.

Испытаны два подхода к решению кинематических уравнений: а) с использованием только компонента  $V_l$  и б) с использованием двух компонентов  $V_l$  и  $V_b$ . Показано, что по сравнению с первым, во втором способе небольшое преимущество заключается в возможности оценки скорости  $W_{\odot}$ , а также в снижении уровня ошибок определяемых параметров.

Показано, что влияние систематической поправки к тригонометрическим параллаксам каталога Gaia EDR3 с величиной  $\Delta \pi = -0.040$  mas не превышает уровня (примерно 1 $\sigma$ ) ошибок иско-

274

мых кинематических параметров модели. Собственно влияние поправки заключается в том, что с ней мы находим меньшие (по модулю) значения таких параметров, как  $\Omega_0$ ,  $\Omega'_0$ ,  $\Omega''_0$  и  $V_0$ . Благоприятное влияние заключается в существенном снижении значения ошибки единицы веса  $\sigma_0$  при поиске МНК-решения кинематических уравнений.

Кинематические уравнения решались с использованием трех ограничений на ошибки параллаксов звезд  $\sigma_{\pi}/\pi$ : 10, 7 и 5%. Мы заключили, что практически не ощущается зависимости определяемых кинематических параметров от уровня ошибок параллаксов.

По выборке из 9750 ОВ-звезд, без введения поправки к их параллаксам, найдены компоненты групповой скорости  $(U, V, W)_{\odot} = (7.21, 7.46,$ 8.52) ± (0.13, 0.20, 0.10) км/с и следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики:  $\Omega_0 = 29.712 \pm 0.062$  км/с/кпк,  $\Omega_0' =$  $= -4.014 \pm 0.018$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega_0^{"} = 0.674 \pm$ ± 0.009 км/с/кпк<sup>3</sup>. Круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики здесь составляет  $V_0 = 240.7 \pm 3.0$  км/с для принятого расстояния  $R_0 = 8.1 \pm 0.1$  кпк. По 1726 ОВ-звездам с лучевыми скоростями и собственными движениями вычислены скорости V<sub>circ</sub> и V<sub>R</sub>, построен график кривой вращения с параметрами, найденными только по собственным движениям. Показано, что эта кривая имеет очень узкую доверительную область.

По собственным движениям 9720 ОВ-звезд определены следующие дисперсии остаточных скоростей ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) = (11.79, 9.66, 7.21) ± (0.06, 0.05, 0.04) км/с. Показано, что первая ось этого эллипсоида слегка отклонена от направления на центр Галактики  $L_1 = 12.4 \pm 0.1^\circ$ , а третья ось направлена практически точно на северный полюс Галактики,  $B_3 = 87.7 \pm 0.1^\circ$ .

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz, Astron. and Astrophys. 445, 545 (2006).
- 2. P. T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, and J. H. J. de Bruijne, Astron. J. 117, 354 (1999).
- 3. A. K. Dambis, A. M. Mel'nik, and A. S. Rastorguev, Astron. Letters 27, 58 (2001).
- 4. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 472, 3887 (2017).

