ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 46, № 6, с. 395–404

# ПАРАМЕТРЫ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ ПО ЗВЕЗДАМ ИЗ ОБЛАСТЕЙ АКТИВНОГО ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA DR2

© 2020 г. О. И. Крисанова[1*], В. В. Бобылев[2], А. Т. Байкова[2]

[1]Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступила в редакцию 24.04.2020 г.
После доработки 26.05.2020 г.; принята к публикации 26.05.2020 г.

Изучена выборка из более 25 000 молодых звезд с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2. Относительные ошибки их параллаксов не превышают 10%. Отбор звезд, принадлежащих областям активного звездообразования, был осуществлен Мартоном и др. по данным из каталога Gaia DR2 с привлечением инфракрасных измерений из каталогов WISE и Planck. Большинство звезд выборки составляют маломассивные звезды типа Т Тельца. По ним найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.40 \pm 0.11$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -3.933 \pm 0.033$ км/с/кпк$^2$ и $\Omega_0'' = 0.804 \pm 0.040$ км/с/кпк$^3$. Значения постоянных Оорта составляют $A = 15.73 \pm 0.32$ км/с/кпк и $B = -12.67 \pm 0.34$ км/с/кпк, а круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 227 \pm 4$ км/с для принятого расстояния Солнца до галактического центра $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк.

*Ключевые слова:* молодые звезды, области звездообразования, постоянные Оорта, вращение Галактики.

**DOI:** 10.31857/S0320010820060066

## ВВЕДЕНИЕ

Для изучения свойств диска Галактики важное значение имеют молодые звезды. Среди массивных самыми молодыми являются звезды спектральных классов O и B, среди менее массивных — звезды типа Т Тельца. Такие звезды присутствуют в областях активного звездообразования, в молодых рассеянных звездных скоплениях, OB- и T-ассоциациях (Блаау, 1964; де Зев и др., 1999; Мельник, Дамбис, 2018).

Характер галактического спирального узора определен, например, в работах Жоржелена, Жоржелен (1976), Руссейль (2003) по распределению зон H II, областей активного звездообразования, фотометрические расстояния до которых оценивались по возбуждающим OB-звездам. Молодые звезды также служат для определения таких параметров спиральной волны плотности, как длина волны, угол закрутки и скорости возмущения (Линь и др., 1969; Фернандес и др., 2001; Бобылев, Байкова, 2015).

По данным из различных каталогов неоднократно определялись параметры галактического вращения как по одиночным и кратным OB-звездам (Оорт, 1927; Пласкет, Пирс, 1934; Мор, Маер, 1957; Рубин, Берли, 1964; Фрогель, Стозерс, 1977; Бил, Овенден, 1978; Торра и др., 2000; Бобылев, Байкова, 2015), так и по OB-ассоциациям (Мельник и др., 2001; Дамбис и др., 2001).

Важнейшим источником позиционных и кинематических данных в настоящее время является каталог Gaia DR2 (Браун и др., 2018; Линдегрен и др., 2018). Он содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.3 млрд звезд. Для относительно небольшой доли этих звезд измерены их лучевые скорости. В каталоге Gaia (Прусти и др., 2016) фотометрические измерения представлены в двух широких полосах, поэтому возможна только очень грубая классификация звезд. Для надежной классификации необходимо привлекать более точные спектральные и фотометрические данные из других источников. Тем не менее по данным каталога Gaia DR2 выполнен ряд важных исследований, связанных с кинематикой различных галактических подсистем.

*Электронный адрес: okrisanova@rambler.ru

Отметим компиляцию Сюя и др. (2018), содержащую 5772 OB-звезды с данными из каталога Gaia DR2. Спектральная классификация этих OB-звезд была проведена различными авторами по наземным наблюдениям задолго до полета спутника Gaia. В работе Бобылева, Байковой (2019) параметры вращения Галактики были определены с использованием примерно 2000 OB-звезд из каталога Сюя и др. (2018) с известными параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями.

Большая выборка звезд типа T Тельца, содержащая более 40 000 звезд, сформирована Зари и др. (2018). Эти звезды были отобраны из каталога Gaia DR2 по кинематическим и фотометрическим данным, расположены не далее 500 пк от Солнца, тесно связаны с Поясом Гулда. Их пространственные и кинематические свойства детально изучены в работе Бобылева (2020).

Мартоном и др. (2019) осуществлен отбор более 1 млн кандидатов в молодые звездные объекты. Для этого были скомбинированы данные Gaia DR2 с высокоточной инфракрасной фотометрией эксперимента WISE (Райт и др., 2010). Таким образом, существенно расширен список молодых звезд с высокоточными параллаксами и собственными движениями из каталога Gaia DR2. Целью настоящей работы является уточнение параметров вращения Галактики по выборке этих молодых звезд.

## ДАННЫЕ

В настоящей работе используются результаты отбора молодых галактических звездных объектов из работы Мартона и др. (2019). Данные получены из комбинациии орбитальных наблюдений космических спутников WISE и Gaia, поэтому эта база имеет название Gaia DR2×AllWISE.

Инфракрасный космический телескоп WISE был запущен НАСА на околоземную орбиту в 2009 г. В его задачу входил полный обзор неба в четырех ИК-диапазонах 3.3, 4.7, 12 и 23 мкм. Для удобного пользования наблюдениями телескопа WISE создана интерактивная электронная база данных AllWISE (Кэтри и др., 2013).

