

УДК 524.3–32, 524.338.5

ОЦЕНКА ШКАЛЫ ВЫСОТ ПОЯСА ГУЛДА ПО ЗВЕЗДАМ ТИПА ТТЕЛЬЦА ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

© 2020 В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 12 ноября 2019 года; после доработки 14 июля 2020 года; принята к публикации 14 июля 2020 года

Проанализированы пространственные и кинематические свойства большой выборки молодых звезд типа Т Тельца из околосолнечной окрестности радиусом 500 пк, тесно связанных с поясом Гулда. Определены следующие значения параметров экспоненциального распределения плотности: среднее $(z_G)_\odot = -25 \pm 5$ пк и шкала высот $h_G = 56 \pm 6$ пк. Предложен метод устранения из выборок фоновых звезд, находящихся на больших высотах по отношению к плоскости симметрии пояса Гулда. Обнаружено, что эффект расширения всей звездной системы, $K_G = 6 \pm 1$ км с⁻¹ кпк⁻¹, определяется главным образом динамикой ассоциации Скорпиона–Центавра. Показано, что угловая скорость остаточного собственного вращения пояса Гулда может достигать значения $\Omega_G = 6.9 \pm 0.2$ км с⁻¹ кпк⁻¹ и по направлению это вращение противоположно галактическому.

Ключевые слова: *звезды: кинематика и динамика — звезды: T Tauri, Ae/Be Хербига*

1. ВВЕДЕНИЕ

Пояс Гулда — это ближайший к Солнцу гигантский звездно-газовый комплекс (Efremov 1989, Frogel and Stothers 1977, Olano 2001, Poppel 1997, Torga et al. 2000). С ним ассоциируют гигантское облако нейтрального водорода, называемое кольцом Линдблада (Lindblad 1967), в которое входит большая группировка из близких ОБ-ассоциаций (de Zeeuw et al. 1999), массивные и маломассивные звезды (Torga et al. 2000), молодые рассеянные звездные скопления (Bobylev 2006, Piskunov et al. 2006), а также комплексы пылевых и молекулярных облаков (Dame et al. 1987, Perrot and Grenier 2003, Schlafly et al. 2014).

В 2018 г. был опубликован второй релиз данных космического эксперимента Gaia (Brown et al. 2018, Lindegren et al. 2018). Каталог Gaia DR2 содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.3 млрд звезд. Вывод их значений базируется на орбитальных наблюдениях, выполненных в течение 22 месяцев. Средняя ошибка определения тригонометрического параллакса и обеих компонент собственного движения в этом каталоге зависит от звездной величины. Для ярких звезд, $G < 15^m$, ошибки параллаксов лежат в интервале 0.02–0.04 миллисекунд дуги (мсд), а для слабых, $G = 20^m$, достигают 0.7 мсд. Для более

7 млн звезд спектральных классов F–G–K определены их лучевые скорости со средней ошибкой около 1 км с⁻¹.

Непосредственно только по данным каталога Gaia DR2 невозможно провести надежную классификацию звезд. Однако с привлечением других фотометрических и спектральных обзоров это можно сделать (Marton et al. 2019). К настоящему моменту появились работы по отбору молодых звезд из каталога Gaia DR2, принадлежащих как ОБ-ассоциациям, входящим в пояс Гулда (Damiani et al. 2019, Ortiz-León et al. 2018), рассеянным звездным скоплениям (Cantat-Gaudin et al. 2018, Soubiran et al. 2018), так и всему поясу Гулда в целом (Zari et al. 2018) и не только ему (Kounkel and Covey 2019, Marton et al. 2019).

В настоящей работе нас, в частности, интересуют звезды типа Т Тельца, поскольку основные пространственные и кинематические свойства пояса Гулда определены в основном из анализа массивных звезд.

Больших выборок звезд типа Т Тельца с надежно измеренными характеристиками до недавнего времени просто не существовало. По данным из каталога HIPPARCOS (1997) на примере ближайшей к Солнцу ОБ-ассоциации в Скорпионе–Центавре показано отсутствие различий в распределении и кинематике между массивными и маломассивными звездами сопоставимого возраста (Bobylev and Baykova 2020a, Sartori et al. 2003). Интересно подтвердить вывод этих авторов для

*E-mail: vbobylev@gaoran.ru

всего комплекса пояса Гулда. Необходимые данные о большой выборке звезд типа Т Тельца, отобранных из Gaia DR2, недавно были опубликованы в работе Zagi et al. (2018). Как показал кинематический анализ этих звезд, значительную часть характерного для звезд пояса Гулда эффекта расширения можно объяснить влиянием галактической спиральной волны плотности (Bobylev 2020). Найденные по таким звездам параметры положений находятся в хорошем согласии с ранее известными геометрическими характеристиками пояса Гулда (Bobylev 2020).

Целью настоящей работы является изучение пространственных и кинематических характеристик пояса Гулда по новейшим данным о звездах типа Т Тельца. По выборке, освобожденной от фоновых звезд, мы определяем параметры распределения плотности в поясе Гулда, а также оцениваем ряд кинематических параметров с использованием модели Оорта–Линдблада.

2. ДАННЫЕ

В настоящей работе мы используем каталог Zagi et al. (2018), содержащий звезды типа Т Тельца, отобранные из каталога Gaia DR2 по кинематическим и фотометрическим данным. Эти звезды расположены не далее 500 пк от Солнца, так как налагалось ограничение на радиус выборки $\pi < 2$ мсд. Объекты были отобраны на основании величин собственных движений путем анализа сглаженного распределения точек на плоскости $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$ с учетом ограничения на тангенциальную скорость звезды $4.74r \sqrt{(\mu_\alpha \cos \delta)^2 + \mu_\delta^2} < 40$ км с⁻¹, где расстояние r вычислено через параллакс $r = 1/\pi$.

В каталоге представлены три следующие под-выборки звезд типа Т Тельца:

- pms1, в которую вошли 43 719 звезд, расположенных внутри самого внешнего контура, построенного при сглаживании точек на плоскости $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$, поэтому по сравнению с остальными двумя эта выборка содержит наибольшее количество фоновых объектов;
- pms2, содержащая 33 985 звезд, расположенных внутри второго контура на плоскости $\mu_\alpha \cos \delta \times \mu_\delta$;
- pms3, содержащая 23 686 звезд, расположенных внутри третьего контура, поэтому они являются наиболее вероятными членами кинематической группировки (пояса Гулда).

Как показано в работе Zagi et al. (2018), звезды всех представленных выборок, pms1, pms2 и pms3, имеют тесную пространственную связь с поясом Гулда. В настоящей работе мы рассматриваем

звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%.

