

УДК 524.6-34

## КИНЕМАТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОЛОДЫХ ЗВЕЗД СРЕДНИХ И МАЛЫХ МАСС ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

© 2020 г. В. В. Бобылев<sup>1, \*</sup>, А. Т. Байкова<sup>1</sup><sup>1</sup> Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: vbobylev@gaoran.ru

Поступила в редакцию 10.06.2020 г.

После доработки 13.08.2020 г.

Принята к публикации 15.08.2020 г.

Изучены кинематические свойства молодых звезд, еще не достигших стадии главной последовательности. Отбор этих звезд был осуществлен по данным каталога Gaia DR2 с привлечением ряда фотометрических инфракрасных обзоров. С использованием 4564 звезд с ошибками параллакса менее 20% найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики:  $\Omega_0 = 28.84 \pm 0.10$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -4.063 \pm 0.029$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.766 \pm 0.020$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где значения постоянных Орта составляют  $A = 16.25 \pm 0.33$  км/с/кпк и  $B = -12.58 \pm 0.34$  км/с/кпк. Круговая скорость вращения окколосолнечной окрестности вокруг центра Галактики равна  $V_0 = 230.7 \pm 4.4$  км/с для принятого расстояния Солнца до галактического центра  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк. Показано, что дисперсия остаточных скоростей рассмотренных звезд мала, что говорит об их чрезвычайной молодости. Среднее по трем координатам значение дисперсии остаточных скоростей для звезд Хербига Ae/Be составляет около 11 км/с, а для звезд типа Т Тельца — около 7 км/с.

DOI: 10.31857/S0004629920120038

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Среди звезд, не достигших стадии главной последовательности, есть как звезды промежуточной массы ((2–8)  $M_\odot$ ), т.е. звезды Хербига Ae/Be, так и менее массивные звезды типа Т Тельца с массой  $< 2 M_\odot$ . Для изучения структуры и кинематики диска Галактики такие звезды представляют большой интерес благодаря своей исключительной молодости. Однако еще недавно необходимые для анализа астрометрические данные были известны лишь для нескольких сотен таких звезд, расположенных в области пояса Гулда, т.е. вблизи Солнца.

В этом отношении ситуация резко изменилась с появлением каталога Gaia DR2 [1, 2], который содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.3 млрд. звезд. Для относительно небольшой доли этих звезд измерены их лучевые скорости. В каталоге Gaia [3] фотометрические измерения представлены в двух широких полосах, поэтому возможна только очень грубая классификация звезд. Для надежной классификации необходимо привлекать более точные спектральные и фотометрические данные из других источников. По данным каталога Gaia DR2 выполнен ряд важных исследований, связанных с кинематикой различных галактических подсистем.

В настоящее время известны несколько выборок из каталога Gaia DR2 молодых звезд, еще не

достигших стадии главной последовательности. Например, в работе [4] были отобраны из каталога Gaia DR2 по кинематическим и фотометрическим данным более 40 000 звезд типа Т Тельца. Все эти звезды расположены не далее 500 пк от Солнца, и тесно связаны с поясом Гулда. Их пространственные и кинематические свойства детально изучены в работе [5].

Более миллиона кандидатов в молодые звездные объекты, расположенные в областях активного звездообразования, выделены в работе [6]. Для этого данные Gaia DR2 были скомбинированы с инфракрасной фотометрией 2MASS [7] и WISE [8, 9] с привлечением результатов эксперимента Planck [10] о межзвездном поглощении. Рассматривались четыре класса объектов: молодые звездные объекты, внегалактические объекты, звезды главной последовательности и проэволюционировавшие звезды. Более 25 000 объектов являются маломассивными звездами, не достигшими стадии главной последовательности. Их кинематические свойства проанализированы в работе [11], где были получены оценки параметров вращения Галактики.

Отличная от [6] методика отбора из каталога Gaia DR2 звезд, не достигших стадии главной последовательности, предложена в работе [12]. Здесь фотометрические измерения из каталога Gaia DR2 используются в комбинации с данными

инфракрасных обзоров 2MASS, WISE, IPHAS [13, 14] и VPHAS+ [15]. При этом среди 8000 кандидатов только для половины астрометрические измерения имеют высокую точность (в основном мала ошибка параллакса). Кроме того, эти авторы нашли, что доля общих звезд с выборкой из работы [6] не превышает 50%.

Целью настоящей работы является уточнение параметров вращения Галактики по выборке молодых звезд из работы [12], а также определение параметров эллипсоида остаточных скоростей этих звезд. Для отбора звезд в работе [12] использовались только данные многополосной фотометрии, поэтому подтверждение молодости этих звезд на основе кинематического анализа является актуальной задачей.

## 2. ДАННЫЕ

Отбор молодых звезд в работе [12] был осуществлен с использованием методов машинного обучения по данным каталога Gaia DR2 с привлечением фотометрических измерений из инфракрасных обзоров 2MASS, WISE, IPHAS и VPHAS+. Всего ими выделено 4 150 983 объектов. В настоящей работе используются звезды из выборок PMS, CBe и EITHER, члены которых имеют высокую вероятность принадлежности к ним.

