

КИНЕМАТИКА ГОРЯЧИХ СУБКАРЛИКОВ ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

© 2019 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

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

Поступила в редакцию 22.02.2019 г.; после доработки 04.06.2019 г.; принята к публикации 25.06.2019 г.

Изучены кинематические свойства кандидатов в горячие субкарлики (ГС), отобранные Гейером и др. по данным каталога Gaia DR2. Всего мы использовали 12 515 звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30%. Показано, что в зависимости от положения на небесной сфере ГС имеют различную кинематику. Так, вращение вокруг центра Галактики выборки низкоширотных ($|b| < 20^\circ$) ГС происходит с линейной скоростью $V_0 = 221 \pm 5$ км/с. Это говорит о принадлежности их к тонкому диску Галактики. При этом они на $\Delta V_\odot \sim 16$ км/с отстают от местного стандарта покоя из-за асимметричного дрейфа. Высокоширотные ($|b| \geq 20^\circ$) ГС вращаются со значительно меньшей скоростью $V_0 = 168 \pm 6$ км/с. Их отставание от местного стандарта покоя составляет уже $\Delta V_\odot \sim 40$ км/с. По всей выборке из 12 515 ГС найдено значимо отличающееся от нуля положительное вращение вокруг оси x , происходящее с угловой скоростью $\omega_1 = 1.36 \pm 0.24$ км/с/кпк. Изучены выборки ГС, обладающие полнотой при радиусе окрестности $r < 1.5$ кпк. По ним прослежена эволюция параметров эллипсоида остаточных скоростей как в зависимости от широты $|b|$, так и в зависимости от координаты $|z|$. Найдены следующие значения вертикальной шкалы диска: $h = 180 \pm 6$ пк по низкоширотным и $h = 290 \pm 10$ пк по высокоширотным ГС. По высокоширотным ГС получена новая оценка локальной звездной плотности $\Sigma_{\text{out}} = 53 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} = 0.56$ кпк.

Ключевые слова: кинематика, горячие субкарлики, вертикальная шкала диска, тонкий диск, толстый диск, структура Галактики.

DOI: 10.1134/S0320010819080011

ВВЕДЕНИЕ

Горячие субкарлики (sdO, sdB, sdOB) расположены между главной последовательностью и последовательностью белых карликов на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Их особенностью является горение гелия в ядре. Впервые такие звезды были обнаружены Хьюмасоном и Цвикки (1947) при изучении сверхъярких голубых звезд, расположенных вблизи северного полюса Галактики. Дальнейшие спектроскопические исследования выявили дефицит водорода у многих горячих субкарликов. Измерение их температуры и значения поверхностной гравитации (Гринстейн, Сарджент, 1974) позволило определить корректное положение таких звезд на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. А именно, они занимают компактную область на голубом конце горизонтальной ветви, таким образом являясь поздним этапом эволюции достаточно массивных звезд.

Образование горячих субкарликов (ГС) объясняется, например, потерей водорода красным гигантом из внешних слоев еще до того, как в ядре начинаются реакции с участием гелия. Причина такой

потери до конца неясна, но есть предположение, что это результат взаимодействия звезд в двойной системе. Предполагается, что одиночные горячие субкарлики могут быть результатом слияния двух белых карликов.

В настоящее время имеется обширная литература по исследованию одиночных горячих субкарликов (Рэндалл и др., 2016; Латур и др., 2018) и двойных систем с горячими субкарликами (Купфер и др., 2015; Вос и др., 2018). Их изучение может помочь в понимании эволюционных особенностей других галактик, наличие ультрафиолетового избыточного излучения, в частности (Хан и др., 2007), галактических шаровых скоплений (Лей и др., 2016), звездной эволюции (Фонтейн и др., 2012), а также помочь в поиске прародителей сверхновых типа Ia (Гейер и др., 2007).

Только с появлением высокоточных астрометрических данных космического эксперимента Gaia (Браун и др., 2016; 2018; Линдегрэн и др., 2018) появилась возможность масштабного статистического анализа различных галактических подсистем. В частности, статистического и кинематического анализа горячих субкарликов. Разрабатываются

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

методы поиска и выделения таких звезд в массовых обзорах (Бу и др., 2017), появились первые большие каталоги горячих субкарликов (Гейер и др., 2019), содержащие необходимые данные о десятках тысяч звезд.

В работе Бобылева, Байковой (2017а) была изучена выборка протопланетарных туманностей (ППТ), а в работе Бобылева, Байковой (2017б) — выборка планетарных туманностей (ПТ). На основе трех законов распределения плотности были определены значения вертикальной шкалы диска, получены оценки параметров галактического вращения. Многие горячие субкарлики находятся на более продвинутой эволюционной стадии по сравнению с ППТ и ПТ, что важно для изучения различных этапов звездной эволюции.

Целью настоящей работы является анализ кинематики и пространственного распределения большой выборки кандидатов в горячие субкарлики. Такая выборка из 39 800 звезд составлена недавно Гейером и др. (2019) с использованием данных каталога Gaia DR2 (Браун и др., 2018; Линдгрен и др., 2018) и целого ряда фотометрических обзоров неба.

ДАННЫЕ

В настоящей работе мы используем каталог Гейера и др. (2019). В нем содержатся 39 800 кандидатов в горячие субкарлики, отобранные из каталога Gaia DR2 в сочетании с несколькими наземными многополосными фотометрическими обзорами неба. Ожидается, что большинство кандидатов составляют горячие субкарлики спектральных классов O и B, поздние B-звезды на голубой части горизонтальной ветви, горячие звезды асимптотической ветви гигантов (post-AGB stars) и центральные звезды планетарных туманностей. Авторы каталога считают, что загрязнение более холодными звездами составляет около 10%. Отобранные горячие субкарлики распределены по всей небесной сфере. Согласно оценкам Гейера и др., за исключением узкой области вблизи галактической плоскости и зон с Магеллановыми облаками, каталог полон до расстояния 1.5 кпк.

Для каждой звезды в этом каталоге даны значения тригонометрического параллакса π и двух компонент собственного движения $\mu_\alpha \cos \delta$ и μ_δ . Лучевых скоростей нет. Имеется также обширная фотометрическая информация.

Конечно, для нескольких сотен горячих субкарликов измерены их лучевые скорости. Отметим, например, каталоги лучевых скоростей таких звезд в тесных двойных системах Гейера и др. (2015) или Купфера и др. (2015). В тех случаях, когда удастся построить орбиту двойной или кратной системы, значение системной скорости V_γ обычно

определяется с ошибкой 1–5 км/с. Однако для такого массового количества, как 39 800 горячих субкарликов высокоточные лучевые скорости пока не измерены.

В настоящей работе для определения кинематических параметров взяты звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30%. Кроме того, к параллаксам Gaia DR2 была прибавлена поправка нуля-пункта $\Delta\pi$, таким образом новое значение параллакса звезды составляет $\pi + 0.050$ мсд. О необходимости учета такой систематической поправки $\Delta\pi = -0.029$ мсд (здесь знак минус означает, что поправку необходимо прибавить к параллаксам звезд Gaia DR2 для приведения их к эталону) впервые было сказано Линдгреном и др. (2018) и подтверждено Арену и др. (2018). Чуть позже, из анализа различных высокоточных источников шкал расстояний, в работах Стассуна, Торреса (2018), Рисса и др. (2018), Зинна и др. (2018), а также Ялялиевой и др. (2018) было показано, что значение поправки составляет около $\Delta\pi = -0.050$ мсд с ошибкой в несколько единиц последнего знака.

МЕТОДЫ

Параметры вращения Галактики

В настоящей работе мы рассматриваем звезды только с собственными движениями, так как в каталоге Гейера и др. (2019) нет информации о лучевых скоростях. Таким образом, из наблюдений известны 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 π . Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год.