Молодые звезды расположены преимущественно в регионах, содержащих большое количество пыли. По ИК-наблюдениям космического телескопа Planck (Адам и др., 2016) создана детальная карта поглощения света в Галактике. Для того чтобы решить, как источник связан с пылевой областью, Мартон и др. (2019) использовали индекс прозрачности пыли ($\tau$) для каждого объекта из этой карты.

В каталоге Gaia DR2 содержатся тригонометрические параллаксы, собственные движения и фотометрические данные около 1.3 млрд звезд. Средние ошибки тригонометрических 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. Для более 7 млн звезд спектральных классов F–G–K определены лучевые скорости со средней ошибкой около 1 км/с. При анализе пространственных скоростей более молодых звезд, например, OB-звезд, используются лучевые скорости, полученные в результате наземных спектроскопических измерений.

Всего каталог Мартона и др. (2019), полученный в результате объединения измерений Gaia DR2, WISE и Planck, содержит более 100 млн объектов различной природы. Для детального же изучения молодого населения Млечного Пути ими составлен список из более 1.1 млн кандидатов в молодые звездные объекты. Как отмечают эти авторы, спутник Gaia зафиксировал ряд сильно переменных источников. Во многих случаях физическая природа таких источников неизвестна, но около 30% из них, скорее всего, связаны со вспышечной активностью молодых звезд.

Собственно каталог Мартона и др. (2019) содержит фотометрическую информацию AllWISE и 2MASS, идентификатор ID Gaia DR2 и вероятности звезды принадлежать к каждому из четырех рассматриваемых классов. Этими авторами в рассмотрение были введены 4 основных класса: молодые звездные объекты (Young Stellar Objects, далее YSO), внегалактические объекты, звезды главной последовательности и проэволюционировавшие звезды.

Параллаксы, собственные движения и лучевые скорости звезд мы уже самостоятельно брали из каталога Gaia DR2. Для этого использовался сервис ARI's Gaia TAP Service (http://gaia.ari.uni-heidelberg.de/tap.html).

Наша рабочая выборка была сформирована путем извлечения из каталога Мартона и др. (2019) всех звезд, имеющих вероятность принадлежности к YSO более 80%. Таких звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% оказалось 31 937, а менее 10% — 25 508.

В настоящей работе мы исследуем звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%. На рис. 1 даны распределения 25 508 звезд на небесной сфере и на плоскости $lz$. С одной стороны, часть звезд имеет довольно большие значения галактических широт, что видно на левой панели рисунка. Это важно для уверенного определения таких параметров, как, например, скорости $W_\odot$. С другой стороны, видно (рис. 1б), что все звезды очень тесно сконцентрированы к галактической плоскости, их высоты $z$ обычно не превышают 200 пк.