Отметим, что основой для классификационного отбора звезд в работе [12] является анализ 48 фотометрических разностей. Они вычислены по данным каталога Gaia DR2, где фотометрические полосы  $G_{BP}$ ,  $G$  и  $G_{RP}$  имеют средние значения длины волны 0.50, 0.59 и 0.77 мкм соответственно, полосы  $r$  и  $H_\alpha$  из каталогов IPHAS и VPHAS+ соответственно 0.62 и 0.66 мкм, полосы  $J$ ,  $H$  и  $K_s$  из каталога 2MASS — 1.24, 1.66 и 2.16 мкм соответственно, полосы  $W1$ ,  $W2$ ,  $W3$  и  $W4$  из каталога WISE — 3.4, 4.6, 12 и 22 мкм соответственно. Поэтому при отборе исходных данных большое значение этими авторами было уделено качеству фотометрического материала. В итоге, для ряда звезд, вошедших в рабочую выборку из 4 150 983 звезд, есть такие, для которых в каталоге Gaia DR2 отсутствуют измерения их параллакса. Кроме того, итоговая выборка имеет ограничение по галактической широте  $|b| < 5.5^\circ$ , обусловленное таким ограничением в каталогах IPHAS и VPHAS+.

Говоря о полноте, эти авторы имеют в виду полноту отбора звезд определенного вида (Herbig Ae/Be, классические Be или PMS звезды) из рабочего массива данных (из 4 150 983 звезд). На основе анализа фотометрических разностей каждой звезде была присвоена вероятность  $p$  принадлежности к каждому из рассматриваемых видов (Herbig Ae/Be, классические Be или PMS звезды).

Выборка PMS состоит из 8470 кандидатов в молодые звезды, не достигнувших главной последовательности.

По оценке [12], значение полноты этой выборки составляет 78.8%, и ее членами являются как звезды Хербига Ae/Be, так и звезды типа Т Тельца. Из трех указанных выборок это самая богатая звездами, поэтому в настоящей работе она является основной для кинематического анализа.

Выборка CBe содержит 693 кандидата в классические Be звезды. Значение ее полноты составляет 85.5%. CBe представляют собой звезды спектрального класса B, находящиеся на главной последовательности, имеющие быстрое осевое вращение и окруженные газовыми дисками. Это наиболее массивные звезды среди рассматриваемых нами.

Выборка EITHER включает 1309 звезд. В нее вошли звезды, которые имеют следующие значения вероятности  $p$ :  $(p_{PMS} + p_{CBe}) > 50\%$ , но  $p_{PMS} < 50\%$  и  $p_{CBe} < 50\%$ .

Все перечисленные выборки содержат очень молодые звезды. Между выборками нет пересечений. С целью привлечения максимального количества молодых звезд в задаче определения параметров вращения Галактики мы также сформировали объединенную выборку ALL, в которую вошли звезды трех выборок CBe, EITHER и PMS. Распределение звезд этой выборки с относительными ошибками тригонометрических параллакса менее 20% на галактической плоскости XY показано на рис. 1. На рисунке можно видеть связь со спиральной структурой. Во-первых, отчетливо виден отрезок Местного рукава (рукава Ориона), проходящий вблизи Солнца под углом около  $-15^\circ$  к оси  $Y$ , во-вторых, видна концентрация звезд вблизи рукава Персея (обозначен III) во втором галактическом квадранте, в-третьих, имеются два сгущения звезд в области отрезка рукава Киля-Стрельца (II). Интересно отметить, что в распределении кандидатов в звезды типа Т Тельца [11], отобранных в работе [6], из спиральной структуры хорошо виден только отрезок Местного рукава.

## 3. МЕТОДЫ

### 3.1. Параметры вращения Галактики

Из наблюдений нам известны три составляющие скорости звезды: лучевая 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. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а  $r = 1/\pi$  — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое мы вычисляем через параллакс звезды  $\pi$ . Компоненты собственного движения  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$  выражены в угловых мс/год.

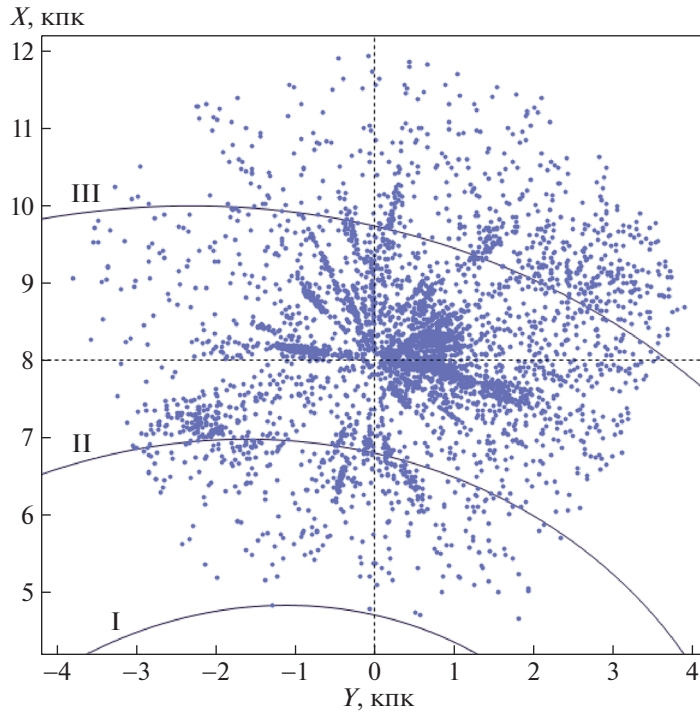


Рис. 1. Распределение звезд выборки ALL с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20% на галактической плоскости  $XY$ , спиральный узор с углом закрутки  $-13^\circ$  дан согласно работе [16].