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

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l + r\Omega_0 \cos b - (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 - 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega''_0 - r \cos l \sin b\omega_1 - r \sin l \sin b\omega_2, \quad (1)$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - W_\odot \cos b + R_0(R - R_0) \sin l \sin b\Omega'_0 + 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b\Omega''_0 +$$

$$+ r \sin l \omega_1 - r \cos l \omega_2,$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики (цилиндрический радиус-вектор):

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

Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости, $V_0 = |R_0 \Omega_0|$. Помимо вращения вокруг галактической оси z (описывается параметром Ω), в настоящей работе рассматриваем также угловые скорости вращения вокруг оси x и y , которые описываются параметрами ω_1 и ω_2 соответственно.

Отметим, что в настоящей работе знаки при неизвестных взяты таким образом, чтобы положительные вращения происходили от оси x к y , от y к z и от z к x . Таким образом, угловая скорость вращения Галактики будет отрицательной, в противоположность многим другим работам (Расторгуев и др., 2017; Витязев и др., 2017; Бобылев, Байкова, 2017а), где ее для удобства считают положительной.

Интерес к параметрам ω_1 и ω_2 вызван следующими факторами. Во-первых, это может быть небольшое остаточное вращение системы каталога Gaia DR2 относительно инерциальной системы координат. Во-вторых, это может быть отражением эффекта искривления галактического диска или других процессов, вызывающих вертикальные колебания звезд в Галактике. Для надежного определения параметров ω_1 и ω_2 требуется равномерное распределение анализируемых звезд по всей небесной сфере. Карлики и субкарлики как раз хорошо подходят для решения этой задачи.

В системе условных уравнений (1)–(2) определяемыми являются восемь неизвестных U_\odot , V_\odot , W_\odot , Ω_0 , Ω'_0 , Ω''_0 , ω_1 и ω_2 . Из значения мы находим в результате решения условных уравнений методом наименьших квадратов (МНК). 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 (для каждой выборки ее значение находим заранее, близкой к ошибке единицы веса σ_0 , полученной в результате предварительного решения уравнений), σ_{V_l} и σ_{V_b} — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 (ошибка единицы веса), которая вычисляется при решении условных уравнений вида (1)–(2). Решение ищется в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения звезд с большими невязками.

Отметим 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 (Валле, 2017), $R_0 = 8.4 \pm 0.4$ кпк (де Грийс, Боно, 2017) или $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк (Камарильо и др., 2018). На основе этих обзоров в настоящей работе принято значение $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк.

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 :

$$\begin{aligned} a &= \langle U^2 \rangle - \langle U_\odot^2 \rangle, \\ b &= \langle V^2 \rangle - \langle V_\odot^2 \rangle, \\ c &= \langle W^2 \rangle - \langle W_\odot^2 \rangle, \\ f &= \langle VW \rangle - \langle V_\odot W_\odot \rangle, \\ e &= \langle WU \rangle - \langle W_\odot U_\odot \rangle, \\ d &= \langle UV \rangle - \langle U_\odot V_\odot \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

которые являются коэффициентами уравнения поверхности

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

а также компонентами симметричного тензора моментов остаточных скоростей

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

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

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

$$\begin{aligned} V_b^2 &= a \sin^2 b \cos^2 l + b \sin^2 b \sin^2 l + \\ &+ c \cos^2 b - 2f \cos b \sin b \sin l - \\ &- 2e \cos b \sin b \cos l + \\ &+ 2d \sin l \cos l \sin^2 b, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} V_l V_b &= a \sin l \cos l \sin b + \\ &+ b \sin l \cos l \sin b + \\ &+ f \cos l \cos b - e \sin l \cos b + \\ &+ d(\sin^2 l \sin b - \cos^2 l \sin b), \end{aligned} \quad (9)$$

которые решаются методом наименьших квадратов относительно шести неизвестных a, b, c, f, e, d .

Затем находятся собственные значения тензора (6) $\lambda_{1,2,3}$ из решения векового уравнения

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

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

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

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3.$$

Направления главных осей тензора (10) $L_{1,2,3}$ и $B_{1,2,3}$ находятся из соотношений

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

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

Экспоненциальное распределение плотности

В случае экспоненциального распределения плотности ρ вдоль координатной оси z , имеем

$$\rho = \rho_0 \exp\left(-\frac{|z - z_{\odot}|}{h}\right), \quad (14)$$

где ρ_0 — нормировочная константа, z_{\odot} — среднее значение, вычисленное из z -координат звезд выборки, отражает известный факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики, h — вертикальная шкала. Наблюдаемая гистограмма распределения звезд вдоль оси z описывается аналогичным выражением:

$$N(z) = N_0 \exp\left(-\frac{|z - z_{\odot}|}{h}\right), \quad (15)$$

где N_0 — нормировочный коэффициент.

Поверхностную плотность гравитирующей материи $\Sigma_{\text{out}}(z_{\text{out}})$ в пределах расстояния z_{out} от галактической плоскости $z = 0$ можно найти согласно следующему соотношению:

$$\Sigma_{\text{out}}(z_{\text{out}}) = -\frac{\overline{v_z^2}}{2\pi G} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) \Big|_{z_{\text{out}}} + \frac{2z_{\text{out}}(B^2 - A^2)}{2\pi G}, \quad (16)$$

где гравитационная постоянная G принимается равной единице. Следуя подходу Корчагина и др. (2003), основанного на решении Спитцера (1942) для самогравитирующего диска, имеем

$$\left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}\right) \Big|_{z_{\text{out}}} = h.$$

Зная z_{out} , имея значение средней вертикальной скорости $\overline{v_z^2}$, шкалы высот h , постоянных Оорта A и B , можем получить оценку поверхностной плотности согласно следующему соотношению:

$$\Sigma_{\text{out}}(z_{\text{out}}) = -\frac{\overline{v_z^2} \cdot h}{2\pi G} + \frac{2z_{\text{out}}(B^2 - A^2)}{2\pi G}. \quad (17)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры галактического вращения

Мы столкнулись с тем, что рассматриваемые горячие субкарлики имеют различные кинематические свойства в зависимости от их положения в Галактике. Поэтому вся выборка была разделена на две группы в зависимости от значения модуля галактической широты — низкоширотные ($|b| < 20^\circ$) и высокоширотные ($|b| \geq 20^\circ$) звезды.

Значения найденных для этих звезд кинематических параметров даны в табл. 1. В ней, помимо восьми искомого кинематических параметров, даны следующие значения: среднее расстояние выборки звезд \bar{r} , ошибка единицы веса σ_0 , оценку которой получаем в процессе поиска МНК-решения системы условных уравнений вида (1)–(2), значения постоянных Оорта A и B , которые вычисляются на основе следующих соотношений:

$$A = 0.5\Omega'_0 R_0, \quad B = -\Omega_0 + A, \quad (18)$$

дано также значение линейной скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии $V_0 = |R_0\Omega_0|$. Отметим, что при вычислении кинематических параметров, представленных в табл. 1, звезды были взяты из интервала 0.5–6 кпк, а также были отброшены звезды с большими (более 60 км/с) случайными ошибками измерения собственных движений.

Разделение по признаку относительной ошибки параллаксов сделано по следующим соображениям. С одной стороны, использование звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30% позволяет использовать большое количество объектов и получать оценки искомого параметров с меньшими ошибками. С другой стороны, выборка звезд с ошибками параллаксов менее 15% позволяет получить более локальные параметры, в частности, более достоверные оценки скоростей $(U, V, W)_{\odot}$ и Ω_0 .