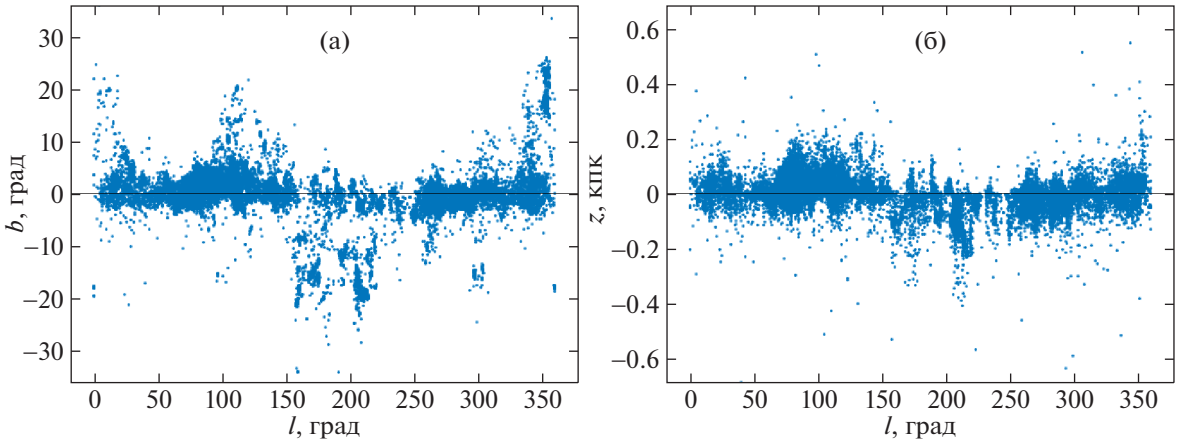


**Рис. 1.** Распределение звезд на плоскости $l-b$ (а) и на плоскости $l-z$ (б).

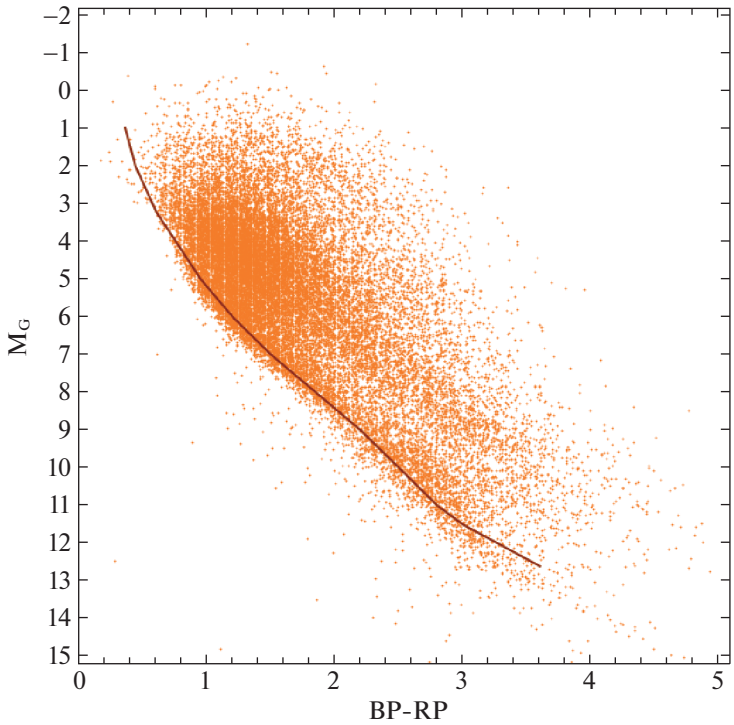


**Рис. 2.** Диаграмма показатель цвета–абсолютная звездная величина, построенная по звездам с относительными ошибками параллаксов менее 10%. Сплошной линией отмечена главная последовательность.

На рис. 2 дана диаграмма Герцшпрунга–Рассела, построенная по 25 508 звездам с использованием фотометрических данных из каталога Gaia DR2 без учета межзвездного поглощения и покраснения. На рис. 2 хорошо видно, что основная масса звезд выборки занимает общирную область выше главной последовательности, характерную для молодых звезд типа T Тельца. Похожую картину можно видеть на рис. 5 работы Зари и др. (2018), в которой был осуществлен отбор звезд типа T Тельца из каталога Gaia DR2 на основе их кинематических характеристик.

## МЕТОДЫ

### *Параметры вращения Галактики*

Из наблюдений нам известны три составляющие скорости звезды: лучевая скорость $V_r$ и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74 r \mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74 r \mu_b$, направленные вдоль галактической долготы $l$ и широты $b$ соответственно, выраженные в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а $r = 1/\pi$ —

гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое мы вычисляем через параллакс звезды $\pi$. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и $\mu_b$ выражены в мсд/год.

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

$$V_r = -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - \\ - W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega_0' + \\ + 0.5 R_0 (R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega_0'', \quad (1)$$

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

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

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

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (4)$$

Величина $\Omega_0$ является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии $R_0$, параметры $\Omega_0'$ и $\Omega_0''$ — соответствующие производные угловой скорости, $V_0 = |R_0 \Omega_0|$. В уравнениях (1)–(3) определяемыми являются шесть неизвестных: $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, $\Omega_0$, $\Omega_0'$ и $\Omega_0''$. Интерес представляют также постоянные Оорта $A$ и $B$, значения которых можно найти из следующих выражений:

$$A = 0.5\Omega_0' R_0, \quad B = -\Omega_0 + A. \quad (5)$$

Кинематические параметры определяются в результате решения условных уравнений вида (1)–(3) методом наименьших квадратов. Используются веса вида $w_r = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2}$, $w_l = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}$ и $w_b = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_b}^2}$, где $S_0$ — “космическая” дисперсия, $\sigma_{V_r}$ и $\sigma_V$ — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение $S_0$ сопоставимо со среднеквадратической невязкой $\sigma_0$ (ошибка единицы веса), которая вычисляется при решении условных уравнений вида (1)–(3). В настоящей работе принимаемые значения $S_0$ лежат в интервале 15–20 км/с. Система уравнений вида (1)–(3) решается в несколько итераций с применением критерия $3\sigma$ для исключения звезд с большими невязками.

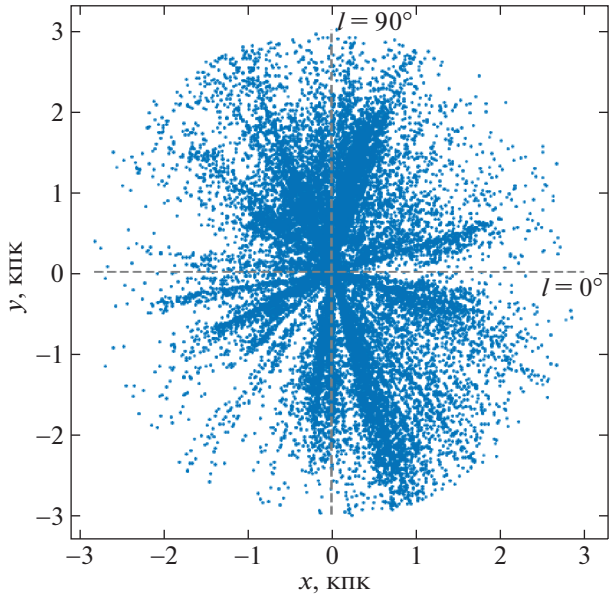


**Рис. 3.** Распределение звезд с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10% на галактической плоскости $x$–$y$. Солнце лежит в начале системы координат, центр Галактики находится справа.

### *Выбор значения $R_0$*

В настоящее время выполнен ряд работ, посвященных определению среднего значения расстояния от Солнца до центра Галактики с использованием индивидуальных определений этой величины, полученных в последнее десятилетие независимыми методами. Например, $R_0 = 8.0 \pm 0.2$ кпк (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).