3. МЕТОДЫ

3.1. Координатные соотношения

Используем прямоугольную систему координат с центром в Солнце, в которой ось x направлена в сторону галактического центра, ось y совпадает с направлением галактического вращения и ось z направлена на северный полюс Галактики. Тогда $x = r \cos l \cos b$, $y = r \sin l \cos b$ и $z = r \sin b$. Гелиоцентрическое расстояние звезды вычисляем через параллакс звезды π : $r = 1/\pi$. Если π выражен в миллисекундах дуги, то расстояние — в пк.

Переход от экваториальных координат к галактическим осуществляется в соответствии со следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} \sin b &= \cos \delta \cos \delta_{\text{GP}} \cos(\alpha - \alpha_{\text{GP}}) + \sin \delta \sin \delta_{\text{GP}}, \\ \sin(l - l_\Omega) \cos b &= \sin \delta \cos \delta_{\text{GP}} \\ &\quad - \cos \delta \sin \delta_{\text{GP}} \cos(\alpha - \alpha_{\text{GP}}), \\ \cos(l - l_\Omega) \cos b &= \cos \delta \sin(\alpha - \alpha_{\text{GP}}), \end{aligned} \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{GP}} = 192^\circ 85948$, $\delta_{\text{GP}} = 27^\circ 12825$ — координаты северного галактического полюса (GP) и $l_\Omega = 32^\circ 93192$ — галактическая долгота восходящего узла. Численные значения этих параметров для эпохи J2000.0 рекомендованы консорциумом HIPPARCOS (Pergzman et al. 1997). Обратный переход от галактических координат к экваториальным осуществляется по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \sin \delta &= \sin b \sin \delta_{\text{GP}} + \cos b \sin(l - l_\Omega) \cos \delta_{\text{GP}}, \\ \cos(\alpha - \alpha_{\text{GP}}) \cos \delta &= \sin b \cos \delta_{\text{GP}} \\ &\quad - \cos b \sin(l - l_\Omega) \sin \delta_{\text{GP}}, \\ \sin(\alpha - \alpha_{\text{GP}}) \cos \delta &= \cos b \cos l. \end{aligned} \quad (2)$$

Для правильного определения четверти искомого угла требуются все три формулы как в группе соотношений (1), так и в (2).

В настоящей работе мы хотим перейти к системе координат, связанной с плоскостью симметрии пояса Гулда, которую будем обозначать штрихом, например, l' или z' . Может возникнуть также необходимость обратного перехода к стандартной, нештриховой, системе галактических координат. Соотношения (1) и (2) позволяют решать такие задачи.

Следуя работе Bobylev (2020), для пояса Гулда используем следующие координаты северного

полюса GB его плоскости симметрии (большого круга):

$$\begin{aligned} l_{GB} &= 208^\circ 0, \\ b_{GB} &= 78^\circ 0, \\ l_{\Omega} &= 298^\circ 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Пусть исходные координаты звезд даны в экваториальной системе координат. В таком случае для перехода к системе координат, связанной с плоскостью симметрии пояса Гулда, с использованием соотношений (1) необходимо знать экваториальные координаты полюса пояса Гулда, которые вычисляются по формулам (2):

$$\begin{aligned} \alpha_{GB} &= 179^\circ 35316, \\ \delta_{GB} &= 27^\circ 51156, \\ l'_{\Omega} &= 269^\circ 35316. \end{aligned} \quad (4)$$

Если исходные координаты звезд даны так же, как в каталоге Zari et al. (2018), в галактической системе координат, тогда для перехода к системе координат, связанной с плоскостью симметрии пояса Гулда, в соотношениях (1) вместо α и δ необходимо подставить l и b вместе с координатами полюса (3). Тогда в левых частях уравнений будем иметь l' и b' .

3.2. Экспоненциальное распределение плотности

В случае экспоненциального распределения плотности гистограмма распределения звезд вдоль оси z описывается следующим выражением:

$$N(z) = N_0 \exp\left(-\frac{|z - z_{\odot}|}{h}\right), \quad (5)$$

где N_0 — нормировочный коэффициент, z_{\odot} — среднее значение, вычисленное из z -координат звезд выборки, отражает известный факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики, h — вертикальная шкала. В настоящей работе мы применяем соотношение (5) к распределению звезд пояса Гулда в системе координат, связанной с плоскостью его симметрии, то есть к штриховой системе координат.

3.3. Формирование остаточных скоростей

При формировании остаточных скоростей учитываем в первую очередь пекулярную скорость Солнца относительно местного стандарта покоя:

U_{\odot} , V_{\odot} и W_{\odot} . Диаметр рассматриваемой нами окрестности составляет 1 кпк, поэтому необходимо также учесть влияние дифференциального вращения Галактики. Выражения для учета этих двух эффектов имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} V_r &= V_r^* - [-U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l \\ &\quad - W_{\odot} \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 \\ &\quad + 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0], \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} V_l &= V_l^* - [U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r \Omega_0 \cos b \\ &\quad + (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 \\ &\quad + 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} V_b &= V_b^* - [U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b \\ &\quad - W_{\odot} \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 \\ &\quad - 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0], \end{aligned} \quad (8)$$

где стоящие в правых частях уравнений V_r^* , V_l^* , V_b^* — исходные, не исправленные скорости, а в левых частях V_r , V_l , V_b — исправленные скорости, с которыми можем вычислить остаточные скорости U , V , W на основе соотношений (10), R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2.$$

Расстояние R_0 принимаем равным 8.0 ± 0.15 кпк (Camarillo et al. 2018). Конкретные значения пекулярной скорости Солнца берем согласно определению Schönrich et al. (2010):

$$(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.1, 12.2, 7.3) \text{ км с}^{-1}.$$

Используем следующие значения кинематических параметров:

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= 28.71 \pm 0.22 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}, \\ \Omega'_0 &= -4.100 \pm 0.058 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-2}, \\ \Omega''_0 &= 0.736 \pm 0.033 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-3}, \end{aligned} \quad (9)$$

где Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные этой угловой скорости. Значения этих параметров были определены Bobylev and Vajkova (2019) из анализа молодых рассеянных звездных скоплений с собственными движениями, параллаксами и лучевыми скоростями, вычисленными по данным каталога Gaia DR2.

Через компоненты V_r , V_l и V_b вычисляются пространственные скорости U , V , W , где скорость

U направлена от Солнца к центру Галактики, V — в направлении вращения Галактики и W — на северный галактический полюс:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b. \end{aligned} \quad (10)$$

Оценим, какими должны быть в нашей выборке ошибки лучевых скоростей звезд для того, чтобы они были сопоставимы с ошибками тангенциальных скоростей. В каталоге Gaia DR2 средние ошибки параллаксов ярких звезд ($G < 15^m$) лежат в интервале 0.02–0.04 мсд, а для слабых звезд ($G = 20^m$) они достигают 0.7 мсд. Аналогично ошибки собственных движений составляют от 0.05 мсд/год для ярких ($G < 15^m$) до 1.2 мсд/год для слабых ($G = 20^m$) звезд. Если взять ошибку собственного движения 0.1 мсд/год, то ошибка тангенциальной скорости на границе выборки в 0.5 кпк составит $4.74 \times 0.5 \times 0.1 = 0.2 \text{ км с}^{-1}$, а для крайнего случая — ошибки собственного движения 1 мсд/год, ошибка тангенциальной скорости на границе выборки составит $4.74 \times 0.5 \times 1 = 2.4 \text{ км с}^{-1}$. Таким образом, желательно использовать значения лучевых скоростей звезд со случайными ошибками их измерения менее 2.4 км с^{-1} .