Вначале отметим параметры, описывающие кинематику наиболее быстро вращающихся галактических подсистем. Например, Расторгуевым и др. (2017) по данным о 130 мазерах с измеренными средствами РСДБ тригонометрическими параллаксами были найдены следующие скорости: $(U, V)_{\odot} = (11.40, 17.23) \pm (1.33, 1.09)$ км/с, а

Таблица 1. Параметры вращения Галактики, найденные по звездам с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% в верхней части таблицы, и менее 30% в нижней части таблицы

Параметры	Все звезды	$ b < 20^\circ$	$ b \geq 20^\circ$
U_\odot , км/с	11.71 ± 0.59	10.31 ± 0.65	12.80 ± 1.05
V_\odot , км/с	38.51 ± 0.90	28.79 ± 1.16	47.36 ± 1.43
W_\odot , км/с	6.17 ± 0.54	7.19 ± 0.52	4.32 ± 1.15
Ω_0 , км/с/кпк	-26.28 ± 0.52	-28.68 ± 0.52	-23.65 ± 1.03
Ω'_0 , км/с/кпк ²	2.68 ± 0.13	3.46 ± 0.14	2.35 ± 0.23
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.02 ± 0.17	-0.60 ± 0.21	0.97 ± 0.29
ω_1 , км/с/кпк	1.20 ± 0.38	0.91 ± 0.43	1.58 ± 0.65
ω_2 , км/с/кпк	-0.06 ± 0.45	0.41 ± 0.57	0.45 ± 0.74
σ_0 , км/с	39.6	30.5	50.2
N_*	7128	3767	3361
\bar{r} , кпк	1.41	1.35	1.48
A км/с/кпк	10.75 ± 0.51	13.86 ± 0.57	9.41 ± 0.92
B км/с/кпк	-15.53 ± 0.72	-14.82 ± 0.78	-14.24 ± 1.38
V_0 км/с	210 ± 6	229 ± 6	189 ± 9
U_\odot , км/с	12.33 ± 0.51	11.61 ± 0.54	12.11 ± 0.90
V_\odot , км/с	43.14 ± 0.72	28.10 ± 0.84	54.80 ± 1.19
W_\odot , км/с	6.15 ± 0.47	7.07 ± 0.45	4.02 ± 0.98
Ω_0 , км/с/кпк	-24.45 ± 0.32	-27.66 ± 0.31	-20.96 ± 0.65
Ω'_0 , км/с/кпк ²	2.57 ± 0.08	3.27 ± 0.08	1.91 ± 0.15
Ω''_0 , км/с/кпк ³	-0.127 ± 0.066	-0.427 ± 0.069	0.692 ± 0.121
ω_1 , км/с/кпк	1.36 ± 0.24	0.51 ± 0.26	1.90 ± 0.41
ω_2 , км/с/кпк	-0.53 ± 0.27	-0.03 ± 0.33	-0.22 ± 0.45
σ_0 , км/с	44.1	33.1	55.9
N_*	12515	6690	5825
\bar{r} , кпк	1.90	1.83	1.97
A км/с/кпк	10.26 ± 0.31	13.08 ± 0.32	7.64 ± 0.59
B км/с/кпк	-14.18 ± 0.45	-14.58 ± 0.45	-13.32 ± 0.88
V_0 км/с	196 ± 5	221 ± 5	168 ± 6

Примечание. N_* — количество использованных звезд, \bar{r} — среднее расстояние выборки звезд, σ_0 — ошибка единицы веса.

также $\Omega_0 = -28.93 \pm 0.53$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = 3.96 \pm 0.07$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = -0.87 \pm 0.03$ км/с/кпк³, $V_0 = 243 \pm 10$ км/с (для найденного $R_0 = 8.40 \pm 0.12$ кпк). Бобылев, Байкова (2019) по выборке молодых ($\lg t < 8$) рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и расстояниями из каталога Gaia DR2 получили следующие оценки: $(U, V, W)_\odot = (8.53, 11.22, 7.83) \pm \pm (0.38, 0.46, 0.32)$ км/с, $\Omega_0 = -28.71 \pm 0.22$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = 4.100 \pm 0.058$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = -0.736 \pm 0.033$ км/с/кпк³, где $V_0 = 230 \pm 5$ км/с (для принятого $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк).

Значение линейной скорости $V_0 = 229 \pm 6$ км/с, найденной по низкоширотным горячим субкарликам (верхняя часть табл. 1), говорит о принадлежности этой популяции звезд тонкому диску. При этом найденное по ним значение скорости $V_\odot \sim 28$ км/с показывает, что они на ~ 16 км/с отстают от местного стандарта покоя из-за так называемого асимметричного дрейфа. Одно из надежных современных определений параметров пекулярного движения Солнца относительно местного стандарта покоя найдено Шонрихом и др. (2010) $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3) \pm \pm (0.7, 0.5, 0.4)$ км/с. Из-за эффекта асимметричного дрейфа у все более старых галактических объектов увеличивается отставание от местного стандарта покоя — возрастает скорость V_\odot . Как видно из последней колонки нижней части табл. 1, отставание высокоширотных горячих субкарликов от местного стандарта покоя уже составляет более 40 км/с.

По низкоширотным горячим субкарликам неплохо (в согласии с анализом молодых объектов тонкого диска) определяются также значения первой и второй производной угловой скорости вращения Ω'_0 и Ω''_0 . Все же и для этих звезд модуль постоянной Орта A меньше модуля постоянной B , а это говорит о том, что линейная скорость вращения в окрестности увеличивается с ростом R . Для самых молодых галактических объектов, например, мазерных источников или ОВ-звезд характерной является обратная ситуация, то есть модуль постоянной Орта A больше модуля постоянной B (Витязев и др., 2017; Бобылев, Байкова, 2014; 2019).

По высокоширотным горячим субкарликам вторая производная Ω''_0 не определяется, а значение первой производной Ω'_0 сильно отличается от найденного по более молодым объектам значения.

Вращение вокруг осей x и y

По данным табл. 1 можем сделать однозначный вывод о том, что в наших выборках значимо отличающееся от нуля вращение вокруг оси y (ω_2) отсутствует.

А вот значимо отличающееся от нуля вращение вокруг оси x (ω_1) присутствует в выборках высокоширотных горячих субкарликов, а также в выборке “все звезды”. Природа этого вращения пока не установлена. Это, во-первых, может быть интерпретировано как остаточное вращение системы Gaia DR2 относительно системы внегалактических источников. В этом случае представляет ценность значение $\omega_1 = 1.36 \pm 0.24$ км/с/кпк из первой колонки нижней части табл. 1, найденное по всем звездам. Принимая во внимание среднее расстояние этой выборки, получим $\omega_1 = 0.15 \pm 0.03$ мсд/год. Во-вторых, это может быть проявлением какого-то крупномасштабного физического процесса, характерного для высокоширотных горячих субкарликов.

Отметим также, что по низкоширотным объектам скорости вращения ω_1, ω_2 не представляется определить надежно, так как $\sin b$ в уравнении (1) близок к нулю. Поэтому фактически значения параметров ω_1 и ω_2 находятся только из одного уравнения (2).

Линдегрен и др. (2018) сделано заключение о том, что система Gaia DR2 не имеет вращения относительно системы квазаров в пределах 0.15 мсд/год (по трем осям), причем наибольший эффект проявляется в области ярких ($G < 12^m$) звезд.

Цветков, Амосов (2019) из анализа около 6 млн звезд из каталога Gaia DR2 нашли значимо отличающееся от нуля значение $\omega_1 \sim 0.7 \pm 0.1$ км/с/кпк, стабильно сохраняющееся в зависимости от среднего расстояния выборки. Бобылев, Байкова (2019) при изучении около 900 рассеянных звездных скоплений с данными из каталога Gaia DR2 обнаружили вращение всей этой выборки вокруг галактической оси x с угловой скоростью $\omega_1 = 0.48 \pm 0.15$ км/с/кпк.

