ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2022, том 48, № 4, с. 265–278

КИНЕМАТИКА OB-ЗВЕЗД С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГОВ LAMOST И GAIA

© 2022 г. В. В. Бобылев[1*], А. Т. Байкова[1], Г. М. Карелин[1]

[1]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 18.02.2022 г.
После доработки 02.03.2022 г.; принята к публикации 02.03.2022 г.

Проведен анализ кинематики OB-звезд из списка Сяна и др., который содержит около 13 000 одиночных OB-звезд. Для этих звезд имеются оценки фотометрических расстояний, собственные движения из каталога Gaia и лучевые скорости из каталога LAMOST. По выборке одиночных OB-звезд с использованием фотометрических расстояний и собственных движений звезд из каталога Gaia EDR3 найдены компоненты групповой скорости $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (9.63, 9.93, 7.45) \pm (0.27, 0.34, 0.10)$ км/с, и следующие параметры угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.20 \pm 0.18$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -4.150 \pm 0.046$ км/с/кпк^2 и $\Omega_0'' = 0.795 \pm 0.018$ км/с/кпк^3, где ошибка единицы веса σ_0 составила 9.56 км/с и $V_0 = 236.5 \pm 3.3$ км/с (для принятого $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). По этим же OB-звездам найдены дисперсии остаточных скоростей $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (15.13, 9.69, 7.98) \pm (0.07, 0.05, 0.04)$ км/с. Показано, что использование лучевых скоростей существенно увеличивает дисперсию пространственных скоростей и приводит к смещенной оценке значения скорости $U_\odot$. Сравнение используемых шкал расстояний показало, фотометрические расстояния Сяна и др. (2021) необходимо удлинить примерно на 10%.

Ключевые слова: OB-звезды, кинематика, вращение Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010822040015

ВВЕДЕНИЕ

Звезды спектрального класса O и B — это молодые (несколько млн лет) массивные (более $10M_\odot$) звезды высокой светимости. Благодаря этим свойствам они представляют большое значение для изучения структуры и кинематики Галактики.

Известны различные подходы для спектральной классификации O- и B-звезд (Рид, 1995; Заал и др., 2001; Сота и др., 2011; Скиф, 2014; Маис-Апельянис и др., 2004; 2016), что важно для оценки их светимостей и в конечном итоге фотометрических расстояний. При использовании фотометрических измерений в визуальном диапазоне точность определения таких расстояний не очень высокая. Например, в работе Рида (1995) относительная ошибка определения фотометрического расстояния величиной 1σ для одиночных OB-звезд оценивалась в $\pm 39\%$.

Использование космических фотометрических измерений со спутника Hipparcos (1997) позволило определять фотометрические расстояния до 1207 OB-звезд с ошибками $\pm 14\%$ (Вегнер, 2000). Применение современных калибровок и фотометрических данных в инфракрасном диапазоне позволяет определять фотометрические расстояния уже до примерно 15 000 OB-звезд с ошибками $\pm 12\%$ (Сян и др., 2021).

Результаты кинематического анализа звезд сильно зависят от качества их измеренных кинематических характеристик. Точности собственных движений звезд непрерывно улучшаются, они измерены в настоящее время для большого количества звезд и OB-звезд в частности. Обычно при анализе пространственного распределения и кинематики OB-звезд использовались их фотометрические расстояния. Ситуация изменилась совсем недавно с публикацией массовых более надежных тригонометрических параллаксов звезд, измеренных в результате выполнения космического эксперимента Gaia (Прусти и др., 2016).

Звезды спектральных классов O и B использовались Оортом (1927) для доказательства гипотезы Линдблада о вращении Галактики. С тех пор такие звезды неоднократно применялись для уточнения параметров галактического вращения (Бил, Овенден, 1978; Миямото, Жу, 1998; Уемура и др.,

*Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

2000; Дамбис и др., 2001; Бранхэм, 2002; 2006; Заболотских и др., 2002; Попова, Локтин, 2005; Жу, 2006; Мельник, Дамбис, 2009; 2017; Гончаров, 2012; Бобылев, Байкова, 2018, 2019). Причем зачастую для анализа берут только их собственные движения, так как лучевые скорости одиночных OB-звезд измеряются с большими ошибками.

OB-звезды используются также для изучения структуры и кинематики околосолнечной окрестности, где расположены молодые рассеянные звездные скопления (Пискунов и др., 2006), OB-ассоциации (де Зев и др., 1999; Дамбис и др., 2001; Мельник, Дамбис, 2020), пояс Гулда (Фрогель, Стозерс, 1977; Торра и др., 2000) и Местный рукав (Сюй и др., 2021). Такие звезды представляют интерес в качестве индикаторов галактической спиральной структуры (Жоржелен, Жоржелен, 1976; Фернандес и др., 2001; Руссейль, 2003; Чен и др., 2019; Сюй и др., 2018; 2021).

В работе Сяна и др. (2021) описана выборка OB-звезд с оригинальными оценками фотометрических расстояний, с лучевыми скоростями из каталога LAMOST (The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, Цуй и др., 2012) и с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2. Целью настоящей работы является переопределение параметров галактического вращения по этим OB-звездам, а также сравнение шкалы фотометрических расстояний со шкалой расстояний, опирающейся на тригонометрические параллаксы каталога Gaia.

МЕТОД

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74 r \mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74 r \mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно. Все три скорости выражены в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является коэффициентом размерности, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W, направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

$$U = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \quad (1)$$
$$V = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$
$$W = V_r \sin b + V_b \cos b,$$

где скорость U направлена от Солнца параллельно направлению на центр Галактики, V в направлении вращения Галактики и W на северный галактический полюс. Две скорости: V_R, направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость $V_{\rm circ}$, направленную вдоль вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$V_{\rm circ} = U \sin\theta + (V_0 + V)\cos\theta, \quad (2)$$
$$V_R = -U \cos\theta + (V_0 + V)\sin\theta,$$

где позиционный угол θ 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), V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0.

Параметры вращения Галактики

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

$$V_r = -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - \quad (3)$$
$$- W_\odot \sin b + R_0(R - R_0)\sin l \cos b \Omega_0' +$$
$$+ 0.5 R_0 (R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega_0'',$$

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + \quad (4)$$
$$+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega_0' +$$
$$+ 0.5 (R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r \cos b)\Omega_0'',$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \quad (5)$$
$$- W_\odot \cos b - R_0(R - R_0)\sin l \sin b \Omega_0' -$$
$$- 0.5 R_0 (R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega_0'',$$

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, отражают пекулярное движение Солнца, поэтому взяты с обратными знаками. Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0, параметры Ω_0' и Ω_0'' — соответствующие производные угловой скорости вращения $V_0 = R_0 \Omega_0$. В настоящей работе значение R_0 принимается равным 8.1 ± 0.1 кпк, согласно обзору Бобылева, Байковой (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Решая условные уравнения вида (3)–(5) методом наименьших квадратов (МНК), можем найти шесть неизвестных: $(U, V, W)_\odot$, Ω_0, Ω_0' и Ω_0''. При МНК-решении только одного условного уравнения вида (3) можем найти лишь пять неизвестных: $(U, V, W)_\odot$, Ω_0' и Ω_0''.

Скорости U, V и W в уравнениях (1) и (2) освобождены от пекулярной скорости Солнца $U_\odot$, $V_\odot$ и $W_\odot$ со значениями, найденными в результате МНК-решения кинематических уравнений вида (3)–(5).