Для определения параметров кривой галактического вращения используем уравнения, полученные из формул Боттлингера, в которых произведено разложение угловой скорости  $\Omega$  в ряд до членов второго порядка малости  $r/R_0$ . Звезд с измеренными лучевыми скоростями в наших выборках очень мало, поэтому мы для анализа используем только следующие два уравнения с собственными движениями в левых частях:

$$\begin{aligned} V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + \\ + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 + \\ + 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega''_0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \\ - W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - \\ - 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $R$  – расстояние от звезды до оси вращения Галактики (цилиндрический радиус):

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (3)$$

Величина  $\Omega_0$  является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии  $R_0$ , параметры  $\Omega'_0$  и  $\Omega''_0$  – соответствующие производные угловой скорости,  $V_0 = |R_0 \Omega_0|$ . В уравнениях (1)–(2) определяемыми являются шесть неизвестных:  $U_\odot$ ,  $V_\odot$ ,  $W_\odot$ ,  $\Omega_0$ ,  $\Omega'_0$  и  $\Omega''_0$ . Интерес представляют

также постоянные Оорта  $A$  и  $B$ , значения которых можно найти из следующих выражений:

$$A = 0.5\Omega'_0 R_0, \quad B = -\Omega_0 + A. \quad (4)$$

Кинематические параметры определяются в результате решения условных уравнений вида (1)–(2) методом наименьших квадратов. Используются веса вида  $w_l = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}$  и  $w_b = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_b}^2}$ , где  $S_0$  – “космическая” дисперсия,  $\sigma_{V_l}$  и  $\sigma_{V_b}$  – дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение  $S_0$  сопоставимо со среднеквадратической невязкой  $\sigma_0$  (ошибка единицы веса), которая вычисляется при решении условных уравнений вида (1), (2). В настоящей работе принимаемые значения  $S_0$  лежат в интервале 7–12 км/с. Система уравнений вида (1), (2) решается в несколько итераций с применением критерия  $3\sigma$  для исключения звезд с большими невязками.

### 3.2. Выбор значения $R_0$

В настоящее время выполнен ряд работ, посвященных определению среднего значения расстояния от Солнца до центра Галактики с использованием индивидуальных определений этой величины, полученных в последнее десятилетие независимыми методами. Например,  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк [17],  $R_0 = 8.4 \pm 0.4$  кпк [18] или  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк [19].

Отметим также некоторые первоклассные индивидуальные определения этой величины, сделанные в последнее время. По мазерам японской программы VERA получена оценка  $R_0 = 7.9 \pm \pm 0.3$  кпк [20]. В работе [21] из анализа 16-летнего ряда наблюдений движения звезды S2 вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики найдено  $R_0 = 8.178 \pm 0.022$  кпк. В работе [22] на основе независимого анализа орбиты звезды S2 найдено  $R_0 = 7.946 \pm 0.032$  кпк. На основе перечисленных результатов в настоящей работе мы принимаем значение  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк.

### 3.3. Вычисление расстояний

С момента публикации каталога Gaia DR2 известна проблема с тригонометрическими параллаксами Gaia DR2, а именно, необходимость поправки  $\Delta\pi$  с величиной от 0.03 до 0.05 угловых мс [2, 23]. Принимая во внимание результаты определения значения этой поправки, полученные в работах [24–26], мы должны прибавить ко всем оригинальным параллаксам звезд из каталога Gaia DR2 поправку 0.05 угловых мс, т.е.  $\pi_{\text{new}} = \pi + 0.05$  мс.

В настоящей работе обычно расстояния вычисляем через тригонометрический параллакс. Однако в работе [12], помимо параллаксов из каталога Gaia DR2, даны также расстояния, вычисленные в работе [27] с учетом особенностей в распределении звезд в Галактике. Этот метод близок к учету эффекта Лутца–Келкера [28], который можно учитывать при больших относительных ошибках параллаксов. В настоящей работе используются звезды с ошибками параллаксов менее 20%, поэтому такие поправки пренебрежимо малы. По выборке PMS для сравнения были получены кинематические параметры с использованием обеих систем расстояний.