3.4. Кинематическая модель

Из анализа остаточных скоростей V_r , V_l , V_b можем определить среднюю групповую скорость U_G , V_G , W_G , а также четыре аналога постоянных Оорта A_G , B_G , C_G , K_G (G — Gould Belt), которые в нашем случае характеризуют эффекты собственного вращения (A_G и B_G) и расширения/сжатия (K_G и C_G) выборки маломассивных звезд, тесно связанных с поясом Гулда, на основе простой кинематической модели Оорта–Линдблада (Ogorodnikov 1965):

$$\begin{aligned} V_r &= U_G \cos b \cos l + V_G \cos b \sin l \\ &+ W_G \sin b + r A_G \cos^2 b \sin 2l \\ &+ r C_G \cos^2 b \cos 2l + r K_G \cos^2 b, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} V_l &= -U_G \sin l + V_G \cos l + r A_G \cos b \cos 2l \\ &- r C_G \cos b \sin 2l + r B_G \cos b, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} V_b &= -U_G \cos l \sin b - V_G \sin l \sin b \\ &+ W_G \cos b - r A_G \sin b \cos b \sin 2l \\ &- r C_G \cos b \sin b \cos 2l - r K_G \cos b \sin b. \end{aligned} \quad (13)$$

Неизвестные U_G , V_G , W_G и A_G , B_G , C_G , K_G находим в результате совместного решения системы условных уравнений (11)–(13) методом наименьших квадратов (МНК). Используем систему весов вида

$$w_r = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2},$$

$$w_l = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2},$$

$$w_b = S_0 / \sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_b}^2},$$

где S_0 — «космическая» дисперсия, σ_{V_r} , σ_{V_l} , σ_{V_b} — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 (ошибка единицы веса) при решении условных уравнений вида (11)–(13). В настоящей работе значение S_0 составляло от 3 км с^{-1} до 8 км с^{-1} . Применяется также критерий 3σ для отбрасывания невязок. При анализе звезд с известными лучевыми скоростями мы наложили также ограничение на модуль остаточной скорости $\sqrt{U^2 + V^2 + W^2} < 80 \text{ км с}^{-1}$.

С использованием найденных значений параметров A и C вычисляем величину угла l_{xy} (отклонение вертекса) согласно соотношению, предложенному Parenago (1954):

$$\text{tg}(2l_{xy+K}) = \frac{AK - BC}{AB + KC}, \quad (14)$$

которое при отсутствии расширения/сжатия (при $K = 0$) принимает более привычную (как при анализе галактического вращения) форму $\text{tg}(2l_{xy}) = -C/A$. В случае чистого вращения угол l_{xy} показывает точно на кинематический центр.

Здесь имеются несколько важных соотношений (Ogorodnikov 1965):

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= B - A, \\ V'_0 &= B + A, \end{aligned} \quad (15)$$

где, если речь идет о галактическом вращении, Ω_0 — угловая скорость вращения и $V'_0 = \partial V_\theta / \partial R$ — первая производная линейной скорости вращения V_θ в точке $R = R_0$.

Для угловой скорости расширения/сжатия k_0 и первой производной линейной радиальной скорости (направленной по радиусу от кинематического

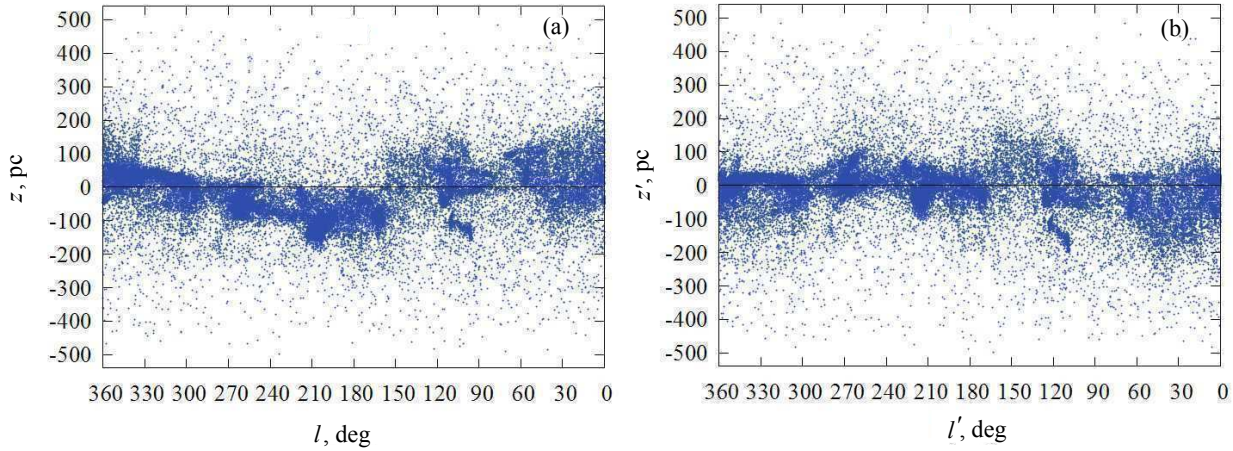


Рис. 1. Исходное распределение звезд выборки rms1 на плоскости $l-z$ (a), в новой системе координат $l'-z'$, связанной с плоскостью симметрии пояса Гулда (b).

центра системы) расширения/сжатия V_R в точке $R = R_0$ имеем (Ogorodnikov 1965):

$$\begin{aligned} k_0 &= K - C, \\ (V'_R)_0 &= K + C. \end{aligned} \quad (16)$$

Аналогичные соотношения справедливы и для A_G , B_G , C_G , K_G при описании собственного вращения и расширения/сжатия любой звездной системы, пояса Гулда в частности.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Метод удаления звезд фона

Сначала рассмотрим одну из трех выборок каталога Zari et al. (2018) выборку rms1, содержащую наибольшее количество звезд типа Т Тельца. На рис. 1 дано исходное распределение звезд выборки rms1 на плоскости $l-z$, а также в принятой системе координат $l'-z'$, связанной с плоскостью пояса Гулда. Хорошо видна волна, отражающая факт наклона пояса Гулда к плоскости Галактики. Видно и то, что в выборке присутствуют звезды с большими высотами, вплоть до 500 пк.