Эллипсоид остаточных скоростей

Для оценки дисперсий остаточных скоростей звезд используем следующий известный метод (Огородников, 1965). Рассматриваются шесть моментов второго порядка a, b, c, f, e, d :

$$\begin{aligned} a &= \langle U^2\rangle - \langle U_\odot^2\rangle, \\ b &= \langle V^2\rangle - \langle V_\odot^2\rangle, \\ c &= \langle W^2\rangle - \langle W_\odot^2\rangle, \\ f &= \langle VW\rangle - \langle V_\odot W_\odot\rangle, \\ e &= \langle WU\rangle - \langle W_\odot U_\odot\rangle, \\ d &= \langle UV\rangle - \langle U_\odot V_\odot\rangle, \end{aligned} \tag{6}$$

которые являются коэффициентами уравнения поверхности

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2ezx + 2dxy = 1, \tag{7}$$

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Для определения значений этого тензора используются шесть уравнений:

$$V_l^2 = a\sin^2 l + b\cos^2 l\sin^2 l - 2d\sin l\cos l, \tag{9}$$

$$\begin{aligned} V_b^2 = {} & a\sin^2 b\cos^2 l + b\sin^2 b\sin^2 l + \\ & + c\cos^2 b - 2f\cos b\sin b\sin l - \\ & - 2e\cos b\sin b\cos l + 2d\sin l\cos l\sin^2 b, \end{aligned} \tag{10}$$

$$\begin{aligned} V_lV_b = {} & a\sin l\cos l\sin b + \\ & + b\sin l\cos l\sin b + f\cos l\cos b - e\sin l\cos b + \\ & + d(\sin^2 l\sin b - \cos^2\sin b), \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} V_r^2 = {} & a\cos^2 b\cos^2 l + b\cos^2 b\sin^2 l + \\ & + c\sin^2 b + 2f\cos b\sin b\sin l + \\ & + 2e\cos b\sin b\cos l + 2d\sin l\cos l\cos^2 b, \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} V_bV_r = {} & -a\cos^2 l\cos b\sin b - \\ & - b\sin^2 l\sin b\cos b + c\sin b\cos b + \\ & + f(\cos^2 b\sin l - \sin l\sin^2 b) + \\ & + e(\cos^2 b\cos l - \cos l\sin^2 b) - \\ & - d(\cos l\sin l\sin b\cos b + \sin l\cos l\cos b\sin b), \end{aligned} \tag{13}$$

$$\begin{aligned} V_lV_r = {} & -a\cos b\cos l\sin l + b\cos b\cos l\sin l + \\ & + f\sin b\cos l - e\sin b\sin l + \\ & + d(\cos b\cos^2 l - \cos b\sin^2 l), \end{aligned} \tag{14}$$

которые решаются методом наименьших квадратов относительно шести неизвестных a, b, c, f, e, d. Затем находятся собственные значения тензора (8) $\lambda_{1,2,3}$ из решения векового уравнения

$$\begin{vmatrix} a-\lambda & d & e \\ d & b-\lambda & f \\ e & f & c-\lambda \end{vmatrix} = 0. \tag{15}$$

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

$$\lambda_1 = \sigma_1^2, \quad \lambda_2 = \sigma_2^2, \quad \lambda_3 = \sigma_3^2, \qquad \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3. \tag{16}$$

Направления главных осей тензора (15) $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ находятся из соотношений

$$\operatorname{tg} L_{1,2,3} = \frac{ef - (c-\lambda)d}{(b-\lambda)(c-\lambda) - f^2}, \tag{17}$$

$$\operatorname{tg} B_{1,2,3} = \frac{(b-\lambda)e - df}{f^2 - (b-\lambda)(c-\lambda)}\cos L_{1,2,3}. \tag{18}$$

ДАННЫЕ

В настоящей работе используем выборку ОВ-звезд, для которых в работе Сяна и др. (2021) были определены фотометрические расстояния по данным в ближнем инфракрасном диапазоне. Каталог Сяна и др. (2021) содержит 16 002 записей с данными о звездах, часть которых наблюдалась несколько раз. Звезды снабжены собственными движениями из каталога Gaia DR2 (Браун и др., 2018) и лучевыми скоростями из каталога LAMOST.

Проект LAMOST является глубоким (до $r < 18.5^m$) спектроскопическим обзором неба в оптическом диапазоне (λ: 3700–9000 Å) с низким спектральным разрешением ($R \sim 1800$). Наблюдения производятся на телескопе системы Шмидта с 4-метровым зеркалом. Согласно Сяну и др. (2017), ошибки определения лучевых скоростей звезд поздних спектральных классов в каталоге LAMOST составляют ± 5 км/с.

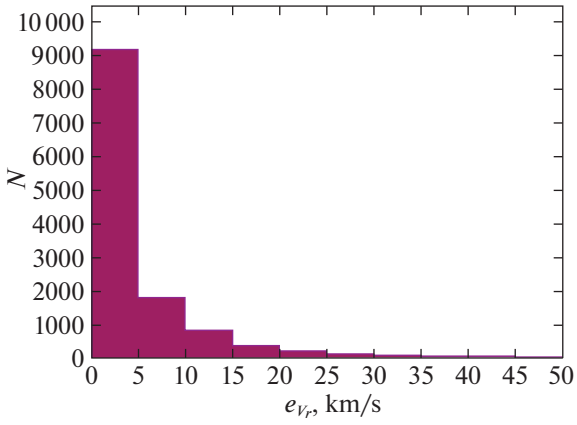

Рис. 1. Гистограмма распределения случайных ошибок определения лучевых скоростей одиночных OB-звезд из списка Сяна и др. (2021).

Спектроскопическая классификация OB-звезд из каталога LAMOST DR5 была выполнена в работе Лю и др. (2019). Список Сяна и др. (2021) содержит 15 184 OB-звезд, которые наблюдались хотя бы один раз. Среди них имеются 13 029 звезд, отмеченных как одиночные. Значения лучевых скоростей имеются практически для каждой звезды. В некоторых случаях отсутствует информация об измерении собственных движений звезд. На рис. 1 дана гистограмма распределения случайных ошибок определения лучевых скоростей одиночных OB-звезд. Как видно из этого рисунка, случайные ошибки подавляющего большинства этих звезд меньше 5 км/с.

В настоящее время опубликована версия Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2021), в которой по сравнению с версией Gaia DR2 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 мсек. дуги. Для звезд со звездными величинами $G < 15^m$ случайные ошибки измерения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги в год, и они сильно возрастают у более слабых звезд. В целом собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%.

Мы отождествили список OB-звезд Сяна и др. с каталогом Gaia EDR3 и нашли 14 532 общие звезды. Характер распределения OB-звезд из каталога Сяна и др. (2021) в проекции на галактической плоскости XY показан на рис. 2. Для построения рисунка были взяты звезды с ошибками определения лучевых скоростей менее 10 км/с и с ошибками расстояний менее 10%. Показаны звезды с фотометрическими расстояниями, а также с расстояниями, вычисленными через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3. Отметим, что распределение всех 13 000 OB-звезд на плоскости XY можно видеть на рис. 12 в работе Сяна и др. (2021). К сожалению, как на рис. 2a, так и на рис. 2b не видно проявлений спиральной структуры.

Наблюдения звезд программы LAMOST осуществляются из северного полушария, поэтому часть южного неба недоступна для наблюдений. Этим объясняется отсутствие звезд в четвертом галактическом квадранте на галактической плоскости XY (рис. 2).

На рис. 3 даны расстояния до OB-звезд, вычисленные через тригонометрические параллаксы каталогов Gaia EDR2 и Gaia EDR3, в зависимости от фотометрических расстояний. Для вычисления расстояний до OB-звезд через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR2 были использованы индивидуальные для каждой звезды поправки к параллаксам, которые даны Сяном и др. (2021). Из рис. 3a можем видеть, что указанные там шкалы расстояний имеют удовлетворительное согласие до расстояний не более 1.5 кпк от Солнца.