Отметим также некоторые первоклассные индивидуальные определения этой величины, сделанные в последнее время. В работе Абутера и др. (2019) из анализа 16-летнего ряда наблюдений движения звезды S2 вокруг сверхмассивной черной дыры в центре Галактики найдено $R_0 = 8.178 \pm 0.022$ кпк. В работе Ду и др. (2019) на основе независимого анализа орбиты звезды S2 найдено $R_0 = 7.946 \pm 0.032$ кпк. По мазерам японской программы VERA Хирота и др. (2020) получили оценку $R_0 = 7.9 \pm 0.3$ кпк. На основе перечисленных результатов в настоящей работе мы принимаем значение $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 дано распределение звезд нашей рабочей выборки на галактической плоскости $x$–$y$. В дополнение к ограничению на ошибку параллакса (10%) мы также используем ограничение на расстояние $r < 3$ кпк. Как следует из этого рисунка,

связь со спиральной структурой не просматривается.

В результате МНК-решения системы из двух уравнений (2)–(3) по собственным движениям 25 508 звезд из окрестности Солнца радиусом 3 кпк с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10% найдены составляющие вектора групповой скорости $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (10.69, 14.49, 7.67) \pm (0.14, 0.24, 0.11)$ км/с и следующие компоненты угловой скорости галактического вращения:

$$\Omega_0 = 28.63 \pm 0.12 \text{ км/с/кпк}, \quad (6)$$
$$\Omega_0' = -4.019 \pm 0.036 \text{ км/с/кпк}^2,$$
$$\Omega_0'' = 0.796 \pm 0.044 \text{ км/с/кпк}^3.$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 17.0$ км/с, значения постоянных Оорта $A = 16.08 \pm 0.33$ км/с/кпк и $B = -12.55 \pm 0.35$ км/с/кпк, а линейная скорость вращения окрестности Солнца вокруг центра Галактики $V_0 = 229 \pm 4$ км/с.

С момента публикации каталога Gaia DR2 известна проблема с тригонометрическими параллаксами Gaia DR2, а именно, необходимость поправки $\Delta\pi$ с величиной от $-0.03$ до $-0.05$ мсд (Линдегрен и др., 2018; Арену и др., 2018). Принимая во внимание результаты определения значения этой поправки, полученные в работах Ялялиевой и др. (2018), Рисса и др. (2018) и Зинна и др. (2018), мы должны прибавить ко всем оригинальным параллаксам звезд из каталога Gaia DR2 поправку 0.050 мсд, т.е. $\pi_{\text{new}} = \pi + 0.05$ мсд. Решение (6) получено по исходным значениям параллаксов, но все последующие решения мы уже получаем с исправленными параллаксами.

Так, в результате МНК-решения системы из двух уравнений (2)–(3) при тех же ограничениях, что и при поиске решения (6), но с учетом поправки к параллаксам звезд, найдены составляющие вектора групповой скорости $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (9.99, 14.04, 7.25) \pm (0.13, 0.22, 0.10)$ км/с и следующие компоненты угловой скорости галактического вращения:

$$\Omega_0 = 28.40 \pm 0.11 \text{ км/с/кпк}, \quad (7)$$
$$\Omega_0' = -3.933 \pm 0.033 \text{ км/с/кпк}^2,$$
$$\Omega_0'' = 0.804 \pm 0.040 \text{ км/с/кпк}^3.$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 16.0$ км/с, значения постоянных Оорта $A = 15.73 \pm 0.32$ км/с/кпк и $B = -12.67 \pm 0.34$ км/с/кпк, а линейная скорость вращения окрестности Солнца вокруг центра Галактики $V_0 = 227 \pm 4$ км/с.

**Таблица 1.** Параметры вращения Галактики, найденные по 466 звездам с измеренными лучевыми скоростями и относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%

| Параметры | $V_l + V_b + V_r$ | $V_l + V_b$ | $V_r$ |
|---|---|---|---|
| $U_\odot$, км/с | $9.8 \pm 0.9$ | $10.8 \pm 1.2$ | $8.8 \pm 1.8$ |
| $V_\odot$, км/с | $15.3 \pm 1.0$ | $13.7 \pm 1.7$ | $18.0 \pm 1.5$ |
| $W_\odot$, км/с | $8.1 \pm 0.8$ | $8.7 \pm 0.9$ | – |
| $\Omega_0$, км/с/кпк | $28.1 \pm 0.9$ | $29.5 \pm 1.2$ | – |
| $\Omega_0'$, км/с/кпк$^2$ | $-3.74 \pm 0.20$ | $-3.98 \pm 0.31$ | $-3.83 \pm 0.36$ |
| $\Omega_0''$, км/с/кпк$^3$ | $0.49 \pm 0.25$ | $0.48 \pm 0.32$ | $0.87 \pm 0.57$ |
| $\sigma_0$, км/с | 17.2 | 18.6 | 20.5 |

В табл. 1 даны результаты кинематического анализа выборки из 466 звезд, для которых имеются как собственные движения, так и лучевые скорости. Причем взяты только те звезды, ошибки измерения лучевых скоростей которых не превышают 10 км/с, с относительными ошибками параллаксов менее 10%, с расстояниями до них менее 3 кпк. В табл. 1 даны параметры вращения Галактики, полученные тремя способами. Во втором столбце таблицы даны результаты МНК-решения, при поиске которого решались все три условные уравнения вида (1)–(3), это решение обозначено как "$V_l + V_b + V_r$". В третьем столбце решались два условных уравнения вида (2) и (3), это решение обозначено "$V_l + V_b$". В последнем столбце решалось одно условное уравнение вида (3), и это решение обозначено "$V_r$". Только из анализа лучевых скоростей, как это можно видеть из уравнения (1), нельзя определить значение угловой скорости вращения Галактики. Кроме того, при таком подходе очень плохо определяется значение скорости $W_\odot$, поэтому здесь ее мы приняли равной 7 км/с.