### 3.4. Эллипсоид остаточных скоростей

Оценка дисперсий остаточных скоростей звезд производится с использованием следующего метода [29]. Рассматриваются шесть моментов второго порядка  $a, b, c, f, e, d$ :

$$\begin{aligned} a &= \langle U^2 \rangle - \langle U_{\odot}^2 \rangle, \\ b &= \langle V^2 \rangle - \langle V_{\odot}^2 \rangle, \\ c &= \langle W^2 \rangle - \langle W_{\odot}^2 \rangle, \\ f &= \langle VW \rangle - \langle V_{\odot}W_{\odot} \rangle, \\ e &= \langle WU \rangle - \langle W_{\odot}U_{\odot} \rangle, \\ d &= \langle UV \rangle - \langle U_{\odot}V_{\odot} \rangle, \end{aligned} \quad (5)$$

которые являются коэффициентами уравнения поверхности

$$ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2ezx + 2dxy = 1, \quad (6)$$

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

$$\begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для определения значений этого тензора при отсутствии данных о лучевых скоростях используются три следующих уравнения:

$$V_l^2 = a \sin^2 l + b \cos^2 l \sin^2 l - 2d \sin l \cos l, \quad (8)$$

$$V_b^2 = a \sin^2 b \cos^2 l + b \sin^2 b \sin^2 l + c \cos^2 b - 2f \cos b \sin b \sin l - \quad (9)$$

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

$$V_l V_b = a \sin l \cos l \sin b + b \sin l \cos l \sin b + f \cos l \cos b - e \sin l \cos b + d(\sin^2 l \sin b - \cos^2 l \sin b), \quad (10)$$

которые решаются методом наименьших квадратов относительно шести неизвестных  $a, b, c, f, e, d$ . Затем находятся собственные значения тензора (7)  $\lambda_{1,2,3}$  из решения векового уравнения

$$\begin{vmatrix} a - \lambda & d & e \\ d & b - \lambda & f \\ e & f & c - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (11)$$

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

$$\lambda_1 = \sigma_1^2, \quad \lambda_2 = \sigma_2^2, \quad \lambda_3 = \sigma_3^2, \quad \lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3. \quad (12)$$

Направления главных осей тензоров (11)  $L_{1,2,3}$  и  $B_{1,2,3}$  находятся из соотношений

$$\text{tg } L_{1,2,3} = \frac{ef - (c - \lambda)d}{(b - \lambda)(c - \lambda) - f^2}, \quad (13)$$

$$\text{tg } B_{1,2,3} = \frac{(b - \lambda)e - df}{f^2 - (b - \lambda)(c - \lambda)} \cos L_{1,2,3}. \quad (14)$$

## 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В верхней части табл. 1 даны результаты определения параметров галактического вращения по звездам выборки PMS. Для этого были взяты звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20% и гелиоцентрическими расстояниями менее 4 кпк. Здесь расстояния до звезд были вычислены через значение параллакса из каталога Gaia DR2 с прибавлением поправки  $\Delta\pi = 0.050$  угловых мс, тогда  $r = 1/(\pi + 0.050)$  кпк. В первом столбце таблицы дано решение, полученное по всем звездам вы-

**Таблица 1.** Кинематические параметры, найденные по звездам выборки PMS, с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20%

Параметры	Все звезды	$r > 0.5$ кпк	$r > 0.5$ кпк	$r \leq 0.5$ кпк
		$(M_G)_0 \leq 2^m$	$(M_G)_0 > 2^m$	
$U_\odot$ , км/с	$6.95 \pm 0.15$	$5.83 \pm 0.35$	$7.08 \pm 0.15$	$9.03 \pm 0.74$
$V_\odot$ , км/с	$9.56 \pm 0.24$	$9.05 \pm 0.56$	$9.74 \pm 0.29$	$11.02 \pm 1.33$
$W_\odot$ , км/с	$7.47 \pm 0.12$	$7.21 \pm 0.26$	$7.92 \pm 0.12$	$5.60 \pm 0.48$
$\Omega_0$ , км/с/кпк	$28.52 \pm 0.12$	$28.41 \pm 0.20$	$28.65 \pm 0.15$	$29.2 \pm 2.4$
$\Omega'_0$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$-4.021 \pm 0.032$	$-3.994 \pm 0.053$	$-4.106 \pm 0.038$	$-3.41 \pm 0.56$
$\Omega''_0$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$0.783 \pm 0.025$	$0.721 \pm 0.038$	$0.956 \pm 0.045$	—
$\sigma_0$ , км/с	7.3	8.6	5.9	10.1
$V_0$ , км/с	$228.1 \pm 4.4$	$227.3 \pm 4.6$	$229.2 \pm 4.5$	$234 \pm 19$
$N_*$	3981	1106	2426	449
$\sigma_1$ , км/с	$9.93 \pm 0.62$	$13.37 \pm 0.90$	$8.18 \pm 0.87$	$16.9 \pm 1.4$
$\sigma_2$ , км/с	$8.75 \pm 0.59$	$10.91 \pm 1.41$	$6.68 \pm 0.38$	$11.0 \pm 0.8$
$\sigma_3$ , км/с	$6.80 \pm 0.22$	$8.47 \pm 0.37$	$6.18 \pm 0.28$	$6.7 \pm 2.6$
$L_1, B_1$	$47^\circ, 4^\circ$	$32^\circ, -2^\circ$	$57^\circ, 13^\circ$	$33^\circ, 6^\circ$
$L_2, B_2$	$137^\circ, 6^\circ$	$122^\circ, -2^\circ$	$149^\circ, 8^\circ$	$129^\circ, 46^\circ$
$L_3, B_3$	$283^\circ, 83^\circ$	$73^\circ, 87^\circ$	$268^\circ, 75^\circ$	$298^\circ, 44^\circ$