Существенно лучшее согласие имеется между расстояниями до OB-звезд, вычисленными через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3, и фотометрическими расстояниями (рис. 3b). Расхождение между этими двумя шкалами расстояний начинает сказываться при расстояниях более ~4 кпк. В целом можем заключить, что шкала расстояний каталога Gaia длиннее шкалы фотометрических расстояний Сяна и др. (2021). При этом связь между этими шкалами расстояний имеет нелинейный характер.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры вращения Галактики

Известно, что среди OB-звезд много убегающих (см., например, Тецлаф и др., 2011), т.е. звезд с большими (более 50 км/с) пекулярными скоростями. Кроме того, имеются звезды с большими ошибками лучевых скоростей, которые не всегда отбрасываются по критерию 3σ. Чтобы избавиться от сильных отскоков, мы используем следующие ограничения на пространственные скорости:

$$|U| < 80 \text{ км/с}, \quad |V| < 80 \text{ км/с}, \quad |W| < 50 \text{ км/с}. \tag{19}$$

Скорости U, V и W здесь остаточные, так как из них вычтены пекулярное движение Солнца и кривая вращения Галактики.

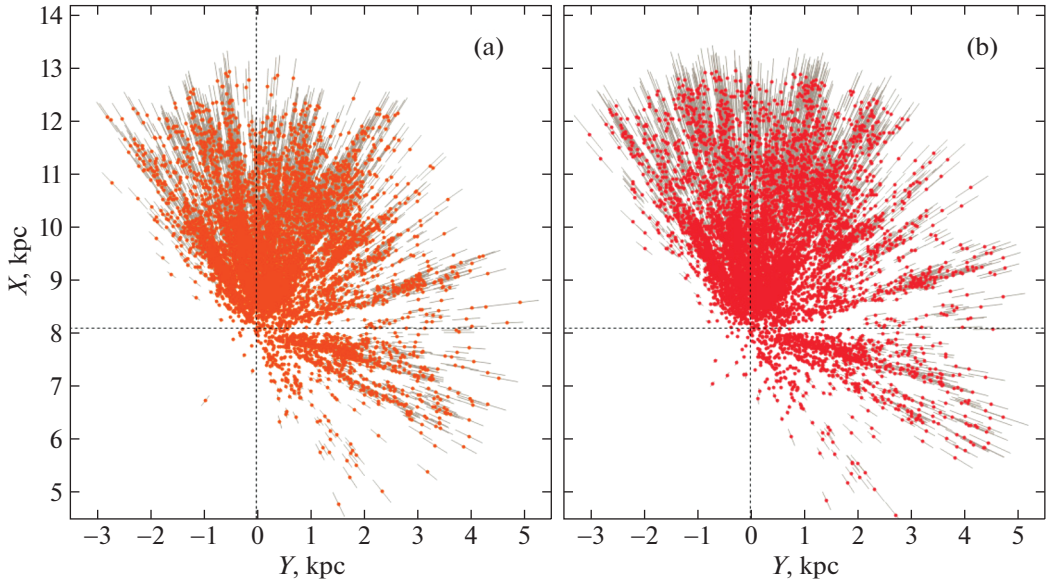

Рис. 2. Распределение на галактической плоскости XY OB-звезд с фотометрическими расстояниями (a), и OB-звезд с расстояниями, вычисленными через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 (b).

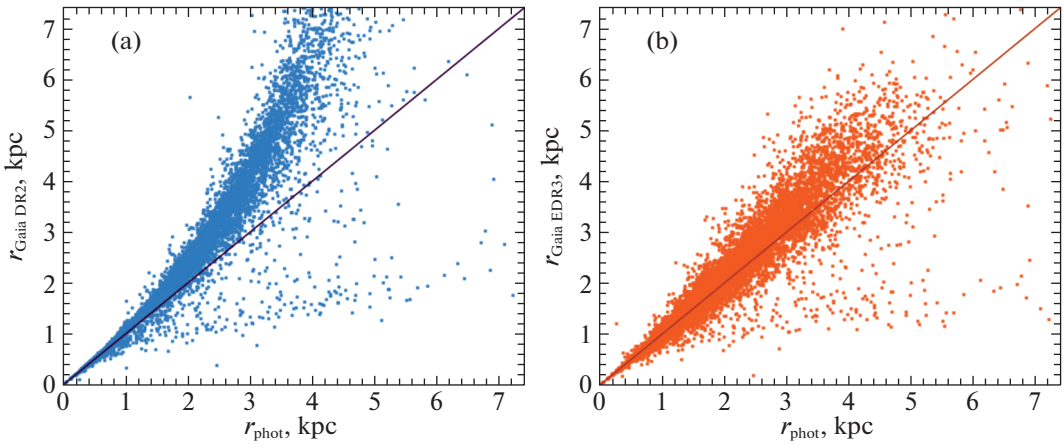

Рис. 3. Расстояния до OB-звезд, вычисленные через тригонометрические параллаксы каталога Gaia DR2, в зависимости от фотометрических расстояний (a), и расстояния, вычисленные через параллаксы каталога Gaia EDR3, в зависимости от фотометрических расстояний (b), на каждой панели дана диагональная линия совпадения.

Параметры модели, найденные по OB-звездам с использованием фотометрических расстояний отражены в табл. 1. Здесь были использованы собственные движения звезд из каталога Gaia DR2 и лучевые скорости из каталога LAMOST. Кинематические уравнения решались тремя способами — с использованием всех данных, только по лучевым скоростям и только по собственным движениям звезд. Можно отметить достаточно ровное поведение всех параметров во всех колонках, т.е. найденные параметры слабо зависят от ошибки расстояний. Главная же особенность заключается в том, что: а) имеем очень большое значение ошибки единицы веса σ_0, полученной по лучевым скоростям, б) скорости $U_\odot$, найденные по лучевым скоростям, заметно отличаются от найденных по собственным движениям OB-звезд и в) наибольшего доверия заслуживают параметры, найденные из анализа собственных движений, так как они определены с наименьшей ошибкой единицы веса.

Значение ошибки единицы веса σ_0 определяется при решении условных уравнений вида (3)–(5) как среднее из невязок. Эта величина характеризует усредненную по трем направлениям дисперсию остаточных скоростей звезд. Известно, что дисперсия остаточных скоростей водородных облаков в галактическом диске составляет около 5 км/с, а дисперсия скоростей OB-звезд лежит в интервале 8–10 км/с.

Таблица 1. Кинематические параметры, найденные по OB-звездам на основе всех трех условных уравнений (3)–(5), даны в верхней части таблицы; только по лучевым скоростям LAMOST на осное уравнения (3) даны в средней части таблицы; только по собственным движениям из каталога Gaia DR2 на основе двух уравнений (4)–(5) даны в нижней части таблицы; расстояния до звезд фотометрические; $N_\star$ — количество использованных звезд, $\overline{r}$ — средний радиус выборки