Сравнение найденных различными способами значений $\Omega_0'$ позволяет оценить поправочный коэффициент шкалы расстояний $p$ (Заболотских и др., 2002; Расторгуев и др., 2017; Бобылев, Байкова, 2017а), в нашем случае $p = (\Omega_0')_{V_r}/(\Omega_0')_{V_l}$. Этот метод основан на том, что ошибки значения $(\Omega_0')_{V_l}$ очень слабо зависят от расстояний до используемых звезд.

Значение $p$ можем оценить двумя способами: 1) по решениям "$V_l + V_b$" и "$V_r$" из табл. 1 находим $p = (-3.83)/(-3.98) = 0.96 \pm 0.12$; 2) из сочетания решения "$V_r$" из табл. 1 с данными решения (7), где мала ошибка определения $\Omega_{0V_l}'$, получаем $p = (-3.83)/(-3.933) = 0.97 \pm 0.09$. Здесь

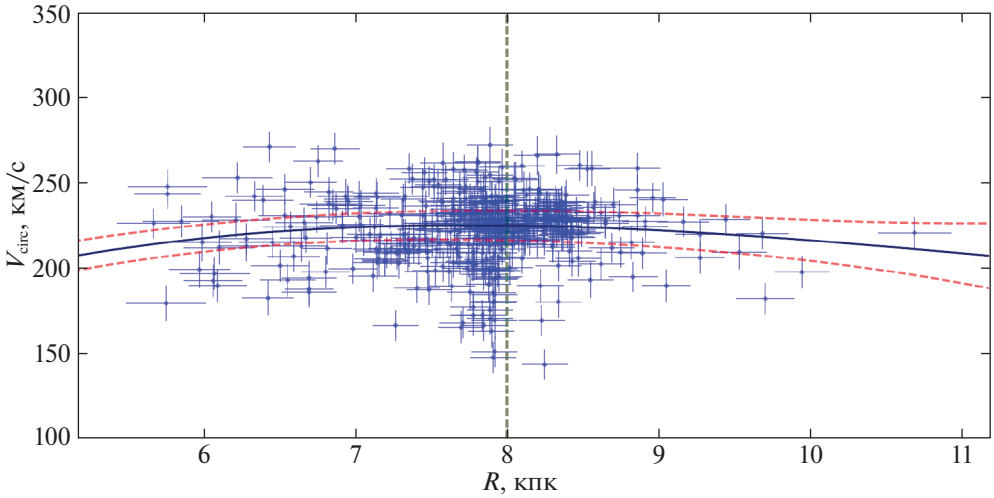


**Рис. 4.** Кривая вращения Галактики, построенная по 466 звездам с лучевыми скоростями. Вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца, указаны границы доверительной области, соответствующей уровню ошибок $1\sigma$.

ошибка определения коэффициента $p$ вычислена на основе соотношения $\sigma_p^2 = (\sigma_{\Omega'_{0V_r}}/\Omega'_{0V_l})^2 + (\Omega'_{0V_r} \cdot \sigma_{\Omega'_{0V_l}}/\Omega'^2_{0V_l})^2$. Таким методом в работе Бобылева, Байковой (2018) из анализа более 50 000 звезд из каталога TGAS (Браун и др., 2016) была получена оценка $p = 0.97 \pm 0.04$. По рассеянным звездным скоплениям с данными из каталога Gaia DR2 найдено $p = 1.00 \pm 0.04$. (Бобылев, Байкова, 2019б). Можем сделать вывод о близости к единице коэффициента шкалы расстояний, поэтому используемые расстояния не нуждаются в поправочном множителе.

На рис. 4 даны круговые скорости $V_{\rm circ}$ в зависимости от расстояния $R$ для 466 звезд с лучевыми скоростями. Кривая вращения Галактики построена с параметрами, указанными во втором столбце табл. 1. Границы доверительной области найдены с применением метода Монте-Карло.

## ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 и 3 даны значения параметров вращения Галактики, полученные по различным данным путем анализа угловой скорости вращения, т.е. использован подход, аналогичный нашему. Некоторые авторы предпочитают определять локальные параметры галактического вращения — постоянные Оорта $A$ и $B$. Такие значения даны в табл. 4, по ним мы вычислили соответствующие значения угловой и линейной скорости вращения окрестности Солнца $\Omega_0 = A - B$ и $V_0 = R_0\Omega_0$ ($R_0 = 8.0 \pm \pm 0.15$ кпк).

В табл. 2 и 3 даны результаты, полученные из анализа цефеид, молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС), OB-звезд и мазерных источников. Мазеры представляют особый интерес. Их тригонометрические параллаксы и собственные движения измерены РСДБ-методом с высокой, наилучшей на сегодняшний день, точностью. В работах Хироты и др. (2020), Рида и др. (2019) и Расторгуева и др. (2017) использованы данные о таких мазерных источниках, которые связаны либо с очень массивными протозвездами типа O или B, либо с молодыми маломассивными звездами типа T Тельца. Источники с уже измеренными параллаксами распределены вплоть до центра Галактики. В работах Хироты и др. (2020) и Рида и др. (2019) анализируется линейная скорость вращения Галактики, поэтому значения производных угловой скорости $\Omega'_0$ и $\Omega''_0$ не приводятся.

В работе Бобылева, Байковой (2014) показано, что на компоненты групповой скорости $U_\odot$ и $V_\odot$, которые определяются по молодым объектам (мазеры, OB-звезды, молодые цефеиды), заметное влияние оказывают возмущения, вызванные галактической спиральной волной плотности. В настоящее время считается, что наиболее надежное значение пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (11.1, 12.2, 7.3)$ км/с найдено в работе Шонриха и др. (2010).