На рис. 2 дана гистограмма распределения звезд выборки rms1 в обычном и логарифмическом масштабах. Как можно видеть на рисунке, несмотря на значительную клочковатость в распределении звезд, в целом имеется удовлетворительное согласие с экспоненциальным законом распределения плотности. Клочковатость, естественно, вызвана большой концентрацией звезд в основных ассоциациях, теснейшим образом связанных с поясом Гулда — ассоциациями в Ящерице ($l \sim 100^\circ$), Цефее ($l \sim 120^\circ$), Кассиопее ($l \sim 130^\circ$), Персее ($l \sim 160^\circ$), Тельце ($l \sim 180^\circ$), Орионе ($l \sim 190^\circ$), Парусах ($l \sim 270^\circ$) и Скорпионе—Центавре ($l \sim 330^\circ$).

На рис. 2b отчетливо видны широкие крылья, обусловленные высокоширотным шумом. Причем значение шкалы высот h для этих крыльев примерно в два раза превосходит значение, характерное для подавляющего большинства остальных звезд.

По гистограмме найдены следующие значения параметров экспоненциального распределения (5):

$$\begin{aligned} (z_G)_\odot &= -25 \pm 5 \text{ пк}, \\ h_G &= 56 \pm 6 \text{ пк}, \\ N_0 &= 7389. \end{aligned} \quad (17)$$

Для сравнения в таблице 1 даны результаты определения шкалы диска h , полученные на основе экспоненциального распределения (5) различными авторами с использованием разнообразных данных. В таблице даны значения z_\odot , которые относятся к звездам поля. Некоторые авторы приводят значения $(z_G)_\odot$, относящиеся, как и в нашем случае, к поясу Гулда. Но эти значения обычно определяются плохо. Например, $(z_G)_\odot = 0 \pm 2$ пк (Stothers and Frogel 1974), $(z_G)_\odot = -15 \pm 12$ пк (Elias et al. 2006) или $(z_G)_\odot = 7 \pm 10$ пк (Gontcharov 2019). Из сравнения полученной оценки h (17) с данными таблицы 1 можем заключить, что распределение маломассивных звезд типа Т Тельца в поясе Гулда очень сходно с аналогичным распределением массивных ОВ-звезд.

Отметим результат Gontcharov (2019), который нашел для пыли в поясе Гулда довольно большое значение шкалы высот $h = 170 \pm 40$ пк. Можно указать, что с поясом Гулда ассоциируют не просто молекулярные и пылевые облака (Dame et al. 2001), но и высокоширотные облака (Schlafly

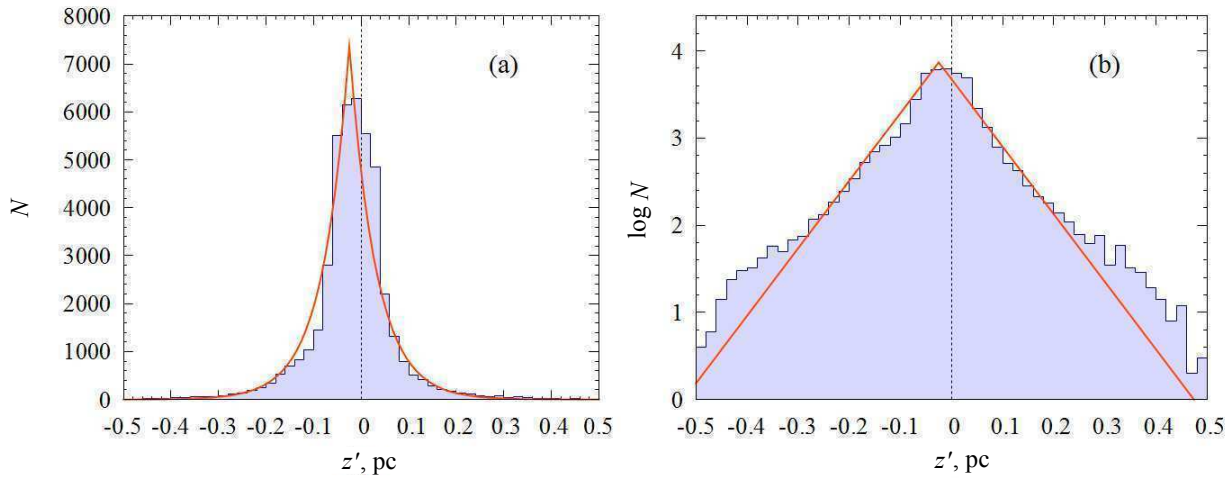


Рис. 2. Гистограмма распределения звезд выборки rms1 вдоль оси z в обычном (a) и логарифмическом масштабах (b).

Таблица 1. Значения вертикальной шкалы диска h , полученные различными авторами по молодым объектам в предположении об экспоненциальном распределении плотности

Ссылка	z_{\odot} , пк	h , пк	Выборка
Bobylev and Bajkova (2016b)	-5.7 ± 0.5	27 ± 1	639 мазеров, $R \leq R_0$
Bobylev and Bajkova (2016b)	-7.6 ± 0.4	33 ± 1	878 зон H II, $R \leq R_0$
Bobylev and Bajkova (2016b)	-10.1 ± 0.5	34 ± 1	538 ГМО, $R \leq R_0$
Stothers and Frogel (1974)	-24 ± 3	46 ± 7	B0-B5, $r < 200$ пк
Reed (2000)	0	45	OB-звезды
Bonatto et al. (2006)	-15 ± 2	48 ± 3	P3C, < 200 млн лет
Elias et al. (2006)	-12 ± 12	34 ± 2	OB-звезды
Piskunov et al. (2006)	-22 ± 4	56 ± 3	254 P3C
Joshi (2007)	-17 ± 3	57 ± 4	537 P3C
Bobylev and Bajkova (2016a)	-16 ± 2	45 ± 3	OB-ассоциации
Bobylev and Bajkova (2016a)	-15 ± 3	49 ± 3	187 зон H II, $r < 4.5$ кпк
Bobylev and Bajkova (2016a)	-10 ± 4	51 ± 4	148 звезд Вольфа-Райе
Bobylev and Bajkova (2016a)	-19 ± 4	61 ± 4	90 мазеров, $r < 4$ кпк
Bobylev and Bajkova (2016a)	-23 ± 2	70 ± 2	246 цефеид, $\bar{t} \approx 75$ млн лет
Gontcharov (2019)	-10 ± 5	170 ± 40	пыль в поясе Гулда

et al. 2014). В работе Bobylev (2016) показано, что систему близких высокоширотных молекулярных облаков можно аппроксимировать эллипсоидом с размерами $350 \times 235 \times 140$ пк, размер третьей оси которого сильно отличается от обычно принимаемого для пояса Гулда эллипсоида $350 \times 250 \times 50$ пк. Таким образом, пыль и газ в

поясе Гулда распределены по z -координате существенно выше звезд.