Параметры	$\sigma_r/r < 10\%$	$\sigma_r/r < 15\%$	$\sigma_r/r < 20\%$	$\sigma_r/r < 30\%$
$N_\star$	9756	11738	11900	11943
$\overline{r}$, кпк	1.95	2.20	2.22	2.22
$U_\odot$, км/с	13.47 ± 0.17	13.79 ± 0.19	13.75 ± 0.16	13.68 ± 0.16
$V_\odot$, км/с	10.91 ± 0.29	11.48 ± 0.30	11.45 ± 0.29	11.47 ± 0.29
$W_\odot$, км/с	6.94 ± 0.15	6.51 ± 0.15	6.49 ± 0.15	6.45 ± 0.14
Ω_0, км/с/кпк	30.85 ± 0.17	30.75 ± 0.16	30.71 ± 0.16	30.66 ± 0.16
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.350 ± 0.042	-4.193 ± 0.038	-4.187 ± 0.038	-4.173 ± 0.037
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.852 ± 0.019	0.757 ± 0.015	0.755 ± 0.015	0.753 ± 0.014
σ_0, км/с	14.77	15.28	15.38	15.25
V_0, км/с	249.9 ± 3.4	249.1 ± 3.3	248.7 ± 3.3	248.4 ± 3.3
$U_\odot$, км/с	14.39 ± 0.28	14.84 ± 0.26	14.83 ± 0.25	14.81 ± 0.25
$V_\odot$, км/с	11.41 ± 0.56	11.51 ± 0.55	11.44 ± 0.55	11.46 ± 0.55
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.847 ± 0.099	-4.605 ± 0.090	-4.601 ± 0.084	-4.587 ± 0.090
Ω_0'', км/с/кпк^3	1.352 ± 0.072	1.127 ± 0.057	1.121 ± 0.043	1.108 ± 0.056
σ_0, км/с	21.94	22.44	22.52	22.54
$U_\odot$, км/с	9.53 ± 0.27	9.15 ± 0.25	9.09 ± 0.25	9.13 ± 0.25
$V_\odot$, км/с	9.95 ± 0.34	10.95 ± 0.32	11.01 ± 0.32	10.98 ± 0.32
$W_\odot$, км/с	7.03 ± 0.10	6.63 ± 0.10	6.57 ± 0.10	6.55 ± 0.10
Ω_0, км/с/кпк	29.06 ± 0.18	28.70 ± 0.17	28.62 ± 0.17	29.65 ± 0.17
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.167 ± 0.046	-3.967 ± 0.041	-3.943 ± 0.040	-3.951 ± 0.040
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.814 ± 0.018	0.722 ± 0.014	0.713 ± 0.014	0.716 ± 0.014
σ_0, км/с	9.65	10.01	10.07	10.09
V_0, км/с	235.4 ± 3.3	232.5 ± 3.2	231.8 ± 3.2	232.1 ± 3.2
$(\Omega_0')_{V_l}/(\Omega_0')_{V_r}$	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01

На рис. 4 даны радиальные V_R, круговые $V_{\rm circ}$ и вертикальные W скорости OB-звезд. Показанная на рис. 4b кривая вращения Галактики построена с параметрами, указанными в первой колонке табл. 1. Как на рис. 2, так и на рис. 4 не видно влияния спиральной волны плотности, которое можно ожидать при анализе молодых звезд. Поэтому в настоящей работе мы не включили в кинематическую модель члены, описывающие возмущения от галактической спиральной волны плотности.

Параметры модели, найденные по OB-звездам с использованием данных из каталога Gaia DR2, отражены в табл. 2, а с использованием данных из каталога Gaia EDR3 — в табл. 3 и 4. Результаты получены при ограничениях либо на ошибки расстояний σ_r/r, либо на ошибки параллаксов

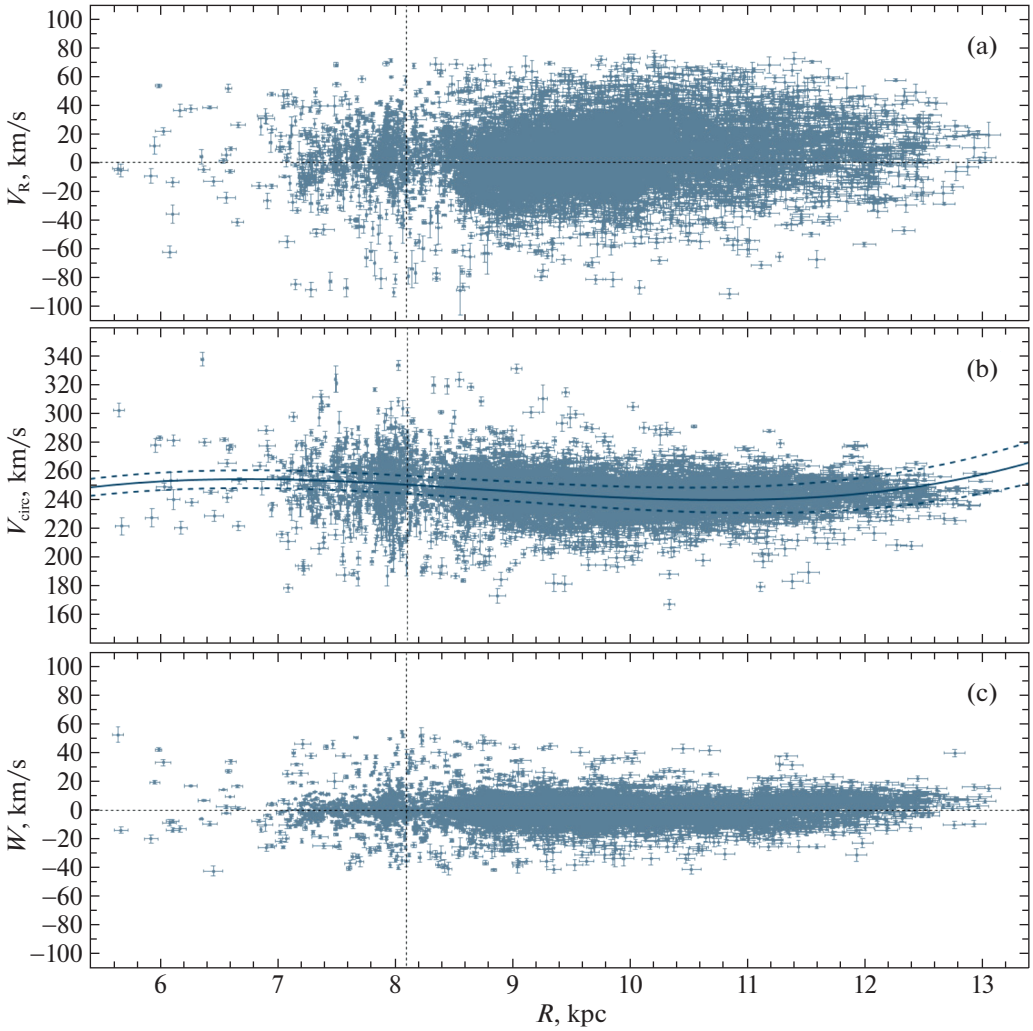

Рис. 4. Радиальные скорости OB-звезд, V_R, в зависимости от расстояния R (a), круговые скорости $V_{\rm circ}$ звезд этой выборки (b) и их вертикальные скорости W (c), вертикальной линией отмечено положение Солнца.

σ_π/π. В первом случае, как уже было отмечено (табл. 1), кинематические параметры мало зависят от ограничения на относительную ошибку фотометрического расстояния. Во втором случае сильно меняется радиус выборки, что может оказывать влияние на характер кинематических параметров. Например, значение второй производной угловой скорости вращения Галактики, Ω_0'', более уверенно определяется с использованием более далеких от Солнца звезд (табл. 2). Отметим, что в табл. 3 отсутствует решение, полученное только по лучевым скоростям с использованием фотометрических расстояний — такие результаты отражены в средней части табл. 1.