Значения компонент групповой скорости $U_\odot$ и $W_\odot$, найденные в решениях (6) и (7), а также указанные в табл. 1, находятся в хорошем согласии со значениями этих параметров, найденными по другим звездам (табл. 2). Найденные же нами значения скорости $V_\odot \sim 15$ км/с (решения (6), (7), табл. 1) являются характерными для очень молодых объектов.

Найденные в настоящей работе значения угловой скорости вращения Галактики $\Omega_0$ и двух ее

**Таблица 2.** Вектор групповой скорости и постоянные Оорта

| $U_\odot$, км/с | $V_\odot$, км/с | $W_\odot$, км/с | $A$, км/с/кпк | $B$, км/с/кпк | Ref | Выборка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $7.5 \pm 1.9$ | $11.2 \pm 1.3$ | – | $17.8 \pm 1.5$ | $-12.5 \pm 1.7$ | (1) | OB-звезды |
| $6.5 \pm 1.8$ | $12.1 \pm 1.7$ | $7.2 \pm 1.2$ | $17.0 \pm 1.5$ | $-10.5 \pm 2.0$ | (2) | Цефеиды+РЗС |
| $7.9 \pm 0.7$ | $11.7 \pm 0.8$ | $7.4 \pm 0.6$ | $16.20 \pm 0.38$ | $-12.64 \pm 0.51$ | (3) | Цефеиды |
| $11.1 \pm 1.3$ | $18.3 \pm 1.2$ | $8.8 \pm 1.1$ | $16.63 \pm 0.38$ | $-13.30 \pm 0.65$ | (4) | 130 мазеров |
| $8.53 \pm 0.38$ | $11.22 \pm 0.46$ | $7.83 \pm 0.32$ | $16.40 \pm 0.23$ | $-12.31 \pm 0.32$ | (5) | РЗС |
| $6.53 \pm 0.24$ | $7.27 \pm 0.31$ | – | $16.14 \pm 0.13$ | $-13.56 \pm 0.17$ | (6) | OB-звезды |

**Примечание.** (1) — Мельник и др. (2001); (2) — Заболотских и др. (2002); (3) — Бобылев (2017); (4) — Расторгуев и др. (2017); (5) — Бобылев, Байкова (2019б); (6) — Бобылев, Байкова (2019а).

**Таблица 3.** Значения параметров вращения Галактики

| $\Omega_0$, км/с/кпк | $\Omega_0'$, км/с/кпк$^2$ | $\Omega_0''$, км/с/кпк$^3$ | $R_0$, кпк | $V_0$, км/с | Ref | Выборка |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $30.2 \pm 0.8$ | $-5.0 \pm 0.2$ | $1.5 \pm 0.2$ | $7.1 \pm 0.5$ | $214 \pm 16$ | (1) | OB-звезды |
| $27.47 \pm 1.39$ | $-4.54 \pm 0.24$ | $1.09 \pm 0.19$ | $7.5 \pm 0.5$ | $206 \pm 14$ | (2) | Цефеиды+РЗС |
| $28.84 \pm 0.33$ | $-4.05 \pm 0.10$ | $0.805 \pm 0.067$ | $8.0 \pm 0.2$ | $231 \pm 6$ | (3) | Цеф-ды, GaiaDR1 |
| $28.93 \pm 0.53$ | $-3.96 \pm 0.07$ | $0.87 \pm 0.03$ | $8.4 \pm 0.12$ | $243 \pm 6$ | (4) | 130 мазеров |
| $28.71 \pm 0.22$ | $-4.10 \pm 0.06$ | $0.736 \pm 0.033$ | $8.0 \pm 0.15$ | $230 \pm 5$ | (5) | РЗС, Gaia DR2 |
| $29.70 \pm 0.11$ | $-4.03 \pm 0.03$ | $0.620 \pm 0.014$ | $8.0 \pm 0.15$ | $238 \pm 5$ | (6) | OB-зв., GaiaDR2 |
| $28.96 \pm 0.27$ | – | – | $8.15 \pm 0.15$ | $236 \pm 5$ | (7) | 147 мазеров |
| $28.63 \pm 0.26$ | – | – | $7.92 \pm 0.16$ | $226 \pm 5$ | (8) | 188 мазеров |

**Примечание.** (1) — Мельник и др. (2001); (2) — Заболотских и др. (2002); (3) — Бобылев (2017); (4) — Расторгуев и др. (2017); (5) — Бобылев, Байкова (2019б); (6) — Бобылев, Байкова (2019а); (7) — Рид и др. (2019); (8) — Хирота и др. (2020).

производных также говорят о том, что анализируемые звезды принадлежат к наиболее молодой фракции тонкого диска. Отличие показывает значение ошибки единицы веса $\sigma_0$, которое в нашем случае составляет около 16 км/с. Например, для OB-звезд эта величина составляет 8–10 км/с, а для цефеид около 14 км/с. Эти оценки являются локальными, т.е. относятся к малой околосолнечной окрестности. В нашем случае радиус окрестности $r = 3$ кпк достаточно велик, поэтому случайные ошибки параллаксов и собственных движений звезд вносят заметный вклад в оценку $\sigma_0$. Отметим, что значение ошибки единицы веса уменьшается до 12–13 км/с при использовании ограничений на расстояния до звезд наших выборок, например, до расстояний менее 0.5 кпк. Это снимает противоречие, связанное с большим значением ошибки единицы веса, найденным нами по далеким звездам.