борки PMS, во втором — по звездам из верхней части диаграммы Герцшпрунга—Рассела ( $(M_G)_0 \leq 2^m$ ), в третьем столбце — по звездам из нижней части диаграммы Герцшпрунга—Рассела ( $(M_G)_0 > 2^m$ ). Во втором и третьем столбцах таблицы даны результаты, полученные с исключением самых близких звезд ( $r > 0.5$  кпк). Наконец, в последнем столбце таблицы даны результаты, полученные по самым близким звездам ( $r \leq 0.5$  кпк). Разделение на части с границей  $(M_G)_0 = 2^m$  мы сделали так, чтобы иметь примерно равное количество звезд в выборках. Отметим, что оценки значений таких параметров, как линейная скорость вращения около Солнца  $V_0$ , а также постоянных Орта  $A$  и  $B$  получены с учетом ошибки  $R_0$ , равной  $\pm 0.15$  кпк.

В нижней части табл. 1 даны параметры эллипсоида остаточных скоростей звезд. При формировании остаточных скорости звезд были введены поправки за их групповое движение  $(U, V, W)_\odot$  и за вращение Галактики.

Диаграмма Герцшпрунга—Рассела (ГР), построенная по звездам выборки PMS, приведена на рис. 2. Поправки за поглощение по данным каталога Gaia DR2 были введены уже в работе [12]. Для построения начальной Главной последовательности мы использовали эволюционные треки из электронной библиотеки PARSEC<sup>1</sup> [30] версии 1.2S [31, 32] с  $A_V = 0^m$  и солнечной металличностью ( $Z = 0.0152$ ).

Результаты, представленные в последнем столбце табл. 1 и на рис. 2б, показывают, что

свойства ближайших звезд резко отличаются от более далеких. Они обладают очень большой дисперсией остаточных скоростей, т.е. могут принадлежать звездным потокам. Значительная часть из них лежит на Главной последовательности, т.е. они, возможно, старые. В итоге мы заключили, что лучше исключить ближайшие звезды из рассмотрения.

По звездам выборки PMS мы также нашли кинематические параметры с использованием расстояний, вычисленных в работе [27]. При таком подходе получены  $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (7.18, 10.02, 7.73) \pm \pm (0.16, 0.25, 0.12)$  км/с и следующие значения угловой скорости вращения Галактики:

$$\Omega_0 = 28.59 \pm 0.13 \text{ км/с/кпк},$$

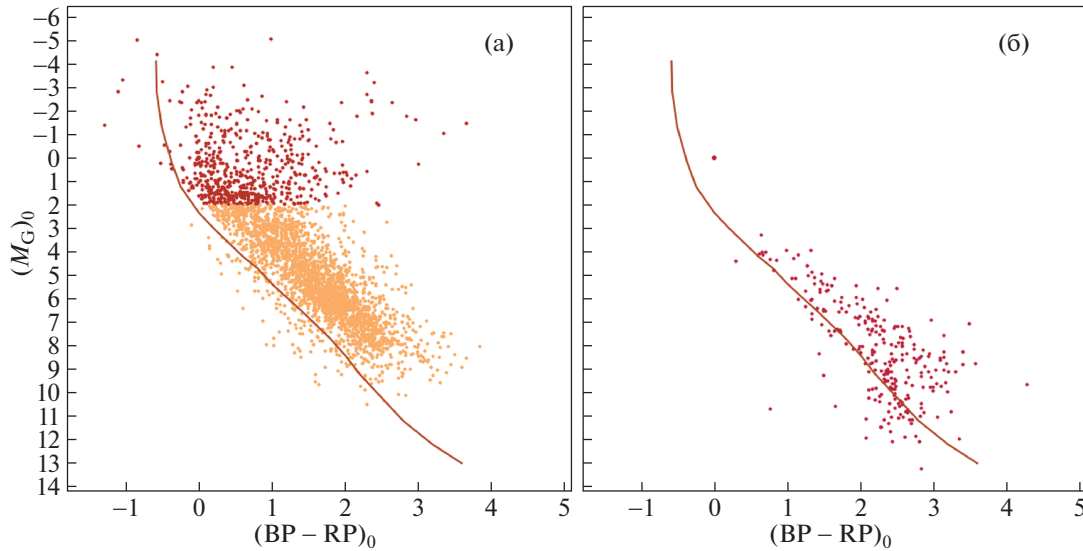
$$\Omega'_0 = -4.047 \pm 0.035 \text{ км/с/кпк}^2, \quad (15)$$

$$\Omega''_0 = 0.782 \pm 0.026 \text{ км/с/кпк}^3.$$

Ошибка единицы веса здесь составила  $\sigma_0 = 7.3$  км/с, а линейная круговая скорость вращения около Солнца  $V_0 = 228.7 \pm \pm 4.4$  км/с, было использовано 3612 звезд. Сравнение значений (15) со значениями аналогичных параметров из первого столбца табл. 1 показывает отсутствие значимых различий между двумя подходами. Далее мы используем расстояния, вычисленные через оригинальные тригонометрические параллаксы из каталога Gaia DR2, как это описано в разделе 3.3.