Наиболее интересным мы считаем решение, которое получено по одиночным OB-звездам с фотометрическими расстояниями, отобранными при условии $\sigma_r/r < 10\%$, с использованием собственных движений из каталога Gaia EDR3 (первый столбец нижней части табл. 3). В этом решении найдены скорости $(U_\odot, V_\odot, W_\odot,) = (9.63, 9.93, 7.45) \pm (0.27, 0.34, 0.10)$ км/с, а также:

$$\Omega_0 = 29.20 \pm 0.18 \text{ км/с/кпк}, \quad (20)$$
$$\Omega_0' = -4.150 \pm 0.046 \text{ км/с/кпк}^2,$$
$$\Omega_0'' = 0.795 \pm 0.018 \text{ км/с/кпк}^3,$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 9.56$ км/с и $V_0 = 236.5 \pm 3.3$ км/с (для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). Это решение представляет интерес, благодаря а) использованию оригинальных оценок фотометрических расстояний до звезд, а также использованию б) высокоточных собственных движений OB-звезд. Отметим, что все параметры решения (20) находятся в очень хорошем согласии с решением, полученным практически по этим же звездам с использованем тригонометрических параллаксов из каталога Gaia EDR3, которое

Таблица 2. Кинематические параметры, найденные по OB-звездам на основе всех трех условных уравнений (3)–(5), даны в верхней части таблицы; только по лучевым скоростям LAMOST на основе уравнения (3) даны в средней части таблицы; только по собственным движениям из каталога Gaia DR2 на основе двух уравнений (4)–(5) даны в нижней части таблицы; расстояния до звезд вычислены на основе параллаксов из каталога Gaia DR2; $N_\star$ — количество использованных звезд, $\overline{r}$ — средний радиус выборки

Параметры	$\sigma_\pi/\pi < 10\%$	$\sigma_\pi/\pi < 15\%$	$\sigma_\pi/\pi < 20\%$	$\sigma_\pi/\pi < 30\%$
$N_\star$	6979	9352	10356	10750
$\overline{r}$, кпк	1.84	2.24	2.42	2.48
$U_\odot$, км/с	11.85 ± 0.22	13.11 ± 0.19	13.27 ± 0.18	13.26 ± 0.18
$V_\odot$, км/с	10.60 ± 0.33	10.95 ± 0.31	11.42 ± 0.32	11.38 ± 0.31
$W_\odot$, км/с	7.86 ± 0.19	8.28 ± 0.17	8.18 ± 0.16	8.17 ± 0.16
Ω_0, км/с/кпк	28.65 ± 0.19	28.76 ± 0.16	28.51 ± 0.15	28.43 ± 0.15
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.019 ± 0.049	-3.918 ± 0.037	-3.839 ± 0.035	-3.825 ± 0.034
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.688 ± 0.023	0.625 ± 0.013	0.601 ± 0.011	0.594 ± 0.011
σ_0, км/с	15.34	15.92	16.06	16.10
V_0, км/с	232.1 ± 3.8	232.9 ± 3.2	230.9 ± 3.1	230.3 ± 3.1
$U_\odot$, км/с	12.49 ± 0.33	13.79 ± 0.29	14.24 ± 0.27	14.34 ± 0.27
$V_\odot$, км/с	11.07 ± 0.59	10.78 ± 0.57	11.03 ± 0.57	11.10 ± 0.57
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.342 ± 0.111	-4.167 ± 0.088	-4.136 ± 0.084	-4.110 ± 0.083
Ω_0'', км/с/кпк^3	1.237 ± 0.077	1.046 ± 0.048	1.005 ± 0.043	0.980 ± 0.042
σ_0, км/с	21.43	21.82	22.07	22.20
$U_\odot$, км/с	9.95 ± 0.33	10.50 ± 0.31	10.46 ± 0.18	10.43 ± 0.30
$V_\odot$, км/с	9.30 ± 0.41	11.07 ± 0.35	11.36 ± 0.34	11.31 ± 0.34
$W_\odot$, км/с	7.96 ± 0.14	8.37 ± 0.12	8.29 ± 0.12	8.25 ± 0.12
Ω_0, км/с/кпк	29.14 ± 0.20	29.47 ± 0.17	29.23 ± 0.17	29.28 ± 0.17
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.220 ± 0.056	-4.050 ± 0.040	-3.988 ± 0.037	-3.990 ± 0.036
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.719 ± 0.023	0.637 ± 0.012	0.623 ± 0.011	0.620 ± 0.010
σ_0, км/с	10.96	11.40	11.50	11.55
V_0, км/с	236.1 ± 3.3	238.7 ± 3.3	236.7 ± 3.2	237.1 ± 3.2
$(\Omega_0')_{V_l}/(\Omega_0')_{V_r}$	0.97 ± 0.01	0.97 ± 0.01	0.96 ± 0.01	0.97 ± 0.01

дано в первой колонке нижней части табл. 4. При этом в решении (20) было получено меньшее значение ошибки единицы веса σ_0.

Коэффициент шкалы расстояний

В последних строках табл. 1–4 дано отношение значений первой производной угловой скорости вращения Галактики, найденной только с использованием собственных движений к найденной только по лучевым скоростям. Отношение этих величин, следуя работам Заболотских и др. (2002) и Расторгуева и др. (2017), называем коэффициентом шкалы расстояний $p = (\Omega_0')_{V_l}/(\Omega_0')_{V_r}$. Этот коэффициент является поправочным множителем

Таблица 3. Кинематические параметры, найденные по ОВ-звездам на основе всех трех условных уравнений (3)–(5), даны в верхней части таблицы; только по собственным движениям из каталога Gaia EDR3 на основе двух уравнений (4)–(5) даны в нижней части таблицы; расстояния до звезд фотометрические; $N_\star$ — количество использованных звезд, $\overline{r}$ — средний радиус выборки

Параметры	$\sigma_r/r < 10\%$	$\sigma_r/r < 15\%$	$\sigma_r/r < 20\%$	$\sigma_r/r < 30\%$
$N_\star$	9418	9628	9753	9793
$\overline{r}$, кпк	1.97	2.18	2.20	2.25
$U_\odot$, км/с	13.63 ± 0.17	13.87 ± 0.16	13.86 ± 0.16	13.96 ± 0.16
$V_\odot$, км/с	10.85 ± 0.31	11.50 ± 0.30	11.50 ± 0.29	11.52 ± 0.29
$W_\odot$, км/с	7.35 ± 0.16	6.95 ± 0.14	6.91 ± 0.15	6.94 ± 0.15
Ω_0, км/с/кпк	31.05 ± 0.17	30.78 ± 0.16	30.75 ± 0.16	30.86 ± 0.16
Ω'_0, км/с/кпк^2	-4.349 ± 0.043	-4.181 ± 0.038	-4.169 ± 0.038	-4.180 ± 0.038
Ω''_0, км/с/кпк^3	0.840 ± 0.020	0.749 ± 0.015	0.744 ± 0.015	0.744 ± 0.015
σ_0, км/с	14.76	15.03	15.16	15.32
V_0, км/с	251.5 ± 3.4	249.3 ± 3.3	249.1 ± 3.3	250.0 ± 3.4
$U_\odot$, км/с	9.63 ± 0.27	9.47 ± 0.25	9.40 ± 0.25	9.37 ± 0.25
$V_\odot$, км/с	9.93 ± 0.34	10.89 ± 0.32	11.00 ± 0.32	11.01 ± 0.32
$W_\odot$, км/с	7.45 ± 0.10	7.09 ± 0.10	7.05 ± 0.10	7.04 ± 0.10
Ω_0, км/с/кпк	29.20 ± 0.18	28.91 ± 0.17	28.84 ± 0.17	28.80 ± 0.17
Ω'_0, км/с/кпк^2	-4.150 ± 0.046	-3.965 ± 0.040	-3.942 ± 0.040	-3.936 ± 0.040
Ω''_0, км/с/кпк^3	0.795 ± 0.018	0.711 ± 0.014	0.703 ± 0.014	0.702 ± 0.014
σ_0, км/с	9.56	9.77	9.80	9.82
V_0, км/с	236.5 ± 3.3	234.1 ± 3.2	233.6 ± 3.2	233.3 ± 3.2
$(\Omega'_0)_{V_l}/(\Omega'_0)_{V_r}$	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01	0.86 ± 0.01

вида $p = r/r_{\rm true}$, где r — используемые расстояния, а $r_{\rm true}$ — истинные расстояния, т.о., $r_{true} = r/p$. Ошибка коэффициента p вычислена на основе соотношения $\sigma_p^2 = (\sigma_{\Omega'_{0V_l}}/\Omega'_{0V_r})^2 + (\Omega'_{0V_l} \times \sigma_{\Omega'_{0V_r}}/\Omega'^2_{0V_r})^2$.