Найденное нами значение линейной скорости вращения окрестности Солнца вокруг центра Галактики $V_0 = 227 \pm 4$ км/с определено с высокой точностью и находится в согласии со значениями, характерными для молодых галактических объектов, как это можно видеть из табл. 3 и 4.

Отметим работу Зари и др. (2018), в которой был осуществлен отбор по кинематическим характеристикам более 40 000 звезд типа T Тельца из каталога Gaia DR2. Эти звезды расположены не далее 500 пк от Солнца. В работе Бобылева (2020) выполнен кинематический анализ звезд типа

**Таблица 4.** Значения постоянных Оорта $A$ и $B$

| $A$, км/с/кпк | $B$, км/с/кпк | $\Omega_0 = A - B$, км/с/кпк | $V_0$, км/с | Ref | Выборка |
|---|---|---|---|---|---|
| $16.8 \pm 0.6$ | – | – | – | (1) | Лучевые скорости OB-звезд |
| $14.4 \pm 1.2$ | $-12.0 \pm 2.8$ | $26.4 \pm 3.0$ | $211 \pm 24$ | (2) | Разные звезды |
| $12.9 \pm 0.7$ | $-16.9 \pm 1.1$ | $29.8 \pm 1.3$ | $238 \pm 11$ | (3) | OB-звезды |
| $14.8 \pm 0.8$ | $-12.4 \pm 0.8$ | $27.2 \pm 1.1$ | $218 \pm 9$ | (4) | Цефеиды, HIPPARCOS |
| $13.0 \pm 0.7$ | $-12.1 \pm 0.7$ | $25.1 \pm 1.0$ | $201 \pm 9$ | (5) | Далекие OB-звезды, HIPPARCOS |
| $15.9 \pm 2$ | $-16.9 \pm 2$ | $32.8 \pm 2.8$ | $262 \pm 23$ | (6) | Красные гиганты, ACT/Tycho-2 |
| $15.3 \pm 0.4$ | $-11.9 \pm 0.4$ | $27.2 \pm 0.6$ | $218 \pm 6$ | (7) | Гл. последовательность, Gaia DR1 |
| $15.1 \pm 0.1$ | $-13.4 \pm 0.1$ | $28.5 \pm 0.1$ | $228 \pm 4$ | (8) | Гл. последовательность, Gaia DR2 |

**Примечание.** (1) — Балона, Фист (1973); (2) — Керр, Линден-Белл (1986); (3) — Комерон и др. (1994); (4) — Фист, Вайтлок (1997); (5) — Торра и др. (2000); (6) — Оллинг, Денен (2003); (7) — Бови (2017); (8) — Ли и др. (2019).

Т Тельца из списка Зари и др. (2018). Значение ошибки единицы веса $\sigma_0$ для различных выборок заключено в интервале 10–12 км/с, а значения постоянных Оорта $A$ и $B$ близки к присущим поясу Гулда, т.е. значительно отличаются от характеристик галактического вращения. В этом отношении результаты кинематического анализа большой выборки звезд типа Т Тельца (настоящая работа), находящихся на больших гелиоцентрических расстояниях, представляет большой интерес. Важно то, что параметры вращения Галактики, полученные по далеким маломассивным молодым звездам, не имеют значительных отличий от полученных по далеким звездам большой массы (OB-звезды, мазерные источники).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе для определения параметров галактического вращения использована большая выборка молодых звезд, расположенных в областях активного звездообразования. Отбор этих звезд был осуществлен в работе Мартона и др. (2019) по данным из каталога Gaia DR2 с привлечением высокоточных фотометрических ИК-измерений из каталогов WISE и Planck. Нами использованы звезды, имеющие вероятность принадлежности к YSO более 80%.

Показано, что значение коэффициента шкалы расстояний близко к единице, поэтому используемые расстояния, вычисленные через параллаксы каталога Gaia DR2, не нуждаются в каком-либо поправочном множителе. Такой вывод находится в хорошем согласии с анализом параллаксов звезд из каталога Gaia DR2, сделанным различными авторами по различным звездам этого каталога. Кроме того, мы установили, что найденные значения параметров галактического вращения практически не зависят от линейной поправки к параллаксам каталога Gaia DR2 величиной $\Delta\pi = -0.050$ мсд.

Рассмотрены 25 508 звезд из окрестности Солнца радиусом 3 кпк с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%. Большую часть здесь составляют звезды типа Т Тельца. Кинематический анализ с использованием этих звезд проведен впервые. По этой выборке определены значения параметров галактического вращения. В частности, получена новая оценка линейной скорости вращения окрестности Солнца вокруг центра Галактики, которая составляет $V_0 = 227 \pm 4$ км/с. Такая величина является характерной для самых молодых объектов тонкого диска Галактики.

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

Работа выполнена при частичной поддержке Программы Президиума РАН КП19-270 “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абутер и др. (Gravity Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, N. Bauböck, J.P. Berger, H. Bonnet, W. Brandner, Y. Clénet, V. Coudé du Foresto, et al.), Astron. Astrophys. **625**, L10 (2019).