Результаты определения кинематических параметров по звездам выборки ALL даны табл. 2. Были взяты звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20% и ге-

<sup>1</sup> <http://stev.oapd.inaf.it/>



**Рис. 2.** Диаграмма “показатель цвета – абсолютная звездная величина”, построенная по звездам выборки PMS из интервала расстояний  $r = 0.5\text{--}4$  кпк (а) и ближайших звезд этой выборки с  $r \leq 0.5$  кпк (б), сплошной линией показана главная последовательность.

лиоцентрическими расстояниями в интервале расстояний  $r$  от 0.5 до 4 кпк. В первом столбце таблицы дано решение, полученное по всем звездам выборки, во втором – по звездам с  $(M_G)_0 \leq 2^m$ , в третьем столбце – по звездам с  $(M_G)_0 > 2^m$ . В нижней части табл. 2 даны параметры эллипсоида остаточных скоростей звезд.

С известными параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями прямоугольные пространственные скорости звезд  $U, V, W$  вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b. \end{aligned} \quad (16)$$

Тогда круговая линейная скорость  $V_{circ}$ , направленная вдоль вращения Галактики, выражается как:

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

угол  $\theta$  удовлетворяет соотношению  $\text{tg } \theta = -Y/X$ , где  $X$  и  $Y$  – галактоцентрические прямоугольные координаты звезды. На рис. 3 даны круговые скорости  $V_{circ}$  в зависимости от расстояния  $R$  для 96 звезд с измеренными лучевыми скоростями. Кривая вращения Галактики построена с параметрами, указанными в первом столбце табл. 2.

В работе [11] изучена выборка молодых звезд, не достигших стадии Главной последовательности, отбор которых был осуществлен в работе [6]. С использованием собственных движений более 25000 звезд были найдены составляющие вектора групповой скорости  $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (9.99, 14.04, 7.25) \pm (0.13, 0.22, 0.10)$  км/с, и следующие компоненты угловой скорости галактического враще-

ния:  $\Omega_0 = 28.40 \pm 0.11$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -3.933 \pm 0.033$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.804 \pm 0.040$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где значение ошибки единицы веса составило  $\sigma_0 = 16.0$  км/с, а круговая скорость вращения окоლოსолнечной окрестности вокруг центра Галактики равна  $V_0 = 227 \pm 4$  км/с (для принятого значения  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк). Причем были взяты звезды из окрестности Солнца радиусом 3 кпк с относительными ошибками тригонометрических параллаксов Gaia DR2 менее 10%.

Видим, что имея в пять раз меньшее количество звезд, получаем (первый столбец табл. 2) очень близкие значения кинематических параметров даже с меньшими ошибками их определения. Найденные в настоящей работе значения параметров вращения Галактики находятся в отличном согласии с результатами анализа самых молодых звезд.

Например, по OB-звездам с относительными ошибками параллаксов менее 30% в работе [33] определены следующие параметры кривой вращения Галактики:  $(U, V, W)_\odot = (8.16, 11.19, 8.55) \pm (0.48, 0.56, 0.48)$  км/с,  $\Omega_0 = 28.92 \pm 0.39$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -4.087 \pm 0.083$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.703 \pm 0.067$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где значение круговой скорости местного стандарта покоя составило  $V_0 = 231 \pm 5$  км/с (для принятого  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк).

В работе [34] по выборке из 147 мазеров были найдены следующие значения двух важнейших кинематических параметров:  $R_0 = 8.15 \pm 0.15$  кпк и  $\Omega_\odot = 0.32 \pm 0.27$  км/с/кпк, где  $\Omega_\odot = \Omega_0 + V_0/R$ , а значение скорости  $V_\odot = 12.24$  км/с было взято из работы [35]. Эти авторы использовали разло-

**Таблица 2.** Кинематические параметры, найденные по звездам выборки ALL, с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20%

Параметры	Все звезды	$(M_G)_0 \leq 2^m$	$(M_G)_0 > 2^m$
$U_\odot$ , км/с	$6.91 \pm 0.15$	$6.23 \pm 0.29$	$7.21 \pm 0.16$
$V_\odot$ , км/с	$9.19 \pm 0.24$	$8.96 \pm 0.48$	$9.72 \pm 0.30$
$W_\odot$ , км/с	$7.49 \pm 0.12$	$7.01 \pm 0.21$	$7.81 \pm 0.13$
$\Omega_0$ , км/с/кпк	$28.84 \pm 0.10$	$28.64 \pm 0.15$	$28.88 \pm 0.15$
$\Omega_0'$ , км/с/кпк <sup>2</sup>	$-4.063 \pm 0.029$	$-4.035 \pm 0.044$	$-4.114 \pm 0.040$
$\Omega_0''$ , км/с/кпк <sup>3</sup>	$0.766 \pm 0.025$	$0.749 \pm 0.038$	$0.919 \pm 0.048$
$\sigma_0$ , км/с	7.8	9.3	6.5
$V_0$ , км/с	$230.7 \pm 4.4$	$229.1 \pm 4.5$	$231.0 \pm 4.5$
$N_*$	4564	1995	2569
$\sigma_1$ , км/с	$11.22 \pm 0.75$	$14.09 \pm 1.20$	$8.77 \pm 0.83$
$\sigma_2$ , км/с	$10.33 \pm 0.83$	$11.31 \pm 1.71$	$7.14 \pm 0.36$
$\sigma_3$ , км/с	$7.42 \pm 0.24$	$8.01 \pm 0.42$	$6.38 \pm 0.28$
$L_1, B_1$	$66^\circ, 0^\circ$	$50^\circ, 0^\circ$	$66^\circ, 2^\circ$
$L_2, B_2$	$156^\circ, 1^\circ$	$140^\circ, 1^\circ$	$156^\circ, -2^\circ$
$L_3, B_3$	$343^\circ, 89^\circ$	$121^\circ, 89^\circ$	$194^\circ, 88^\circ$