На основе значений z_{\odot} и h в штриховой системе координат можем ввести ограничение на $|z' - z_{\odot}| < 3h$, избавляясь таким образом от высотного шума. Мы взяли с небольшим запасом $|z' - z_{\odot}| < 200$ пк. Отметим, что на рис. 1b при таком ограничении останется полоса, параллельная эк-

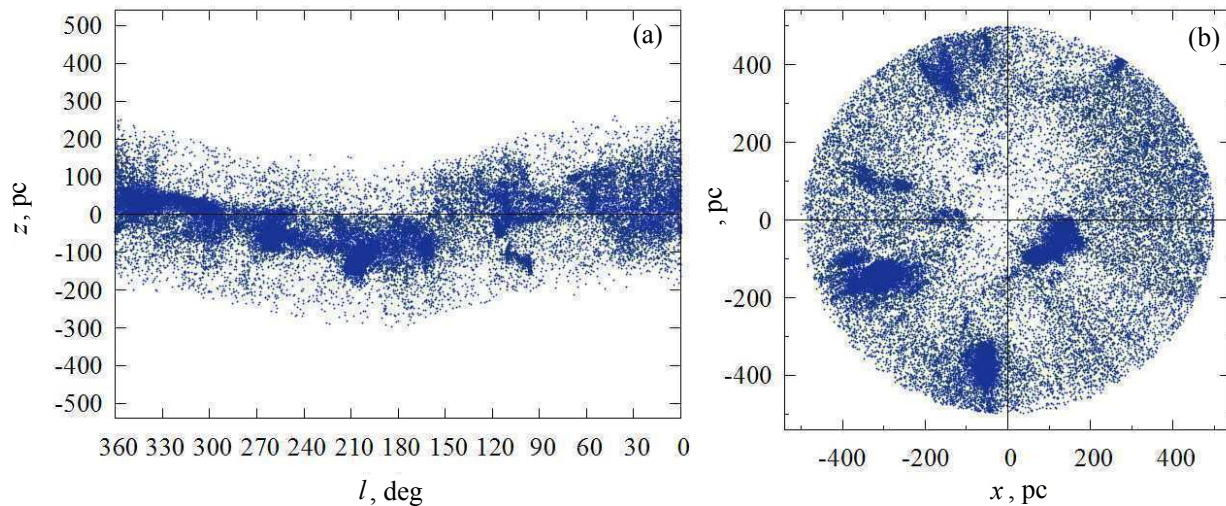


Рис. 3. Распределение звезд выборки rms1 после удаления высокоширотного шума на плоскости $l-z$ (а) и в проекции на галактическую плоскость xy (б).

ватору. Результаты отражены на рис. 3, где дано распределение звезд выборки rms1 на плоскости $l-z$ после удаления шума, а также распределение этих звезд в проекции на галактическую плоскость xy .

Такой метод применяется, по-видимому, впервые. Обычно при исследовании звезд пояса Гулда авторы разделяют звезды на два слоя: экваториальный и наклонный — собственно пояс Гулда (Elias et al. 2006, Gontcharov 2019, Stothers and Frogel 1974). При использовании нашего метода в штриховой системе координат отсекаются все объекты наклонного слоя и только в узлах остается смешанный состав звезд. Но из-за того, что в нашей выборке огромное количество звезд сконцентрировано в ассоциациях, явно принадлежащих поясу Гулда, вклад оставшихся фоновых звезд не должен оказать существенного влияния на определение кинематических параметров.

Как можно видеть на рис. 3b, в распределении звезд имеется область пониженной плотности с центром во втором галактическом квадранте, $l \sim 120^\circ$, на расстоянии $r \sim 150$ пк. Такая форма в виде бублика является характерной для пояса Гулда (de Zeeuw et al. 1999, Perrot and Grenier 2003). Такую же форму имеет и гигантское облако нейтрального водорода, которое называют рингом Линдблада (Lindblad 1967; 2000). Можно заметить также небольшое сгущение звезд, расположенное близко к центру этого «бублика» — рассеянное звездное скопление α Per, возраст которого составляет около 35 млн лет.

4.2. Кинематика звезд

Для оценки эффектов собственного вращения и расширения/сжатия пояса Гулда решаем методом

МНК систему условных уравнений (11)–(13). Решение ищем по выборке rms3 (содержит наиболее вероятные члены пояса Гулда), освобожденной от высотного шума. Результаты даны в таблице 2, которая состоит из двух частей: верхней и нижней. Части различаются способом решения кинематических уравнений. Так, при наличии лучевой скорости каждая звезда дает все три уравнения (11)–(13). Решения, полученные исключительно по таким звездам, даны в верхней части таблицы. В нижней части таблицы даны решения, полученные следующим способом: звезда с собственными движениями дает два уравнения: (12) и (13), а при наличии лучевой скорости звезда дает все три уравнения.

В первой колонке таблицы 2 даны параметры кинематической модели. Во второй колонке (Шаг I) решение получено по скоростям звезд, которые не освобождались ни от каких эффектов. В третьей колонке (Шаг II) скорости звезд были освобождены от пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя и от дифференциального вращения Галактики. В четвертой колонке (Шаг III) из выборки были удалены звезды ассоциации Скорпиона–Центавра, а в пятой колонке (Шаг IV) решение было получено по выборке из предыдущего шага, но с новыми долготами вида $l_{\text{new}} = l - l_{xy}$. При удалении звезд ассоциации Скорпиона–Центавра из выборки освобожден квадрат с размерами $x : 0 - 200$ пк и $y : -200 - 0$ пк.

Решение об удалении из выборки звезд ассоциации Скорпиона–Центавра принято на основе работы Bobylev and Baukova (2020b), где было подтверждено наличие очень сильного коэффициента расширения ассоциации, $K = 39 \pm 2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$.

Таблица 2. Параметры кинематической модели Оорта–Линдблада, найденные по выборке rms3 только по звездам с лучевыми скоростями (верхняя часть) и по всем данным (нижняя часть)