Значение $p = 0.86$, указанное в табл. 1, означает, что фотометрические расстояния Сяна и др. (2021) необходимо удлинить на 14%. Значение $p = 0.86$ подтверждается и результатами анализа собственных движений каталога Gaia EDR3 (табл. 3). Близкое к единице значение p =0.96–97, указанное в табл. 2, говорит об отсутствии необходимости удлинять шкалу расстояний, основанную на тригонометрических параллаксах каталога Gaia DR2. Не сильно отличаются от единицы и значения p =0.93–92, указанные в табл. 4.

Эллипсоид остаточных скоростей ОВ-звезд

В результате МНК-решения системы условных уравнений вида (9)–(14) и последующего анализа определены дисперсии остаточных скоростей ОВ-звезд, вычисленные через корни векового уравнения (15):

$$\sigma_1 = 18.29 \pm 0.27 \text{ км/с}, \quad (21)$$
$$\sigma_2 = 11.75 \pm 0.29 \text{ км/с},$$
$$\sigma_3 = 8.06 \pm 0.17 \text{ км/с},$$

а ориентация этого эллипсоида такова

$$L_1 = 83.7 \pm 1.5^\circ, \quad B_1 = -1.0 \pm 0.6^\circ, \quad (22)$$

Таблица 4. Кинематические параметры, найденные по OB-звездам на основе всех трех условных уравнений (3)–(5), даны в верхней части таблицы; только по лучевым скоростям LAMOST на осное уравнения (3) даны в средней части таблицы; только по собственным движениям из каталога Gaia EDR3 на основе двух уравнений (4)–(5) даны в нижней части таблицы; расстояния до звезд вычислены на основе параллаксов из каталога Gaia EDR3; $N_\star$ — количество использованных звезд, $\overline{r}$ — средний радиус выборки

Параметры	$\sigma_r/r < 10\%$	$\sigma_r/r < 15\%$	$\sigma_r/r < 20\%$	$\sigma_r/r < 30\%$
$N_\star$	9880	10545	10711	10821
$\overline{r}$, кпк	2.10	2.20	2.22	2.22
$U_\odot$, км/с	13.60 ± 0.17	13.72 ± 0.17	13.70 ± 0.17	13.73 ± 0.16
$V_\odot$, км/с	11.20 ± 0.30	11.24 ± 0.30	11.40 ± 0.31	11.31 ± 0.31
$W_\odot$, км/с	7.75 ± 0.16	7.65 ± 0.15	7.60 ± 0.16	7.58 ± 0.15
Ω_0, км/с/кпк	30.22 ± 0.17	30.16 ± 0.16	30.07 ± 0.16	30.09 ± 0.16
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.160 ± 0.040	-4.136 ± 0.039	-4.106 ± 0.039	-4.110 ± 0.039
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.744 ± 0.016	0.731 ± 0.015	0.720 ± 0.015	0.720 ± 0.015
σ_0, км/с	15.20	15.45	15.43	15.43
V_0, км/с	244.8 ± 3.3	244.3 ± 3.3	243.6 ± 3.3	243.7 ± 3.3
$U_\odot$, км/с	14.58 ± 0.28	14.73 ± 0.27	14.78 ± 0.27	14.80 ± 0.27
$V_\odot$, км/с	11.65 ± 0.58	11.58 ± 0.58	11.65 ± 0.58	11.64 ± 0.58
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.431 ± 0.096	-4.444 ± 0.092	-4.439 ± 0.092	-4.437 ± 0.092
Ω_0'', км/с/кпк^3	1.088 ± 0.063	1.093 ± 0.057	1.087 ± 0.057	1.083 ± 0.056
σ_0, км/с	21.00	22.39	22.48	22.47
$U_\odot$, км/с	9.67 ± 0.28	9.53 ± 0.27	9.37 ± 0.27	9.42 ± 0.27
$V_\odot$, км/с	9.84 ± 0.34	10.09 ± 0.33	10.13 ± 0.33	9.99 ± 0.33
$W_\odot$, км/с	7.89 ± 0.11	7.75 ± 0.11	7.72 ± 0.11	7.68 ± 0.10
Ω_0, км/с/кпк	29.12 ± 0.18	29.02 ± 0.17	28.92 ± 0.17	28.97 ± 0.17
Ω_0', км/с/кпк^2	-4.139 ± 0.044	-4.085 ± 0.041	-4.064 ± 0.041	-4.079 ± 0.041
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.756 ± 0.016	0.732 ± 0.014	0.726 ± 0.014	0.729 ± 0.014
σ_0, км/с	10.22	10.36	10.40	10.45
V_0, км/с	236.0 ± 3.2	235.1 ± 3.2	234.3 ± 3.2	234.6 ± 3.2
$(\Omega_0')_{V_l}/(\Omega_0')_{V_r}$	0.93 ± 0.01	0.92 ± 0.01	0.92 ± 0.01	0.92 ± 0.01

$$L_2 = 173.7 \pm 3.5^\circ, \quad B_2 = -1.8 \pm 1.0^\circ,$$
$$L_3 = 144.2 \pm 1.5^\circ, \quad B_3 = 88.0 \pm 2.0^\circ.$$

Очевидно (см. рис. 2), что ориентация первых двух осей обусловлена особенностями выборки, в частности отсутствием звезд в четвертом квадранте. Интересно отметить значение $B_3 = 88.0 \pm 2.0^\circ$, что в пределах неопределенности уровня 1σ говорит об отсутствии значительных неучтенных возмущений, так как третья ось практически направлена в северный полюс Галактики. Для OB-звезд здесь были использованы фотометрические расстояния ($\sigma_r/r < 10\%$), лучевые скорости LAMOST и собственные движения из каталога Gaia EDR3.

Применение лучевых скоростей увеличивает дисперсию пространственных скоростей и приво-

дит к смещенной оценке значения скорости $U_\odot$. Мы повторили анализ остаточных скоростей OB-звезд без использования их лучевых скоростей. По-прежнему здесь используем фотометрические расстояния OB-звезд и собственные движения из каталога Gaia EDR3. Теперь ищем МНК-решение системы только трех условных уравнений вида (9)–(11). В итоге найдены следующие дисперсии остаточных скоростей OB-звезд:

$$\sigma_1 = 14.98 \pm 0.08 \text{ км/с}, \quad (23)$$
$$\sigma_2 = 8.86 \pm 0.05 \text{ км/с},$$
$$\sigma_3 = 7.58 \pm 0.04 \text{ км/с},$$

и параметры ориентации этого эллипсоида

$$L_1 = 80.2 \pm 0.1^\circ, \quad B_1 = +8.9 \pm 0.1^\circ, \quad (24)$$
$$L_2 = 170.2 \pm 0.1^\circ, \quad B_2 = +0.1 \pm 0.1^\circ,$$
$$L_3 = 260.8 \pm 0.1^\circ, \quad B_3 = 81.1 \pm 0.1^\circ.$$