В основе второго подхода лежит представление о влиянии на кинематику наблюдаемых звезд крупномасштабного искривления галактического диска. На основе простейшей модели твердотельного вращения, например, Миямото и Чжу (1998) по собственным движениям звезд О–В5 нашли вращение этой системы звезд вокруг галактической оси x с угловой скоростью около 4 км/с/кпк. По собственным движениям примерно 80 000 звезд сгущения красных гигантов Бобылевым (2010) найдено вращение этой системы звезд вокруг оси x с угловой скоростью около -4 км/с/кпк. По

цефеидам было найдено вращение вокруг оси x со скоростью -15 ± 5 км/с/кпк (Бобылев, 2013). Наблюдения в целом подтверждают асимметрию в вертикальных скоростях звезд (Лопес-Корредойра и др., 2014; Ромеро-Гомес и др., 2018), но для описания явления требуется применение сложной модели прецессии диска.

Параметры эллипсоида остаточных скоростей

При формировании моментов (4) для каждой подвыборки соответствующие скорости U_{\odot} , V_{\odot} , W_{\odot} были взяты из табл. 1. Кроме того, скорости звезд были исправлены за вращение Галактики. Для этого были использованы параметры кривой вращения, найденные по низкоширотным горячим субкарликам (верхняя часть табл. 1).

По выборке из 4181 низкоширотных звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% найдены следующие дисперсии их остаточных скоростей:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 37.4 \pm 0.9 \text{ км/с}, \\ \sigma_2 &= 28.1 \pm 0.7 \text{ км/с}, \\ \sigma_3 &= 22.8 \pm 0.9 \text{ км/с},\end{aligned}\quad (19)$$

и следующие параметры ориентации этого эллипсоида:

$$\begin{aligned}L_1 &= 3 \pm 4^\circ, & B_1 &= 1 \pm 4^\circ, \\ L_2 &= 93 \pm 3^\circ, & B_2 &= -2 \pm 3^\circ, \\ L_3 &= 127 \pm 3^\circ, & B_3 &= 88 \pm 4^\circ.\end{aligned}\quad (20)$$

Очевидно, что ориентация этого эллипсоида остаточных скоростей совпадает с координатными осями x, y, z с высокой точностью. По низкоширотным горячим субкарликам, но с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30% (7156 звезд) найдены следующие дисперсии остаточных скоростей:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 38.0 \pm 0.6 \text{ км/с}, \\ \sigma_2 &= 32.6 \pm 0.8 \text{ км/с}, \\ \sigma_3 &= 25.7 \pm 0.6 \text{ км/с},\end{aligned}\quad (21)$$

а ориентация этого эллипсоида такова

$$\begin{aligned}L_1 &= 15 \pm 8^\circ, & B_1 &= 3 \pm 1^\circ, \\ L_2 &= 105 \pm 4^\circ, & B_2 &= -2 \pm 2^\circ, \\ L_3 &= 156 \pm 4^\circ, & B_3 &= 87 \pm 3^\circ.\end{aligned}\quad (22)$$

Ориентация этого эллипсоида также близка к направлению координатных осей x, y, z , лишь только значение L_1 определяется с большой ошибкой.

По выборке из 3584 высокоширотных горячих субкарликов с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% найдены следующие дисперсии их остаточных скоростей:

$$\sigma_1 = 51.9 \pm 1.1 \text{ км/с}, \quad (23)$$

$$\sigma_2 = 46.6 \pm 1.8 \text{ км/с},$$

$$\sigma_3 = 34.8 \pm 0.8 \text{ км/с},$$

и параметры ориентации этого эллипсоида

$$\begin{aligned}L_1 &= 13 \pm 6^\circ, & B_1 &= -1 \pm 1^\circ, \\ L_2 &= 103 \pm 10^\circ, & B_2 &= -15 \pm 2^\circ, \\ L_3 &= 98 \pm 3^\circ, & B_3 &= 75 \pm 4^\circ.\end{aligned}\quad (24)$$

На основе таких звезд, но с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30% (6094 звезд) найдены следующие дисперсии остаточных скоростей:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= 56.7 \pm 0.9 \text{ км/с}, \\ \sigma_2 &= 54.3 \pm 1.3 \text{ км/с}, \\ \sigma_3 &= 39.8 \pm 0.6 \text{ км/с}\end{aligned}\quad (25)$$

и параметры ориентации этого эллипсоида

$$\begin{aligned}L_1 &= 35 \pm 14^\circ, & B_1 &= -6 \pm 3^\circ, \\ L_2 &= 125 \pm 39^\circ, & B_2 &= -5 \pm 2^\circ, \\ L_3 &= 74 \pm 39^\circ, & B_3 &= 82 \pm 2^\circ.\end{aligned}\quad (26)$$

Помимо явной разницы в размерах главных полуосей эллипсоидов (19)–(21) и (23)–(25), можем отметить значительное отличие в ориентации третьей оси эллипсоида высокоширотных горячих субкарликов. Эта ось (B_3) значимо отклоняется от направления на галактический полюс на величину $15 \pm 4^\circ$ (24), такой наклон подтверждает и направление второй оси ($B_2 = -15 \pm 2^\circ$) данного эллипсоида.

Найденные оценки интересно сравнить, например, с результатами анализа белых карликов. Паули и др. (2006) определили следующие значения дисперсий скоростей: $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (34, 24, 18)$ км/с для выборки из 361 белого карлика тонкого диска, $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (79, 36, 46)$ км/с для выборки из 27 белых карликов толстого диска, $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (138, 95, 47)$ км/с для выборки из 7 белых карликов гало. Отметим, что $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W)$ — это дисперсии остаточных скоростей, направленные вдоль осей координат (x, y, z) . Направления главных осей эллипсоидов низкоширотных (20)–(22) субкарликов практически совпадают с направлением координатных осей (x, y, z) . Это же можно сказать и об ориентации эллипсоида (24). Можем видеть хорошее согласие между значениями осей эллипсоидов низкоширотных (19)–(21) субкарликов и осями белых карликов тонкого диска. В то же время оси эллипсоидов высокоширотных (23)–(25) субкарликов слегка меньше осей белых карликов толстого диска из работы Паули и др. (2006).

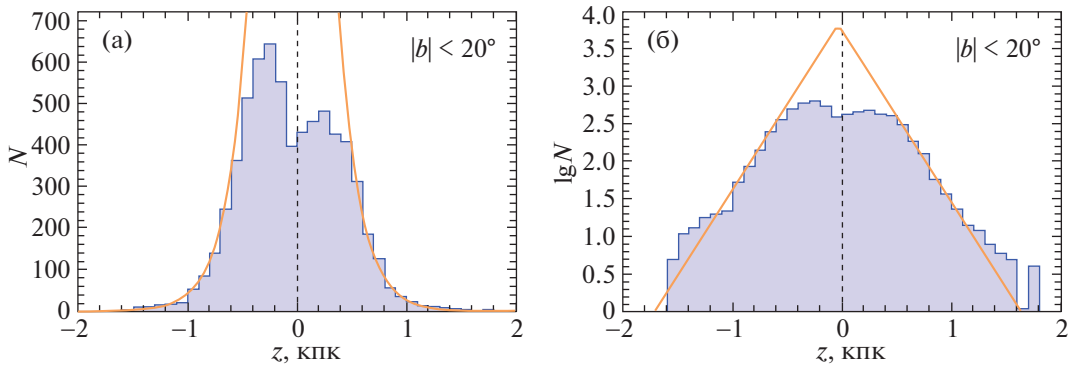


Рис. 1. Гистограмма z -распределения низкоширотных горячих субкарликов в обычной (а) и логарифмической шкале (б).