Параметры	Шаг I	Шаг II	Шаг III	Шаг IV
N_*	1845	1845	1163	1163
σ_0 , км с ⁻¹	9.2	9.1	11.5	11.5
U_\odot/U_G , км с ⁻¹	5.36 ± 0.24	5.57 ± 0.23	5.71 ± 0.37	
V_\odot/V_G , км с ⁻¹	11.60 ± 0.23	0.46 ± 0.22	2.72 ± 0.35	
W_\odot/W_G , км с ⁻¹	5.59 ± 0.21	1.21 ± 0.20	1.34 ± 0.33	
$V_0/(V_0)_G$, км с ⁻¹	13.95 ± 0.22	5.72 ± 0.23	6.46 ± 0.37	
l , град.	65 ± 1	5 ± 2	25 ± 3	
b , град.	24 ± 1	12 ± 3	12 ± 3	
A/A_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	13.55 ± 0.92	-2.59 ± 0.90	-0.5 ± 1.2	-2.1 ± 1.2
B/B_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-17.05 ± 0.81	-3.52 ± 0.80	-2.3 ± 1.1	-2.3 ± 1.1
C/C_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-4.49 ± 0.93	-4.63 ± 0.90	-2.0 ± 1.2	-0.0 ± 1.2
K/K_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	6.57 ± 1.09	5.97 ± 1.07	2.0 ± 1.4	2.0 ± 1.4
l_{xy} , град.	9 ± 2	-30 ± 5	-37 ± 7	0 ± 7
l_{xy+K} , град.		30 ± 8	32 ± 9	-21 ± 9
N_*	23214	23214	17687	17687
σ_0 , км с ⁻¹	3.9	3.6	4.3	4.3
U_\odot/U_G , км с ⁻¹	10.74 ± 0.04	0.16 ± 0.04	0.44 ± 0.06	
V_\odot/V_G , км с ⁻¹	12.79 ± 0.04	-0.75 ± 0.03	1.26 ± 0.05	
W_\odot/W_G , км с ⁻¹	6.10 ± 0.03	0.61 ± 0.03	1.19 ± 0.04	
$V_0/(V_0)_G$, км с ⁻¹	17.78 ± 0.04	0.98 ± 0.03	1.78 ± 0.05	
l , град.	50.0 ± 0.1	282 ± 3	71 ± 3	
b , град.	20.1 ± 0.1	38 ± 2	41 ± 2	
A/A_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	6.29 ± 0.11	-8.33 ± 0.10	-5.40 ± 0.13	-7.16 ± 0.13
B/B_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	-16.49 ± 0.09	-2.85 ± 0.09	-0.26 ± 0.11	0.26 ± 0.11
C/C_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	4.54 ± 0.14	4.60 ± 0.13	4.70 ± 0.16	-0.12 ± 0.16
K/K_G , км с ⁻¹ кпк ⁻¹	6.71 ± 0.33	5.36 ± 0.30	-0.07 ± 0.39	-0.07 ± 0.39
l_{xy} , град.	-18 ± 1	15 ± 1	21 ± 1	0 ± 1
l_{xy+K} , град.		-17 ± 2	28 ± 3	7 ± 3

На рис. 4 даны UV -скорости звезд выборки rms3 до и после удаления звезд ассоциации Скорпиона–Центавра. Хорошо видно, что распределение UV -скоростей звезд ассоциации Скорпиона–Центавра очень компактное, оно имеет специфический вид, связанный с наличием расширения. Таких звезд достаточно много. Поэтому их удаление

значительно влияет на характер распределения скоростей и на величины оцениваемых параметров пояса Гулда. Отметим, что здесь ошибки UV -скоростей невелики. При этом в рассматриваемой окрестности радиусом 500 пк от Солнца ошибки тангенциальных скоростей V_l и V_b меньше ошибок лучевых скоростей, так как здесь малы

ошибки параллаксов и собственных движений звезд, взятые из каталога Gaia DR2. При построении рис. 4 ограничения на величину скорости не накладывались. На левых графиках этого рисунка можем видеть, что модули остаточных скоростей всех звезд редко превышают 80 км с^{-1} .

Рассмотрим, значения параметров, найденные на шаге I. Так как не вводились какие-либо поправки, параметры A и B здесь описывают вращение Галактики и испытывают влияние пояса Гулда. Согласно данным из верхней части таблицы 2, значение угловой скорости галактического вращения равно

$$\Omega_0 = B - A = -30.6 \pm 1.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

а по данным из нижней части

$$\Omega_0 = B - A = -22.8 \pm 0.1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.$$

Например, по мазерам с измеренными тригонометрическими параллаксами в работе Rastorguev et al. (2017) найдено значение

$$\Omega_0 = -28.64 \pm 0.53 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$$

(для модели С2, чисто кругового вращения диска).

Примечательно, что сильно отличаются скорости относительно местного стандарта покоя, найденные на шаге II. Так, по данным верхней части таблицы 2, звезды движутся со скоростью $5.72 \pm 0.23 \text{ км с}^{-1}$ в направлении $l = 5^\circ \pm 2^\circ$ и $b = 12^\circ \pm 3^\circ$. Здесь вектор этой скорости лежит практически в плоскости пояса Гулда. А по данным из нижней части таблицы значение этой скорости очень мало, и направление ее вектора имеет случайный характер.

Обратимся к решениям, которые даны в последней колонке таблицы 2. Как можно видеть в верхней части таблицы, угловая скорость остаточного вращения

$$\Omega_G = B - A = -0.2 \pm 1.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}$$

и угловая скорость расширения

$$(k_0)_G = K - C = 2.2 \pm 1.8 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}$$

не отличаются значимо от нуля. Из решения, указанного в нижней части таблицы, находим величину угловой скорости остаточного вращения $\Omega_G = 6.9 \pm 0.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, знак которой говорит о вращении в направлении, противоположном галактическому. Угловая скорость расширения $(k_0)_G = K - C$ здесь не отличается значимо от нуля.

Отметим, что при выборе угла поворота l_{xy} или l_{xy+K} мы исходили из того, какой эффект является доминирующим: расширение или вращение. Например, в верхней части таблицы для шага IV даны результаты, полученные при повороте системы

координат на угол $l_{xy} = -37^\circ$. Это значение представляет интерес, так как указывает на направление $143^\circ\text{--}323^\circ$. А в направлении примерно 140° находится центр «бублика», о котором говорилось выше, то есть геометрический центр пояса Гулда (рис. 3b). На шаге III в нижней части таблицы 2 указанной проблемы выбора нет, так как оба угла примерно равны.

Как можно видеть из уравнений (11)–(13), параметры вращения надежнее определяются из уравнения (12), где нет $\sin b$ при неизвестных A , B и C . И наоборот, параметры расширения/сжатия K и C лучше определяются по лучевым скоростям (уравнение (11)). Поэтому заслуживают большего доверия параметры расширения из верхней части таблицы 2, а параметры вращения — из ее нижней части.