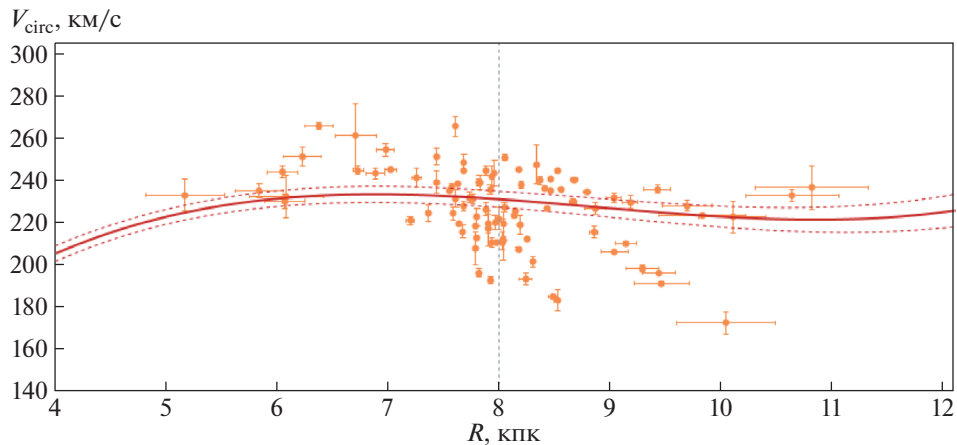
жение в ряд линейной скорости вращения Галактики. На основе аналогичного подхода из анализа 99 мазеров, которые наблюдались по программе VERA, в работе [20] были получены следующие оценки:  $R_0 = 7.92 \pm 0.16$ (стат.)  $\pm 0.3$ (сист.) кпк и  $\Omega_\odot = 0.17 \pm 0.27$ (стат.)  $\pm 0.3$ (сист.) км/с/кпк, где  $\Omega_\odot = \Omega_0 + V_\odot/R$ , а значение скорости  $V_\odot = 12.24$  км/с также было взято из работы [35].

В работе [5] выполнен кинематический анализ звезд типа Т Тельца из списка [4]. Например, при решении кинематических уравнений с использованием только собственных движений звезд выборки PMS3 значение ошибки единицы веса составило  $\sigma_0 = 6.9$  км/с. Там же были определены следующие параметры эллипсоида остаточных скоростей звезд выборки PMS3:  $\sigma_{1,2,3} = (8.87, 5.58,$

$3.03) \pm (0.10, 0.20, 0.04)$  км/с. Результаты, полученные при определении аналогичных характеристик по существенно более далеким звездам выборки ALL (из нижней части диаграммы ГР,  $(M_G)_0 > 2^m$ ), находятся в очень хорошем согласии с процитированными.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для определения параметров вращения Галактики в настоящей работе использованы молодые звезды различных масс. Отбор этих звезд был осуществлен Vioque и др. (2020) по данным каталога Gaia DR2 с привлечением фотометрических характеристик из таких инфракрасных обзоров, как 2MASS, WISE, IPHAS и VPHAS+. Рассматриваемые звезды являются членами нескольких выборок. Во-первых, это 693 кандидата в классические



**Рис. 3.** Кривая вращения Галактики, построенная по звездам выборки ALL с измеренными лучевыми скоростями. Вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца, пунктирные кривые указывают границы доверительной области, соответствующей уровню ошибок 1 $\sigma$ .



Ве звезды (выборка CBe). Во-вторых, это 1309 звезд промежуточной массы, не достигнувших главной последовательности (выборка EITHER). В-третьих, это выборка (PMS) из 8470 кандидатов в молодые звезды различной массы, не достигнувшие главной последовательности.

По собственным движениям около 4500 звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 20% и гелиоцентрическими расстояниями от 0.5 до 4 кпк найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики:  $\Omega_0 = 28.84 \pm 0.10$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -4.063 \pm 0.029$  км/с/кпк<sup>2</sup> и  $\Omega''_0 = 0.766 \pm 0.020$  км/с/кпк<sup>3</sup>, где значения постоянных Оорта составляют  $A = 16.25 \pm 0.33$  км/с/кпк и  $B = -12.58 \pm 0.34$  км/с/кпк, а линейная скорость кругового вращения около-солнечной окрестности вокруг центра Галактики равна  $V_0 = 230.7 \pm 4.4$  км/с (для принятого значения  $R_0 = 8.0 \pm 0.15$  кпк).