Отметим работу Роуэлла, Хэмбли (2011), в которой достаточно подробно обсуждаются различные свойства тонкого и толстого дисков, а также гало. В частности, для экспоненциального закона (15) они считают характерным значение шкалы высот $h = 250$ пк для тонкого диска. В своей табл. 4 эти авторы отобразили также следующие параметры: $(U, V, W)_{\odot} = (8.62, 20.04, 7.10)$ км/с и $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (32.4, 23.0, 18.1)$ км/с для звезд тонкого диска, $(U, V, W)_{\odot} = (11.0, 42.0, 12.0)$ км/с и $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (50.0, 56.0, 34.0)$ км/с для звезд толстого диска, $(U, V, W)_{\odot} = (26, 199, 12)$ км/с и $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (141.0, 106.0, 94.0)$ км/с для звезд гало. Эти оценки получены Фухсом и др. (2009) для тонкого диска по выборке М-звезд из каталога SDSS, а также Чибой, Бирсом (2000) для толстого диска и гало по малометаллическим звездам околосолнечной окрестности. Наши результаты близки к соответствующим величинам для тонкого и толстого дисков.

В работе Бобылева, Байковой (2017а) по выборке относительно молодых протопланетарных туманностей (со светимостями более $5000 L_{\odot}$) найдены следующие значения главных полуосей тензора дисперсий остаточных скоростей: $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (47, 41, 29)$ км/с; по выборке более старых протопланетарных туманностей (со светимостями, равными $4000 L_{\odot}$ или $3500 L_{\odot}$): $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (50, 38, 28)$ км/с. Наконец, по наиболее старым туманностям, принадлежащим гало (со светимостями, равными $1700 L_{\odot}$), $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (91, 49, 36)$ км/с.

Из анализа собственных движений и параллакс звезд из каталога Gaia DR1 (Браун и др., 2016) Ангиано и др. (2018) нашли следующие дисперсии: $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (33, 28, 23) \pm (4, 2, 2)$ км/с для звезд тонкого и $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (57, 38, 37) \pm (6, 5, 4)$ км/с для толстого диска. Они показали, что для различных звездных группировок тонкого диска отклонение вертекса (l_{uv}) в UV -плоскости

меняется в очень широких пределах, -5° до $+40^{\circ}$, а угол наклона (l_{uw}) в UW -плоскости колеблется от -10° до $+15^{\circ}$.

Можем сделать вывод о том, что низкоширотные горячие субкарлики демонстрируют кинематику тонкого диска, а высокоширотные — толстого диска. Нельзя, конечно, исключить присутствия в рассмотренных выборках звезд гало. Однако их влияние на кинематику в статистическом смысле ничтожно.

Параметры распределения плотности

Значения z_{\odot} и h низкоширотных и высокоширотных горячих субкарликов, используемые далее для построения экспоненциального распределения (15), даны в верхней части табл. 2. В средней части таблицы даны результаты анализа различных галактических подсистем, найденные другими авторами.

Выборка 1 в работе Бобылева, Байковой (2017а) состоит из относительно молодых протопланетарных туманностей со светимостями более $5000 L_{\odot}$. А выборка 2 — это более старые протопланетарные туманности со светимостями, равными $4000 L_{\odot}$ или $3500 L_{\odot}$. Как можно видеть из табл. 2, полученная по низкоширотным горячим субкарликам оценка $h = 190 \pm 4$ близка к значению, найденному по планетарным туманностям (Бобылев, Байкова, 2017б). Полученная же по высокоширотным горячим субкарликам оценка $h = 700 \pm 8$ превышает значение, найденное по выборке 2 протопланетарных туманностей (Бобылев, Байкова, 2017а).

На рис. 1 даны гистограммы z -распределения низкоширотных, а на рис. 2 — высокоширотных горячих субкарликов. Следует обратить внимание на отличие в размерах горизонтальных осей этих рисунков. На рисунках виден дефицит звезд в области $z = 0$. На рис. 2 такой провал во многом обязан примененному условию $|b| \geq 20^{\circ}$, а “срезанная”

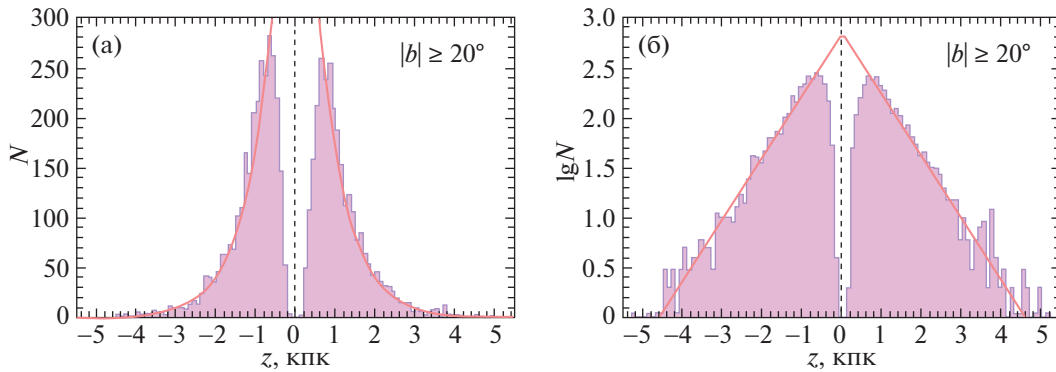


Рис. 2. Гистограмма z -распределения высокоширотных горячих субкарликов в обычной (а) и логарифмической шкале (б).

верхушка распределения на рис. 1 вызвана условиями отбора звезд-кандидатов в каталоге Гейера и др. (2019).

Оценка поверхностной плотности

Для получения оценки поверхностной плотности требуется звездная выборка, обладающая полнотой. Согласно оценкам Гейера и др. (2019), за исключением узкой области вблизи галактической плоскости, каталог горячих субкарликов полон до расстояния 1.5 кпк, которое мы и принимаем за границу полноты. Таким образом, в данном разделе рассматриваем низкоширотные и высокоширотные ГС, отобранные при условии $r < 1.5$ кпк. Результаты их анализа отражены в табл. 2 и 3, а также на рис. 3 и 4.

Как можно видеть из табл. 2, значение шкалы высот h остается практически неизменным для низкоширотных ГС при различных условиях формирования выборок. А вот у высокоширотных ГС значение h сильно зависит от использованных ограничений. Можем видеть, что умеренное значение $h = 290 \pm 10$ кпк находится в согласии с результатами анализа белых карликов (Веннес и др., 2002) и планетарных туманностей (Бобылев, Байкова, 2017б).

Как можно видеть из табл. 3, третья ось у всех эллипсоидов близка к направлению на полюс Галактики. Поэтому в формуле (17) можем положить $\overline{v_z^2} = \sigma_3^2$. По-видимому, это единственный способ оценки вертикальной скорости, так в нашем случае мы не имеем информации о лучевых скоростях, поэтому не можем напрямую вычислять пространственные скорости U, V, W .

Сделаем оценку для среднего значения $\overline{|z|}$, указанного в табл. 3. Видим, что у низкоширотных ГС $\overline{|z|} = 0.17$ кпк, что не представляет реального интереса для оценки Σ_{out} , из-за малого значения z .

По высокоширотным ГС при $\sigma_\pi/\pi < 30\%$ и $z_{\text{out}} = \overline{|z|} = 0.56$ кпк находим $\Sigma_{\text{out}} = 53 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$.

Для сравнения можно указать некоторые значения поверхностной плотности, полученные другими авторами. Корчагин и др. (2003) по выборке из около 1500 красных гигантов из каталога HIPPARCOS (1997) нашли $\Sigma_{\text{out}} = 46 \pm 2 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} = 0.35$ кпк. По гигантам из каталога HIPPARCOS (1997) Холмберг, Финн (2004) оценили значение локальной плотности видимого вещества $\Sigma_{\text{out}} = 56 \pm 6 M_\odot/\text{кпк}^2$, а также всей гравитирующей материи, включающей диск и гало темной материи, $\Sigma_{\text{out}} = 74 \pm 6 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} = 1.1$ кпк. По данным об около 16 000 G-карликах из каталога SEGUE (Янни и др., 2007) Бови, Рикс (2013) получили оценку локальной звездной плотности $\Sigma_{\text{out}} = 38 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$, а также всей гравитирующей материи $\Sigma_{\text{out}} = 68 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} = 1.1$ кпк. По звездам каталога TGAS (Tycho-Gaia Astrometric Solution, Прусти и др., 2016; Линдегрэн и др., 2016) Киппер и др. (2018) нашли $\Sigma_{\text{out}} = 42 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} \leq 0.75$ кпк.