В согласии с результатами других авторов находятся параметры B и K вращения и расширения, найденные нами на шаге II. Причем и в верхней части таблицы 2, и в нижней имеем положительное значение $K \sim 6 \pm 1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ и отрицательное $B \sim -3 \pm 1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Например, в работе Torra et al. (2000) из анализа ОВ-звезд моложе 30 млн лет, расположенных от Солнца не далее 0.6 кпк , было найдено $K = 7.1 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$. Специально значения A_G и B_G эти авторы не определяли, но получили для галактического вращения

$$A = 5.7 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$B = -20.7 \pm 1.4 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.$$

Еще раньше Westin (1985) по ОВ-звездам моложе 30 млн лет получил следующие оценки:

$$A = -8.5 \pm 2.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$B = -24.5 \pm 2.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$C = 10.5 \pm 2.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

$$K = 7.4 \pm 2.7 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}.$$

Здесь сильное отличие величины B от значения $-15 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, характерного для галактического вращения, интерпретируется как наличие заметного отрицательного собственного вращения пояса Гулда. И, конечно, ранее никто не отделял звезды ассоциации Скорпиона–Центавра от звезд пояса Гулда.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены пространственные и кинематические свойства молодых звезд типа Т Тельца из работы Zari et al. (2018). Собственные движения и параллаксы таких звезд ими были отобраны из каталога Gaia DR2. Для небольшого процента звезд

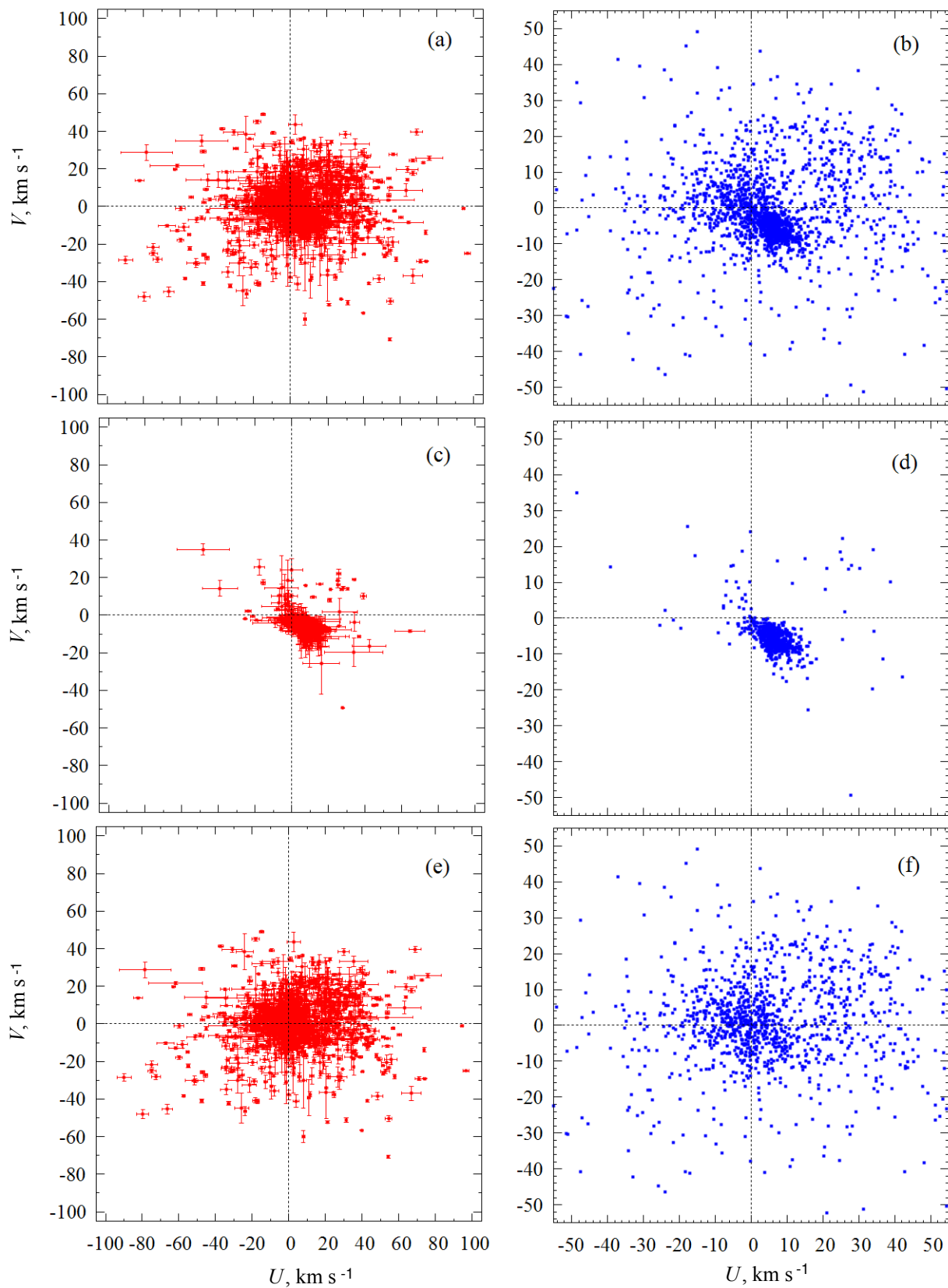


Рис. 4. Остаточные скорости 1845 звезд выборки rms3 (а), эти же скорости в другом масштабе (b), остаточные скорости 682 звезд ассоциации Скорпиона—Центавра (с), эти же скорости в другом масштабе (d), остаточные скорости 1163 звезд выборки rms3 после удаления из нее звезд ассоциации Скорпиона—Центавра (е), эти же скорости в другом масштабе (f).

по литературным данным этими авторами были собраны также значения лучевых скоростей.

В работе Zari et al. (2018) описаны четыре звездные выборки rms (это выборка звезд на верхней части Главной последовательности): rms1, rms2 и rms3, отобранные согласно их тангенциальным скоростям. В настоящей работе основное внимание уделено анализу двух выборок, а именно rms1 и rms3. Выборка rms1 содержит 43 719 звезд типа Т Тельца, но по сравнению с rms2 и rms3 в нее входит наибольшее количество фоновых объектов. Выборка rms3 содержит 23 686 звезд типа Т Тельца, которые по принципу их отбора являются вероятными членами пояса Гулда.

По выборке звезд rms1 найдены следующие значения параметров экспоненциального распределения: среднее $(z_G)_\odot = -25 \pm 5$ пк и значение шкалы высот $h_G = 56 \pm 6$ пк. С использованием этих параметров предложено избавляться от фона — от звезд, находящихся на больших высотах по отношению к плоскости симметрии пояса Гулда. Для этого предложено перейти к штриховой системе координат l', b' (x', y', z'), связанной с плоскостью симметрии пояса Гулда. При таком подходе отсекается все объекты, наклонно расположенные относительно плоскости симметрии пояса Гулда, и только в узлах остается смешанный звездный состав.

По примерно 1800 звездам из выборки rms3 с измеренными лучевыми скоростями, собственными движениями и параллаксами найдено значение угловой скорости вращения Галактики

$$\Omega_0 = B - A = -30.6 \pm 1.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1},$$

которое получилось достаточно близким к известным оценкам этой величины.

Далее были сформированы остаточные значения скоростей звезд выборки rms3, освобожденные от пекулярной скорости Солнца и дифференциального галактического вращения (шаг II). На этом шаге показано, что относительно местного стандарта покоя звезды движутся со скоростью $5.72 \pm 0.23 \text{ км с}^{-1}$ в направлении $l = 185^\circ \pm 2^\circ$ и $b = -12^\circ \pm 3^\circ$. Таким образом, вектор этой скорости лежит практически в плоскости пояса Гулда. Среди остальных параметров наиболее заметной является величина $K_G = 6 \pm 1 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$ (так называемый K -эффект, описывающий расширение/сжатие звездной системы). На следующем этапе (шаг III и шаг IV) показано, что кинематический K -эффект практически полностью исчезает при удалении из выборки звезд, принадлежащих ассоциации Скорпиона—Центавра. Угловая скорость собственного остаточного вращения здесь мала.