Видим, что по сравнению с результатами (21) и (22) уменьшились значения дисперсий $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, существенно уменьшились ошибки определения всех параметров. Кроме того, здесь имеют место значимо отличающиеся от нуля величины B_1 и B_3. По нашему мнению, в решениях (21)–(22) из-за больших ошибок определения параметров тонкости ориентации эллипсоида скоростей могут быть замыты. Параметры (24) показывают, что эллипсоид остаточных скоростей OB-звезд наклонен к плоскости Галактики. Такой наклон может быть связан с какими-либо возмущениями в вертикальном направлении. Но, скорее всего, здесь сказывается неоднородное пространственное распределение звезд (рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Бобылева, Байковой (2019) была проанализирована кинематика OB-звезд с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2. Отбор этих OB-звезд осуществлен в работе Сюя и др. (2018). По 5335 OB-звездам, к параллаксам которых нами была прибавлена поправка $\Delta\pi = 0.050$ мсд, из решения только уравнений вида (4) найдены $(U_\odot, V_\odot) = (6.53, 7.27) \pm (0.24, 0.31)$ км/с, а также: $\Omega_0 = 29.70 \pm 0.11$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -4.035 \pm 0.031$ км/с/кпк^2, $\Omega_0'' = 0.620 \pm 0.014$ км/с/кпк^3, где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 12.33$ км/с, а линейная скорость вращения Галактики на солнечном расстоянии $V_0 = 237.6 \pm 4.5$ км/с (для принятого значения $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк). Сравнение одноименных параметров этого решения с теми, что даны в нижней части табл. 2, говорит об отличном их согласии. Это неудивительно, так как выборки отличаются в основном способом учета систематической поправки к тригонометрическим параллаксам каталога Gaia DR2.

Отметим работу Бобылева, Байковой (2022), где по собственным движениям 9720 OB-звезд найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_\odot = (7.21, 7.46, 8.52) \pm (0.13, 0.20, 0.10)$ км/с, а также $\Omega_0 = 29.712 \pm 0.062$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -4.014 \pm 0.018$ км/с/кпк^2 и $\Omega_0'' = 0.674 \pm 0.009$ км/с/кпк^3. По собственным движениям этих OB-звезд определены дисперсии остаточных скоростей $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (11.79, 9.66, 7.21) \pm (0.06, 0.05, 0.04)$ км/с, и 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, $B_3 = 87.7 \pm 0.1^\circ$. Была использована выборка OB2-звезд из работы Сюя и др. (2021) с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia EDR3.

Наиболее интересно отметить решение, найденное в работе Бобылева, Байковой (2022) по 1726 OB2-звездам с лучевыми скоростями и собственными движениями: $(U, V, W)_\odot = (7.17, 10.03, 8.15) \pm (0.30, 0.35, 0.29)$ км/с, $\Omega_0 = 29.22 \pm 0.19$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -3.885 \pm 0.042$ км/с/кпк^2 и $\Omega_0'' = 0.685 \pm 0.031$ км/с/кпк^3, где $\sigma_0 = 12.2$ км/с. Здесь были использованы значения лучевых скоростей, которые скопированы Сюем и др. (2021) из электронной базы SIMBAD[1]. При решении только уравнения (3), так же как и в настоящей работе, ошибка единицы веса составляет около 25 км/с. Сравнение параметров этого решения, например, с теми, что указаны в первой колонке верхней части табл. 4, говорит о том, что использование лучевых скоростей из каталога LAMOST в совместном решении приводит к смещению оценки скорости $U_\odot$ примерно на 6 км/с.

Мы провели модельное удлиннение шкалы фотометрических расстояний. Результаты отражены на рис. 5, где даны расстояния до OB-звезд, вычисленные через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3, в зависимости от фотометрических с разным коэффициентом p. Анализ рисунка показывает, что лучшее согласие между фотометрическими расстояниями и тригонометрической шкалой каталога Gaia EDR3 достигается при увеличении фотометрических расстояний на 10% (рис. 5а). Таким образом, имеем принципиальное согласие между анализом собственных движений и лучевых скоростей (табл. 1 и 3) и непосредственным сравнением расстояний (рис. 5), которое

[1] http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/

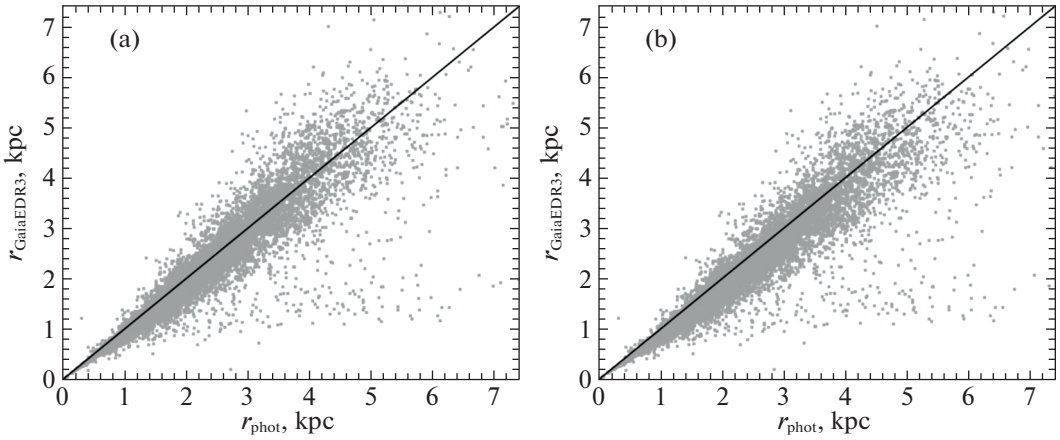

Рис. 5. Расстояния r до OB-звезд, вычисленные через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3, в зависимости от фотометрических, увеличенных на 10% (a), и расстояния, вычисленные через параллаксы каталога Gaia EDR3, в зависимости от фотометрических, увеличенных на 15% (b), на каждой панели дана диагональная линия совпадения.

показывает необходимость удлиннения фотометрических расстояний Сяна и др. (2021) примерно на 10%.

При анализе рис. 5 по умолчанию полагалось, что шкала расстояний каталога Gaia EDR3 точна. Однако известно, что относительно инерциальной системе координат тригонометрические параллаксы Gaia EDR3 имеют небольшое смещение $\Delta\pi$, значение которой колеблется от -0.015 мсек. дуги (Гроеневеген, 2021) до -0.039 мсек. дуги (Зинн, 2021). Такую поправку необходимо добавлять к измеренным параллаксам, поэтому истинные расстояния до звезд должны уменьшиться. Значение поправки сильно зависит от звездной величины, простыми методами полностью она не исключается.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена кинематика большой выборки OB-звезд, для которых в работе Сяна и др. (2021) были определены фотометрические расстояния по данным в ближнем инфракрасном диапазоне. Мы отождествили около 15 000 OB-звезд с каталогом Gaia EDR3. В итоге проанализированы OB-звезды, для которых имеются фотометрические оценки расстояний, лучевые скорости из каталога LAMOST, тригонометрические параллаксы и собственные движения из каталогов Gaia DR2 и Gaia EDR3. При этом основная наша выборка содержит примерно 10 000 одиночных OB-звезд с относительными ошибками определения их расстояний менее 10%. В настоящей работе были рассмотрены OB-звезды, расположенные не далее 5 кпк от Солнца, со средним расстоянием около 2 кпк.

Показано, что при поиске кинематических параметров использование лучевых скоростей приводит к значительному увеличению дисперсии пространственных скоростей. Это, например, приводит к смещенной (на $\approx$3 км/с) оценке значения скорости $U_\odot$. Среднее же значение дисперсии остаточных скоростей OB-звезд, вычисленное только по лучевым скоростям, составляет около 22 км/с, что примерно в два раза превышает аналогичное значение, найденное по их собственным движениям. Поэтому оценку параметров вращения Галактики выгоднее проводить только по собственным движениям из каталога Gaia.