Зависимость кинематических параметров от $|z|$

В данном разделе рассматриваем зависимость некоторых кинематических параметров от координаты $|z|$ на основе выборки ГС, обладающей полнотой. Для этого была использована выборка ГС с ошибками $\sigma_\pi/\pi < 30\%$, которую мы разделили на четыре неперекрывающиеся части в зависимости от значения $|z|$. Результаты отражены в табл. 4. Уравнения (1)–(2) решались с пятью неизвестными $U_\odot, V_\odot, W_\odot, \Omega_0,$ и Ω'_0 . Здесь мы не делили звезды на низкоширотные и высокоширотные. При этом видим хорошее согласие параметров эллипсоида остаточных скоростей, найденных как по высокоширотным (табл. 3), так и по ГС с большими

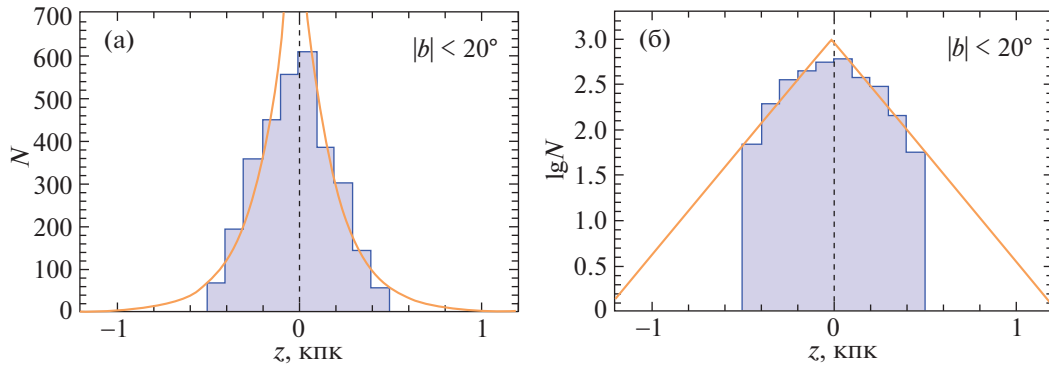


Рис. 3. Гистограмма z -распределения низкоширотных горячих субкарликов, отобранных при условии $r < 1.5$ кпк, в обычной (а) и логарифмической шкале (б).

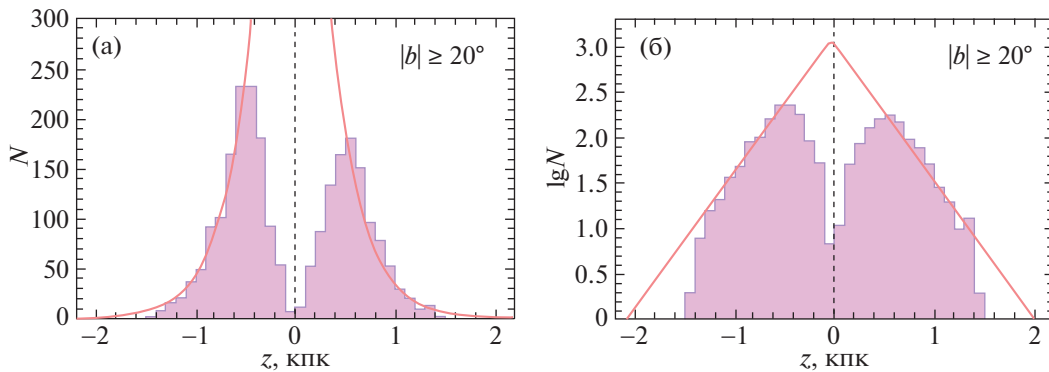


Рис. 4. Гистограмма z -распределения высокоширотных горячих субкарликов, отобранных при условии $r < 1.5$ кпк, в обычной (а) и логарифмической шкале (б).

значениями $|z|$ (табл. 4). В частности, при больших $|z|$ $\sigma_3 \rightarrow 30$ км/с. Таким образом, мы правильно оценили значение поверхностной плотности Σ_{out} . По данным этой таблицы, путем вписывания линейного тренда по четырем измерениям, получена оценка градиента скорости кругового вращения V_0 в зависимости от $|z|$, которая составила $\frac{\Delta V_0}{\Delta |z|} = -64 \pm 5$ км/с/кпк. Для сравнения в работе Чибы, Бирса (2000) по выборке малометаллических звезд околосолнечной окрестности были получены следующие оценки подобных градиентов: $\frac{\Delta V_0}{\Delta |z|} = -30 \pm 3$ км/с/кпк для звезд тонкого диска с эллипсоидом скоростей $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (46, 50, 35) \pm (4, 4, 3)$ км/с; $\frac{\Delta V_0}{\Delta |z|} = -52 \pm 6$ км/с/кпк для звезд гало с очень вытянутым эллипсоидом скоростей $(\sigma_U, \sigma_V, \sigma_W) = (141, 106, 94) \pm (11, 9, 8)$ км/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена кинематика горячих тусклых звезд из каталога Гейера и др. (2019). Это 39 800 кандидатов в горячие субкарлики, отобранные ими из

каталога Gaia DR2 с использованием данных из нескольких многополосных фотометрических обзоров неба. В настоящей работе мы проанализировали более 12 500 собственных движений звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 30%. Таким образом, исследован огромный массив современных высокоточных данных, имеющий большую ценность для выполнения статического анализа.

Звезды были разделены на две части в зависимости от галактической широты, на низкоширотную ($|b| < 20^\circ$) и высокоширотную ($|b| \geq 20^\circ$) выборки. Такая разбивка необходима для построения гистограмм в широком диапазоне z и определения по ним параметров экспоненциального распределения плотности. Показано, что эти две выборки обладают совершенно разной кинематикой. Параметры вращения Галактики мы определяли по относительно более далеким объектам, у которых ошибки параллаксов не превышают 30%. В таком случае, по крайней мере, первая производная угловой скорости галактического вращения достаточно уверенно определяется. А для последующего определения параметров эллипсоида остаточных скоростей используем уже более надежные дан-

Таблица 2. Значения параметров z_{\odot} и h

Объекты	N_{\star}	z_{\odot} , пк	h , пк	Ссылка
ГС, $ b < 20^{\circ}$	6690	-45 ± 5	190 ± 4	Настоящая работа
ГС, $ b \geq 20^{\circ}$	5825	-5 ± 17	700 ± 8	Настоящая работа
Цефеиды, $t \sim 75$ млн лет	246	-23 ± 2	70 ± 2	(5)
Цефеиды, $t \sim 138$ млн лет	250	-24 ± 2	84 ± 2	(5)
ППТ, выборка 1	107	-28 ± 12	146 ± 15	(1)
РЗС, 200–1000 млн лет	148	-15 ± 2	150 ± 27	(3)
ПТ	230	-6 ± 7	197 ± 10	(2)
Белые карлики	717	0	220–300	(4)
ППТ, выборка 2	88	-37 ± 53	568 ± 42	(1)
Горячие субкарлики диска	114	0	930 ± 90	(6)
ГС, $ b < 20^{\circ}$, $r < 1.5$ кпк	3118	-15 ± 4	180 ± 6	Настоящая работа
ГС, $ b \geq 20^{\circ}$, $r < 1.5$ кпк	2363	-46 ± 13	290 ± 10	Настоящая работа

Примечание. N_{\star} — количество объектов, ППТ — протопланетарные туманности, ПТ — планетарные туманности, ГС — горячие субкарлики, (1) — Бобылев, Байкова (2017а), (2) — Бобылев, Байкова (2017б), (3) — Бонато и др. (2006), (4) — Веннес и др. (2002), (5) — Бобылев, Байкова (2016), (6) — Альтман и др. (2004).