Параллельно анализировалась вся выборка rms3, содержащая более 23 000 звезд в основном с известными собственными движениями и параллаксами, а около 1800 звезд из них имеют определенные лучевые скорости. Отметим, что K -эффект присутствует. Однако в отличие от предыдущей выборки здесь на шаге I получено значение скорости $U_\odot = 10.74 \pm 0.04 \text{ км с}^{-1}$, оно отличается примерно на 5 км с^{-1} от ранее полученного. Это сказывается на определении остаточного движения выборки относительно местного стандарта покоя. Сильно отличаются значения постоянной Оорта A . На последнем шаге показано, что угловая скорость собственного остаточного вращения выборки rms3 составляет $\Omega_G = 6.9 \pm 0.2 \text{ км с}^{-1} \text{ кпк}^{-1}$, и это вращение происходит в противоположном направлении по сравнению с галактическим.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН КП19–270 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP–1200 (1997). <https://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/239>.
2. V. V. Bobylev, Astronomy Letters **32** (12), 816 (2006).
3. V. V. Bobylev, Astronomy Letters **42** (8), 544 (2016).
4. V. V. Bobylev, Astronomy Letters **64** (2020) [in press].
5. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astronomy Letters **42** (1), 1 (2016a).
6. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astronomy Letters **42** (3), 182 (2016b).
7. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astronomy Letters **45** (4), 208 (2019).
8. V. V. Bobylev and A. T. Baykova, Astronomy Reports **64** (4), 326 (2020a).
9. V. V. Bobylev and A. T. Baykova, Astronomy Reports **64** (4), 326 (2020b).
10. C. Bonatto, L. O. Kerber, E. Bica, and B. X. Santiago, Astron. and Astrophys. **446** (1), 121 (2006).

11. A. G. A. Brown, Gaia Collab., A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A1 (2018).
12. T. Camarillo, V. Mathur, T. Mitchell, and B. Ratra, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130** (984), 024101 (2018).
13. T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **618**, A93 (2018).
14. T. M. Dame, D. Hartmann, and P. Thaddeus, *Astrophys. J.* **547** (2), 792 (2001).
15. T. M. Dame, H. Ungerechts, R. S. Cohen, et al., *Astrophys. J.* **322**, 706 (1987).
16. F. Damiani, L. Prisinzano, I. Pillitteri, et al., *Astron. and Astrophys.* **623**, A112 (2019).
17. P. T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, J. H. J. de Bruijne, et al., *Astron. J.* **117** (1), 354 (1999).
18. Ю. Н. Ефремов, *Очаги звездообразования в галактиках.* (Наука, Москва, 1989).
19. F. Elias, J. Cabrera-Cañó, and E. J. Alfaro, *Astron. J.* **131** (5), 2700 (2006).
20. J. A. Frogel and R. Stothers, *Astron. J.* **82**, 890 (1977).
21. G. A. Gontcharov, *Astronomy Letters* **45** (9), 605 (2019).
22. Y. C. Joshi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **378** (2), 768 (2007).
23. M. Kounkel and K. Covey, *Astron. J.* **158** (3), 122 (2019).
24. P. O. Lindblad, *Bull. Astron. Inst. Netherlands* **19**, 34 (1967).
25. P. O. Lindblad, *Astron. and Astrophys.* **363**, 154 (2000).
26. L. Lindegren, J. Hernández, A. Bombrun, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A2 (2018).
27. G. Marton, P. Ábrahám, E. Szegedi-Elek, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **487** (2), 2522 (2019).
28. K. F. Ogorodnikov, *Dynamics of stellar systems* (Pergamon, Oxford, 1965).
29. C. A. Olano, *Astron. J.* **121** (1), 295 (2001).
30. G. N. Ortiz-León, L. Loinard, S. A. Dzib, et al., *Astrophys. J.* **869** (2), L33 (2018).
31. П. П. Паренаго, *Курс звездной астрономии* (Гостехиздат, Москва, 1954).
32. C. A. Perrot and I. A. Grenier, *Astron. and Astrophys.* **404**, 519 (2003).
33. M. A. C. Perryman, L. Lindegren, J. Kovalevsky, et al., *Astron. and Astrophys.* **500**, 501 (1997).
34. A. E. Piskunov, N. V. Kharchenko, S. Röser, et al., *Astron. and Astrophys.* **445** (2), 545 (2006).
35. W. Poppel, *Fundamental of Cosmic Physics* **18**, 1 (1997).
36. A. S. Rastorguev, N. D. Utkin, M. V. Zabolotskikh, et al., *Astrophysical Bulletin* **72** (2), 122 (2017).
37. B. C. Reed, *Astron. J.* **120** (1), 314 (2000).
38. M. J. Sartori, J. R. D. Lépine, and W. S. Dias, *Astron. and Astrophys.* **404**, 913 (2003).
39. E. F. Schlafly, G. Green, D. P. Finkbeiner, et al., *Astrophys. J.* **786** (1), 29 (2014).
40. R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **403** (4), 1829 (2010).
41. C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gómez, et al., *Astron. and Astrophys.* **619**, A155 (2018).
42. R. Stothers and J. A. Frogel, *Astron. J.* **79**, 456 (1974).
43. J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras, *Astron. and Astrophys.* **359**, 82 (2000).
44. T. N. G. Westin, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **60**, 99 (1985).
45. E. Zari, H. Hashemi, A. G. A. Brown, et al., *Astron. and Astrophys.* **620**, A172 (2018).

Estimation of the Gould Belt Scale Height from T Tauri Type Stars of the GAIA DR2 Catalog

V. V. Bobylev and A. T. Bajkova

We analyze the spatial and kinematic properties of a large sample of young T Tauri type stars in a 500 pc radius solar neighborhood, closely related to the Gould belt. The following parameters of the exponential density distribution have been determined: the average $(z_G)_\odot = -25 \pm 5$ pc and scale height $h_G = 56 \pm \pm 6$ pc. We propose a method of excluding background stars from the samples, which are located at large heights with respect to the symmetry plane of the Gould belt. We discovered that the expansion effect for the entire star system, $K_G = 6 \pm 1$ km s⁻¹ kpc⁻¹, is determined mainly by the dynamics of the Scorpius–Centaurus association. We show that the angular velocity of the residual intrinsic rotation of the Gould belt can reach $\Omega_G = 6.9 \pm 0.2$ km s⁻¹ kpc⁻¹ and that this rotation is opposite to the galactic rotation.

Keywords: *stars: kinematics and dynamics—stars: T Tauri, Herbig Ae/Be*