Показано, что дисперсия остаточных скоростей рассмотренных звезд мала, это показывает их молодость. Мы нашли, что дисперсия остаточных скоростей слегка зависит от положения звезд на диаграмме ГР. Так, по звездам из нижней части диаграммы, с абсолютной величиной  $(M_G)_0 > 2^m$ , найдены следующие параметры эллипсоида остаточных их скоростей:  $\sigma_{1,2,3} = (8.77, 7.14, 6.38) \pm (0.83, 0.36, 0.28)$  км/с. А по звездам из верхней части диаграммы с абсолютной величиной  $(M_G)_0 \leq 2^m$  получено  $\sigma_{1,2,3} = (14.09, 11.31, 8.01) \pm (1.20, 1.71, 0.42)$  км/с. Таким образом, среднее по трем координатам значение дисперсии остаточных скоростей для звезд Хербига Ae/Be составляет около 11 км/с, а для звезд типа Т Тельца — около 7 км/с. Третья ось найденных по выборке ALL эллипсоидов не имеет значительного отклонения от вертикали.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. 1 (2018).
2. L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. 2 (2018).
3. T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **595**, id. 1 (2016).
4. E. Zari, H. Hashemi, A. G. A. Brown, K. Jardine, and P. T. de Zeeuw, *Astron. and Astrophys.* **620**, id. 172 (2018).
5. V. V. Bobylev, *Astron. Letters* **46**, 131 (2020).
6. G. Marton, P. Ábrahám, E. Szegedi-Elek, J. Varga, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **487**, 2522 (2019).
7. R. M. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, M. D. Weinberg, et al., *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
8. E. L. Wright, P. R. M. Eisenhardt, A. K. Mainzer, M. E. Ressler, et al., *Astron. J.* **140**, 1868 (2010).
9. R. M. Cutri, E. L. Wright, T. Conrow, J. Bauer, et al., *VizieR On-line Data Catalog: II/311* (2012), <http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/index.html>
10. R. Adam, P. A. R. Ade, N. Aghanim, M. I. R. Alves, et al., *Astron. and Astrophys.* **594**, id. 10 (2016).
11. O. I. Krisanova, V. V. Bobylev, and A. T. Bajkova, *Astron. Letters* **46**, 370 (2020).
12. M. Vioque, R. D. Oudmaijer, M. Schreiner, I. Mendigutia, D. Baines, N. Mowlavi, and R. Pérez-Martinez, *Astron. and Astrophys.* **638**, id. 21 (2020).
13. J. E. Drew, R. Greimel, M. J. Irwin, A. Aungwerojwit, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **362**, 753 (2005).
14. G. Barentsen, H. J. Farnhill, J. E. Drew, E. A. González-Solares, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 3230 (2014).
15. J. E. Drew, E. González-Solares, R. Greimel, M. J. Irwin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **440**, 2036 (2014).
16. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **437**, 1549 (2014).
17. J. P. Vallo, *Astrophys. Space Sci.* **362**, id. 79 (2017).
18. R. de Grijs and G. Bono, *Astrophys. J. Suppl.* **232**, id. 22 (2017).
19. T. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130**, 4101 (2018).
20. T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, Y. Adachi, et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **72**, id. 50 (2020).
21. R. Abuter, A. Amorim, N. Bauböck, J. P. Berger, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, id. L10 (2019).
22. T. Do, A. Hees, A. Ghez, G. D. Martinez, et al., *Science* **365**, 664 (2019).
23. F. Arenou, X. Luri, C. Babusiaux, C. Fabricius, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, id. 17 (2018).
24. L. N. Yalyalieva, A. A. Chemel, E. V. Glushkova, A. K. Dambis, and A. D. Klinichev, *Astrophys. Bull.* **73**, 335 (2018).
25. A. G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, et al., *Astrophys. J.* **861**, id. 126 (2018).
26. J. C. Zinn, M. H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello, *Astrophys. J.* **878**, id. 136 (2019).
27. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Manzi, and R. Andrae, *Astron. J.* **156**, id. 58 (2018).
28. T. E. Lutz and D. H. Kelker, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **85**, 573 (1973).
29. K. F. Ogorodnikov, *Dynamics of stellar systems*, edited by A. Beer (Oxford: Pergamon Press, 1965).
30. A. Bressan, P. Marigo, L. Girardi, B. Salasnich, C. Dal Cero, S. Rubele, and A. Nanni, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **427**, 127 (2012).
31. J. Tang, A. Bressan, P. Rosenfield, A. Slemmer, P. Marigo, L. Girardi, and L. Bianchi, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **445**, 4287 (2014).
32. Y. Chen, L. Girardi, A. Bressan, P. Marigo, M. Barbieri, and X. Kong, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **444**, 2525 (2014).
33. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, *Astron. Letters* **44**, 676 (2018).
34. M. J. Reid, N. Dame, K. M. Menten, A. Brunthaler, et al., *Astrophys. J.* **885**, id. 131 (2019).
35. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **403**, 1829 (2010).