Таблица 3. Параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные по выборке, обладающей полнотой

Параметр	$ b < 20^{\circ}$		$ b \geq 20^{\circ}$	
	σ_{π}/π	<15%	<30%	<15%
N_{\star}	2938	3761	2176	2920
\bar{r} , кпк	0.96	0.97	0.98	0.96
$ \bar{z} $, кпк	0.16	0.17	0.57	0.56
σ_1 , км/с	35.60 ± 0.72	34.91 ± 0.58	45.23 ± 0.86	43.78 ± 0.74
σ_2 , км/с	28.19 ± 2.11	26.83 ± 1.74	37.68 ± 1.80	37.70 ± 1.85
σ_3 , км/с	21.04 ± 1.06	20.76 ± 0.74	30.18 ± 0.84	27.89 ± 0.69
L_1, B_1	$10 \pm 12^{\circ}, 3 \pm 3^{\circ}$	$9 \pm 9^{\circ}, 2 \pm 3^{\circ}$	$4 \pm 8^{\circ}, -1 \pm 2^{\circ}$	$12 \pm 9^{\circ}, -2 \pm 2^{\circ}$
L_2, B_2	$100 \pm 4^{\circ}, 8 \pm 3^{\circ}$	$99 \pm 3^{\circ}, 6 \pm 2^{\circ}$	$94 \pm 7^{\circ}, -1 \pm 2^{\circ}$	$102 \pm 9^{\circ}, -6 \pm 2^{\circ}$
L_3, B_3	$262 \pm 4^{\circ}, 81 \pm 5^{\circ}$	$258 \pm 3^{\circ}, 83 \pm 4^{\circ}$	$53 \pm 7^{\circ}, 88 \pm 7^{\circ}$	$81 \pm 9^{\circ}, 84 \pm 4^{\circ}$

Примечание. N_{\star} — количество использованных звезд, \bar{r} — среднее расстояние выборки звезд.

ные — объекты с ошибками тригонометрических параллаксов не более 15%.

Так, вращение вокруг центра Галактики выборки низкоширотных горячих субкарликов происходит с линейной скоростью $V_0 = 221 \pm 5$ км/с. Это го-

ворит о принадлежности их к тонкому диску Галактики. При этом они на $\Delta V_{\odot} \sim 16$ км/с отстают от местного стандарта покоя из-за асимметричного дрейфа. Высокоширотные горячие субкарлики вращаются со значительно меньшей скоростью

Таблица 4. Параметры эллипсоида остаточных скоростей, найденные по выборке, обладающей полнотой

Параметр	$ z < 0.2$ кпк	$ z : 0.2 - 0.4$ кпк	$ z : 0.4 - 0.6$ кпк	$ z \geq 0.6$ кпк
N_*	2499	1971	1193	1114
\bar{r} , кпк	0.82	0.99	1.04	1.18
$\overline{ z }$, кпк	0.10	0.29	0.49	0.81
U_\odot , км/с	8.2 ± 0.7	9.2 ± 0.9	9.6 ± 1.3	11.3 ± 1.5
V_\odot , км/с	17.2 ± 1.0	23.4 ± 1.4	27.0 ± 1.9	41.3 ± 2.1
W_\odot , км/с	6.1 ± 0.5	7.5 ± 0.8	6.7 ± 1.2	4.8 ± 1.9
Ω_0 , км/с/кпк	-30.0 ± 0.9	-27.7 ± 1.1	-26.7 ± 1.7	-23.9 ± 2.3
Ω'_0 , км/с/кпк ²	3.3 ± 0.2	3.6 ± 0.2	3.1 ± 0.3	2.5 ± 0.5
V_0 , км/с	240 ± 9	221 ± 10	214 ± 14	191 ± 19
σ_1 , км/с	34.0 ± 0.8	36.7 ± 0.8	41.7 ± 1.5	45.5 ± 1.1
σ_2 , км/с	24.2 ± 2.9	27.3 ± 1.2	33.6 ± 4.8	37.1 ± 2.6
σ_3 , км/с	19.2 ± 1.3	23.1 ± 0.7	28.2 ± 1.4	31.2 ± 0.9
L_1, B_1	$10 \pm 20^\circ, 4 \pm 9^\circ$	$2 \pm 2^\circ, 0 \pm 1^\circ$	$1 \pm 20^\circ, 1 \pm 5^\circ$	$8 \pm 20^\circ, -2 \pm 6^\circ$
L_2, B_2	$100 \pm 3^\circ, 9 \pm 3^\circ$	$92 \pm 4^\circ, 8 \pm 2^\circ$	$91 \pm 16^\circ, -2 \pm 5^\circ$	$98 \pm 7^\circ, -1 \pm 3^\circ$
L_3, B_3	$257 \pm 3^\circ, 80 \pm 7^\circ$	$91 \pm 4^\circ, 82 \pm 8^\circ$	$116 \pm 16^\circ, 87 \pm 17^\circ$	$40 \pm 7^\circ, 88 \pm 9^\circ$

Примечание. N_* — количество использованных звезд, \bar{r} — среднее расстояние выборки звезд.

$V_0 = 168 \pm 6$ км/с, более характерной для толстого диска. Их отставание от местного стандарта покоя составляет $\Delta V_\odot \sim 40$ км/с.

При совместном анализе всей выборки из 12 515 звезд с ошибками параллакса менее 30% найдено значимо отличающееся от нуля положительное вращение вокруг оси x , происходящее с угловой скоростью $\omega_1 = 1.36 \pm 0.24$ км/с/кпк. Выраженная в других единицах, с учетом среднего расстояние звезд выборки, эта угловая скорость равна $\omega_1 = 0.15 \pm 0.03$ мсд/год. Последнее значение не противоречит оценкам Линдблада и др. (2018) о величине остаточного вращения системы Gaia DR2 относительно инерциальной системы координат.

По выборке из 4181 низкоширотных горячих субкарликов с ошибками параллакса менее 15% определены следующие значения главных полуосей эллипсоида остаточных скоростей: $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (37.4, 28.1, 22.8) \pm (0.9, 0.7, 0.9)$ км/с. С точностью до $3-4^\circ$ главные оси данного эллипсоида совпадают по направлениям с осями галактической прямоугольной системы координат x, y, z .

По выборке из 3584 высокоширотных горячих субкарликов с ошибками параллакса менее 15% найдено $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = (51.9, 46.6, 34.8) \pm (1.1, 1.8, 0.8)$ км/с, причем третья ось этого эллипсоида (24) отклоняется от направления на галактический полюс на величину $15 \pm 4^\circ$. Такое отклонение подтверждается также направлением второй оси $B_2 = -15 \pm 2^\circ$, причем оценка ошибок здесь получена по каждой оси независимо.

Изучены две выборки ГС, обладающие полнотой при радиусе окрестности $r < 1.5$ кпк. Найдены следующие значения вертикальной шкалы диска: $h = 180 \pm 6$ пк по низкоширотным и $h = 290 \pm 10$ пк по высокоширотным ГС. Здесь по высокоширотным ГС получена новая оценка локальной звездной плотности $\Sigma_{\text{out}} = 53 \pm 4 M_\odot/\text{кпк}^2$ для $z_{\text{out}} = 0.56$ кпк.

По выборке, обладающей полнотой с ошибками $\sigma_\pi/\pi < 30\%$, прослежена эволюция кинематических параметров от координаты $|z|$. Получена оценка градиента скорости кругового вращения V_0 вдоль координаты $|z|$, $\frac{\Delta V_0}{\Delta |z|} = -64 \pm 5$ км/с/кпк.