Наиболее интересным мы считаем решение, полученное по одиночным OB-звездам без использования лучевых скоростей — с фотометрическими расстояниями и собственными движениями из каталога Gaia EDR3. В этом решении найдены скорости $(U_\odot, V_\odot, W_\odot,) = (9.63, 9.93, 7.45) \pm$ $\pm\,(0.27, 0.34, 0.10)$ км/с, а также: $\Omega_0 = 29.20 \pm$ $\pm\,0.18$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -4.150 \pm 0.046$ км/с/кпк^2 и $\Omega_0'' = 0.795 \pm 0.018$ км/с/кпк^3, где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 9.56$ км/с и $V_0 = 236.5 \pm$ $\pm\,3.3$ км/с (для принятого расстояния $R_0 =$ $= 8.1 \pm 0.1$ кпк). Эллипсоид остаточных скоростей этих OB-звезд имеет следующие значения главных осей: $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (15.13, 9.69, 7.98) \pm$ $\pm\,(0.07, 0.05, 0.04)$ км/с, эллипсоид наклонен к галактической плоскости.

Рассмотрены три шкалы расстояний: а) фотометрические расстояния Сяна и др. (2021), б) тригонометрические параллаксы каталога Gaia DR2 и в) тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3. Показано, что фотометрические расстояния и расстояния, вычисленные на основе параллаксов каталога Gaia EDR3, находятся в

хорошем согласии вплоть до расстояний от Солнца 4–5 кпк. Различные методы анализа шкал показали, что фотометрические расстояния Сяна и др. (2021) необходимо удлинить примерно на 10%.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бил, Овенден (J. Byl and M.W. Ovenden), Astrophys. J. **225**, 496 (1978).
2. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 739 (2018) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. **44**, 676 (2018)].
3. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 379 (2019) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. **45**, 331 (2019)].
4. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Rep. **65**, 498 (2021)].
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **99**, 267 (2022) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Rep. **66**, No. 4 (2022)].
6. Бранхэм (R.L. Branham), Astrophys. J. **570**, 190 (2002).
7. Бранхэм (R.L. Branham), Mon. Not. R. Astron. Soc. **370**, 1393 (2006).
8. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
9. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevely, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **649**, 1 (2021).
10. Вегнер (W. Wegner), Mon. Not. R. Astron. Soc. **319**, 771 (2000).
11. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **38**, 776 (2012) [G.A. Gontcharov, Astron. Lett. **38**, 694 (2012)].
12. Гроеневеген (M.A.T. Groenewegen), Astron. Astrophys. **654**, A20 (2021).
13. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 68 (2001) [A.K. Dambis, et al., Astron. Lett. **27**, 58 (2001)].
14. Жоржелен, Жоржелен (Y.M. Georgelin and Y.P. Georgelin), Astron. Astrophys. **49**, 57 (1976).
15. Жу (Z. Zhu), Chin. J. Astron. Astrophys. **6**, 363 (2006).
16. Заал и др. (P.A. Zaal, A. de Koter, and L.B.F.M. Waters), Astron. Astrophys. **366**, 241 (2001).
17. Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К., Письма в Астрон. журн. **28**, 516 (2002) [M.V. Zabolotskikh, et al., Astron. Lett. **28**, 454 (2002)].
18. де Зев и др. (P.T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, and J.H.J. de Bruijne), Astron. J. **117**, 354 (1999).
19. Зинн (J.C. Zinn), Astron. J. **161**, 214 (2021).
20. Лю и др. (Z. Liu, W. Cui, C. Liu, Y. Huang, G. Zhao, and B. Zhang), Astrophys. J. Suppl. Ser. **241**, 32 (2019).
21. Маис-Апельяниз и др. (J. Maiz Apellániz, N.R. Walborn, H.A. Galué, and L.H Wei), Astrophys. J. Suppl. Ser. **151**, 103 (2004).
22. Маис-Апельяниз и др. (J. Maiz Apellániz, A. Sota, J.I. Arias, R.H. Barbá, N.R. Walborn, S. Simón-Diaz, I. Negueruela, A. Marco, J.R.S. Leão, et al.), Astrophys. J. Suppl. Ser. **224**, 4 (2016).
23. Мельник, Дамбис (A.M. Mel'nik and A.K. Dambis), Mon. Not. R. Astron. Soc. **400**, 518 (2009).
24. Мельник, Дамбис (A.M. Mel'nik and A.K. Dambis), Mon. Not. R. Astron. Soc. **472**, 3887 (2017).
25. Мельник, Дамбис (A.M. Melnik and A.K. Dambis), Astrophys. Space Science **365**, 112 (2020).
26. Миямото, Жу (M. Miyamoto and Z. Zhu), Astron. J. **115**, 1483 (1998).
27. Ogorodnikov K.F., *Dynamics of stellar systems* (Oxford: Pergamon, ed. Beer, A. 1965).
28. Оорт (J.H. Oort), Bull. Astron. Inst. Netherland. **3**, 275 (1927).
29. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), Astron. Astrophys. **445**, 545 (2006).
30. Попова М.Э., Локтин А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 743 (2005) [M.E. Popova, A.V. Loktin, Astron. Lett. **31**, 663 (2005)].
31. Прусти и др., (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, et al.), Astron. Astrophys. **595**, 1 (2016).
32. Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюллетень **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., Astrophys. Bulletin **72**, 122 (2017)].
33. Рид (B.C. Reed), PASP **107**, 907 (1995).
34. Руссейль (D. Russeil), Astron. Astrophys. **397**, 133 (2003).
35. Сота и др. (A. Sota, J. Maiz Apellániz, N.R. Walborn, E.J. Alfaro, R.H. Barbá, N.I. Morrell, R.C. Gamen, and J.I. Arias), Astrophys. J. Suppl. Ser. **193**, 24 (2011).
36. Скиф (B.A. Skiff), VizieR Online Data Catalog, B/mk (2014).
37. Сюй и др. (Y. Xu, S.B. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, B. Zhang, Q.Z. Yan, T.M. Dame, K.M. Menten, et al.), Astron. Astrophys. **616**, L15 (2018).
38. Сюй и др. (Y. Xu, L.G. Hou, S. Bian, C.J. Hao, D.J. Liu, J.J. Li, and Y.J. Li), Astron. Astrophys. **645**, L8 (2021).
39. Сян и др. (M.-S. Xiang, X.-W. Liu, H.-B. Yuan, Z.-Y. Huo, Y. Huang, C. Wang, B.-Q. Chen, J.-J. Ren, et al.), Mon. Not. R. Astron. Soc. **467**, 1890 (2017).
40. Сян и др. (M. Xiang, H.-W. Rix, Y.-S. Ting, E. Zari, K. El-Badry, H.-B. Yuan, and W.-Y. Cui), Astrophys. J. Suppl. Ser. **253**, 22 (2021).

41. Тецлаф и др. (N. Tetzlaff, R. Neuhäuser, and M.M. Hohle), Mon. Not. R. Astron. Soc. **410**, 190 (2011).
42. Торра и др. (J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras), Astron. Astrophys. **359**, 82 (2000).
43. Уемура и др. (M. Uemura, H. Ohashi, T. Hayakawa, E. Ishida, T. Kato, and R. Hirata), Publ. Astron. Soc. Japan **52**, 143 (2000).
44. Фернандес и др. (D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra), Astron. Astrophys. **372**, 833 (2001).
45. Фрогель, Стозерс (J.A. Frogel and R. Stothers), Astron. J. **82**, 890 (1977).
46. Чен и др. (B.-Q. Chen, Y. Huang, L.-G. Hou, H. Tian, G.-X. Li, H.-B. Yuan, H.-F. Wan, C. Wang, et al.), Mon. Not. R. Astron. Soc. **487**, 1400 (2019).
47. Цуй и др. (X.-Q. Cui, Y.-H. Zhao, Y.-Q. Chu, G.-P. Li, Q. Li, L.-P. Zhang, H.J. Su, Z.-Q. Yao, et al.), Research Astron. Astrophys. **12**, 1197 (2012).
48. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP–1200 (1997).