- 5. J. A. Frogel and R. Stothers, Astron. J. 82, 890 (1977).
- 6. J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras, Astron. and Astrophys. **359**, 82 (2000).
- Y. Xu, L.G. Hou, S. Bian, C. J. Hao, D. J. Liu, J. J. Li, and Y. J. Li, Astron. and Astrophys. 645, id. L8 (2021).
- 8. *A. Blaauw*, Bull. Astron. Inst. Netherland **15**, 265 (1961).
- 9. *R. Hoogerwerf, J. H. J. de Bruijne, and P. T. de Zeeuw,* Astrophys. J. **544**, L133 (2000).
- 10. N. Tetzlaff, R. Neuhäuser, and M. M. Hohle, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **410**, 190 (2011).
- 11. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astron. Letters **47**, 224 (2021).
- M. Mohr-Smith, J. E. Drew, R. Napiwotzki, S. Simon-Diaz, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 465, 1807 (2017).
- 13. B.-Q. Chen, Y. Huang, L.-G. Hou, H. Tian, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 487, 1400 (2019).
- 14. J. M. Shull and C. W. Danforth, Astrophys. J. 882, id. 180 (2019).
- 15. R. Drimmel, R. L. Smart, and M. G. Lattanzi, Astron. and Astrophys. 354, 67 (2000).
- 16. D. Russeil, Astron. and Astrophys. 397, 133 (2003).
- 17. *Y. M. Georgelin and Y. P. Georgelin*, Astron. and Astrophys. **49**, 57 (1976).
- D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra, Astron. and Astrophys. 372, 833 (2001).
- 19. Y. Xu, S. B. Bian, M. J. Reid, J. J. Li, et al., Astron. and Astrophys. 616, id. L15 (2018).
- 20. J. Byl and M. W. Ovenden, Astrophys. J. 225, 496 (1978).
- 21. M. Miyamoto and Z. Zhu, Astron. J. 115, 1483 (1998).
- 22. M. Uemura, H. Ohashi, T. Hayakawa, E. Ishida, T. Kato, and R. Hirata, Publ. Astron. Soc. Japan 52, 143 (2000).
- 23. R. L. Branham, Astrophys. J. 570, 190 (2002).
- 24. *R. L. Branham*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **370**, 1393 (2006).
- 25. M. V. Zabolotskikh, A. S. Rastorguev, and A. K. Dambis, Astron. Letters 28, 454 (2002).
- 26. *M. E. Popova and A. V. Loktin*, Astron. Letters **31**, 663 (2005).
- 27. Z. Zhu, Chin. J. Astron. and Astrophys. 6, 363 (2006).
- 28. A. M. Mel'nik and A. K. Dambis, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 400, 518 (2009).
- A. M. Melnik and A. K. Dambis, Astrophys. Space Sci. 365, 112 (2020).
- 30. G. A. Gontcharov, Astron. Letters 38, 694 (2012).
- V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astron. Letters 44, 676 (2018).
- V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astron. Letters 45, 331 (2019).
- 33. T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al., Astron. and Astrophys. **595**, id. A1 (2016).
- 34. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. 649, id. A1 (2021).
- 35. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. 616, id. A1 (2018).

- 36. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astron. Rep. 65, 498 (2021).
- 37. B. A. Skiff, VizieR Online Data Catalog, B/mk (2014).
- 38. L. Lindegren, U. Bastian, M. Biermann, A. Bombrun, et al., Astron. and Astrophys. **616**, id. A2 (2021).
- 39. F. Ren, X. Chen, H. Zhang, R. de Grijs, L. Deng, and Y. Huang, Astrophys. J. Letters **911**, id. L20 (2021).
- 40. *M. A. T. Groenewegen*, Astron. and Astrophys. **654**, id. A20 (2021).
- 41. J. C. Zinn, Astron. J. 161, id. 214 (2021).
- 42. *Y. Huang, H. Yuan, T. Beers, and H. Zhang*, Astrophys. J. Letters **910**, id. L5 (2021).
- 43. J. Maiz Apellániz, arXiv:2110.01475 [astro-ph.IM] (2021).
- 44. L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, et al., Astron. and Astrophys. **616**, id. A2 (2018).
- 45. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **437**, 1549 (2014).
- T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, et al., Astron. and Astrophys. 640, id. A1 (2020).
- 47. R. Schönrich, J. J. Binney, and W. Dehnen, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 403, 1829 (2010).

- 48. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **441**, 142 (2014).
- 49. P. Mróz, A. Udalski, D. M. Skowron, J. Skowron, et al., Astrophys. J. 870, id. L10 (2019).
- I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S. A. Bird, Astrophys. J. 895, id. L12 (2020).
- V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, A. S. Rastorguev, and M. V. Zabolotskikh, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 502, 4377 (2021).
- A. S. Rastorguev, M. V. Zabolotskikh, A. K. Dambis, A. K. Dambis, A. T. Bajkova, V. V. Bobylev, Astrophys. Bull. 72, 122 (2017).
- 53. M. J. Reid, K. M. Menten, A. Brunthaler, X. W. Zheng, et al., Astrophys. J. 885, id. 131 (2019).
- 54. F. Mignard, Astron. and Astrophys. 354, 522 (2000).
- 55. R. P. Olling and W. Dehnen, Astrophys. J. **599**, 275 (2003).
- 56. J. Bovy, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. 468, L63 (2017).
- 57. C. Li, G. Zhao, and C. Yang, Astrophys. J. 872, id. 205 (2019).
- 58. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. 595, id. A2 (2016).