Все сказанное позволяет заключить, что низкоширотные горячие субкарлики демонстрируют

кинематику тонкого диска, а высокоширотные — толстого диска. Это говорит о том, что низкоширотные горячие субкарлики в большинстве своем “унаследовали” кинематические свойства относительно молодых массивных звезд-предшественников. Высокоширотные ГС менее однородны в кинематическом отношении, их свойства сильно зависят от положения над галактической плоскостью и гелиоцентрического расстояния. Повидимому, их предшественниками являются более “разогретые” в кинематическом отношении объекты, успевшие уже достаточно далеко удалиться от галактической плоскости.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Альтман и др. (M. Altmann, H. Edelmann, and K.S. de Boer), *Astron. Astrophys.* **414**, 181 (2004).
2. Ангиано и др. (B. Anguiano, S.R. Majewski, K.C. Freeman, A.W. Mutschang, and M.C. Smith), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **474**, 854 (2018).
3. Арену и др. (Gaia Collaboration, F. Arenou, X. Luri, C. Babusiaux, C. Fabricius, A. Helmi, T. Muraveva, A.C. Robin, F. Spoto, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 17 (2018).
4. Бови, Рикс (J. Vovy and H.-W. Rix), *Astrophys. J.* **779**, 115 (2013).
5. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 667 (2010) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **36**, 634 (2010)].
6. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **39**, 909 (2013) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **39**, 819 (2013)].
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **40**, 435 (2014) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **40**, 389 (2014)].
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **43**, 500 (2017a) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **43**, 452 (2017a)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **43**, 341 (2017b) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **43**, 304 (2017b)].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 249 (2019) [V. V. Bobylev, *Astron. Lett.* **45**, 208 (2019)].
12. Бонато и др. (C. Bonatto, L.O. Kerber, E. Vica, and V.X. Santiago), *Astron. Astrophys.* **446**, 121 (2006).
13. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 2 (2016).
14. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D. W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
15. Бу и др. (Y. Bu, Z. Lei, G. Zhao, J. Wu, and J. Pan), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **233**, 2 (2017).
16. Валле (J. P. Vallée), *Astrophysics and Space Science* **362**, 79 (2017).
17. Веннес и др. (S. Vennes, R.J. Smith, B.J. Boyle, S.M. Croom, A. Kawka, T. Shanks, L. Miller, and N. Loaring), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **335**, 673 (2002).
18. Витязев В.В., Цветков А.С., Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрофизика* **60**, 503 (2017).
19. Вос и др. (J. Vos, P. Németh, M. Vučković, R. Østensen, and S. Parsons), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **473**, 693 (2018).
20. Гейер et al. (S. Geier, S. Nesslinger, U. Heber, N. Przybilla, R. Napiwotzki, and R.-P. Kudritzki), *Astron. Astrophys.* **464**, 299 (2007).
21. Гейер и др. (S. Geier, T. Kupfer, U. Heber, V. Schaffenroth, B.N. Barlow, R.H. Oestensen, S.J. O’Toole, E. Ziegerer, et al.), *Astron. Astrophys.* **577**, 26 (2015).
22. Гейер и др. (S. Geier, R. Raddi, N.P. Gentile Fusillo, and T.R. Marsh), *Astron. Astrophys.* **621**, 38 (2019).
23. де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **232**, 22 (2017).
24. Гринстейн, Сарджент (J.L. Greenstein and A.I. Sargent), *Astrophys. J. Suppl.* **28**, 157 (1974).
25. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), arXiv: 1805.02650 (2018).
26. Камарильо и др. (T. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat), *PASP* **130**, 4101 (2018).
27. Корчагин и др. (V.I. Korchagin, T.M. Girard, T.V. Borkova, D.I. Dinescu, and W.F. van Altena), *Astron. J.* **126**, 2896 (2003).
28. Киппер и др. (R. Kipper, E. Tempel, and P. Tenjes), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **473**, 2188 (2018).
29. Купфер и др. (T. Kupfer, S. Geier, U. Heber, R.H. Østensen, B.N. Barlow, P.F.L. Maxted, C. Heuser, V. Schaffenroth, and B.T. Gänsicke), *Astron. Astrophys.* **576**, 44 (2015).
30. Латур и др. (M. Latour, P. Chayer, E.M. Green, A. Irrgang, and G. Fontaine), *Astron. Astrophys.* **609**, 89 (2018).
31. Лей и др. (Z. Lei, G. Zhao, A. Zeng, L. Shen, Z. Lan, D. Jiang, and Z. Han), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **463**, 3449 (2016).
32. Линдегрэн и др. (L. Lindegren, U. Lammers, U. Bastian, J. Hernandez, S. Klioner, D. Hobbs, A. Bombrun, D. Michalik, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 4 (2016).
33. Линдегрэн и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmuller, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 2 (2018).
34. Лопес-Корредойра и др. (M. López-Corredoira, H. Abedi, F. Garzón, and F. Figueras), *Astron. Astrophys.* **572**, 101 (2014).
35. Миямото, Чжу (M. Miyamoto and Z. Zhu), *Astron. J.* **115**, 1483 (1998).
36. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965).
37. Паули и др. (E.-M. Pauli, R. Napiwotzki, U. Heber, M. Altmann, and M. Odenkirchen), *Astron. and Astrophys.* **447**, 173 (2006).

38. 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).
39. 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., 2017, *Astrophys. Bulletin*, **72**, 122 (2017)].
40. Рисс и др. (A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, B. Vucicarella, M.G. Lattanzi, J.W. MacKenty, J.B. Bowers, et al.), *Astrophys. J.* **861**, 126 (2018).
41. Ромеро-Гомес и др. (M. Romero-Gómez, C. Mateu, L. Aguilar, F. Figueras, and A. Castro-Ginard), arXiv: 1812.07576 (2018).
42. Роуэлл, Хэмбли (N. Rowell and N.C. Hambly), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **417**, 93 (2011).
43. Рэндалл и др. (S.K. Randall, A. Calamida, G. Fontaine, M. Monelli, G. Bono, M.L. Alonso, V. Van Grootel, P. Brassard, et al.), *Astron. and Astrophys.* **589**, 1 (2016).
44. Спитцер (L. Spitzer), *Astrophys. J.* **95**, 329 (1942).
45. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).
46. Фонтейн и др. (G. Fontaine, P. Brassard, S. Charpinet, E.M. Green, S.K. Randall, and V. Van Grootel), *Astron. and Astrophys.* **539**, 12 (2012).
47. Фухс и др. (B. Fuchs, C. Dettbarn, H.-W. Rix, T.C. Beers, D. Bizyaev, H. Brewington, H. Jahreiss, R. Klement, et al.), *Astron. J.* **137**, 4149 (2009).
48. Хан и др. (Z. Han, Ph. Podsiadlowski, and A.E. Lynas-Gray), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **380**, 1098 (2007).
49. Холмберг, Флинн (J. Holmberg and C. Flynn), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **352**, 440 (2004).
50. Хьюмасон, Цвикки (M.L. Humason and F. Zwicky), *Astrophys. J.* **105**, 85 (1947).
51. Цветков А.С., Амосов Ф.А., *Письма в Астрон. журн.* **45**, 495 (2019).
52. Чибба, Бирс (M. Chiba and T.C. Beers), *Astron. J.* **119**, 2843 (2000).
53. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **403**, 1829 (2010).
54. Ялялиева Л.Н., Чемель А.А., Глушкова Е.В., Дамбис А.К., Клиничев А.Д., *Астрофиз. Бюллетень*, **73**, 355 (2018) [L.N. Yalyalieva, et al., *Astrophys. Bulletin* **73**, 335 (2018)].
55. Янни и др. (B. Yanny, C. Rockosi, H.J. Newberg, G.R. Knapp, J.K. Adelman-McCarthy, B. Alcorn, S. Allam, C.A. Prieto, et al.), *Astron. J.* **137**, 4377 (2009).
56. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).