2. Адам и др. (Planck Collaboration, R. Adam, P.A.R. Ade, N. Aghanim, M.I.R. Alves, M. Arnaud, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, et al.), Astron. Astrophys. **594**, 10 (2016).
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. Балона, Фист (L.A. Balona and M.W. Feast), MNRAS **167**, 621 (1973).
5. Бил, Овенден (J. Byl and M.W. Ovenden), Astrophys. J. **225**, 496 (1978).
6. Блаау (A. Blaauw), Annual Review of Astron. Astrophys. **2**, 213 (1964).
7. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **441**, 142 (2014).
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **41**, 516 (2015) [V.V. Bobylev, et al., **41**, 473 (2015)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 210 (2018) [V.V. Bobylev, et al., **44**, 184 (2018)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 249 (2019б) [V.V. Bobylev, et al., **45**, 208 (2019)].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 379 (2019а) [V.V. Bobylev, et al., **45**, 331 (2019)].
12. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **46**, 133 (2020) [V. V. Bobylev, **46**, 131 (2020)].
13. Бови (J. Bovy), MNRAS **468**, L63 (2017).
14. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, F. Mignard, R. Drimmel, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, et al.), Astron. Astrophys. **595**, 2 (2016).
15. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
16. Валле (J.P. Vallée), Astrophys. Space Science **362**, 79 (2017).
17. Де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), Astrophys. J. Suppl. Ser. **232**, 22 (2017).
18. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 68 (2001) [A.K. Dambis, et al., Astron. Lett. **27**, 58 (2001)].
19. Ду и др. (T. Do, A. Hees, A. Ghez, G.D. Martinez, D.S. Chu, S. Jia, S. Sakai, J.R. Lu, et al.), Science **365**, 664 (2019).
20. Жоржелен, Жоржелен (Y.M. Georgelin and Y.P. Georgelin), Astron. Astrophys. **49**, 57 (1976).
21. Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К., Письма в Астрон. журн. **28**, 516 (2002) [M.V. Zabolotskikh, et al., Astron. Lett. **28**, 454 (2002)].
22. Зари и др. (E. Zari, H. Hashemi, A.G.A. Brown, K. Jardine, and P.T. de Zeeuw), Astron. and Astrophys. **620**, 172 (2018).
23. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), arXiv: 1805.02650 (2018).
24. Де Зев и др. (P.T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, and A. Blaauw), Astron. J. **117**, 354 (1999).
25. Мартон и др. (G. Marton, P. Ábrahám, E. Szegedi-Elek, J. Varga, M. Kun, Á. Kóspál, E. Varga-Verebélyi, S. Hodgkin, et al.), MNRAS **487**, 2522 (2019).
26. Камарильо и др. (T. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat), PASP, **130**, 4101 (2018).
27. Керр, Линден-Белл (F.J. Kerr and D. Lynden-Bell), MNRAS **221**, 1023 (1986).
28. Комерон и др. (F. Comeron, J. Torra, and A.E. Gomez), Astron. Astrophys. **286**, 789 (1994).
29. Кэтри и др. (R.M. Cutri, E.L. Wright, T. Conrow, J. Bauer, D. Benford, H. Brandenburg, J. Dailey, et al.), VizieR On-line Data Catalog: II/311 (2013). http://wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allsky/expsup/index.html
30. Ли и др. (C. Li, G. Zhao, and C. Yang), Astrophys. J. **872**, 205 (2019).
31. Линдегрен 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).
32. Линь и др. (C.C. Lin, C. Yuan, and F.H. Shu), Astrophys. J. **155**, 721 (1969).
33. Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 611 (2001) [A.M. Mel'nik, et al., Astron. Lett. **27**, 521 (2001)]
34. Мельник А.М., Дамбис А.К., Астрон. журн. **62**, 895 (2018) [A.M. Mel'nik, et al., Astron. Rep. **62**, 998 (2018)]
35. Мор, Маер (J.M. Mohr and P. Mayer), Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia **8**, 142 (1957).
36. Оллинг, Денен (R.P. Olling and W. Dehnen), Astrophys. J. **599**, 275 (2003).
37. Оорт (J.H. Oort), Bull. Astron. Inst. Netherlands, **3**, 2750 (1927).
38. Пласкет, Пирс (J.S. Plaskett and J.A. Pearce), MNRAS **69**, 80 (1934).
39. 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**, A1 (2016).
40. Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюллетень **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., Astrophys. Bull. **72**, 122 (2017)].
41. Райт и др. (E.L. Wright, P.R.M. Eisenhardt, A.K. Mainzer, et al.), Astroph. J. **140**, 1868 (2010).
42. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, et al.), Astrophys. J. **885**, 131 (2019).
43. Рисс и др. (A.G. Riess, S. Casertano, W. Yuan, L. Macri, B. Bucciarelli, M.G. Lattanzi, J.W. MacKenty, J.B. Bowers, et al.), Astrophys. J. **861**, 126 (2018).
44. Рубин, Берли (C.V. Rubin and J. Burley), Astron. J. **69**, 80 (1964).

45. Руссейль (D. Russeil), Astron. Astrophys. **397**, 133 (2003).
46. Сюй и др. (Y. Xu, S.B. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, B. Zhang, Q. Z. Yan, T.M. Dame, K.M. Menten, et al.), Astron. Astrophys. **616**, L15 (2018).
47. Торра и др. (J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras), Astron. Astrophys. **359**, 82 (2000).
48. Фернандес и др. (D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra), Astron. Astrophys. **372**, 833 (2001).
49. Фист, Вайтлок (M. Feast and P. Whitelock), MNRAS **291**, 683 (1997).
50. Фрогель, Стозерс (J.A. Frogel, and R. Stothers), Astron. J. **82**, 890 (1977).
51. Хирота и др. (T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, Y. Adachi, R.A. Burns, J.O. Chibueze, Y.K. Choi, K. Hachisuka, et al.), arXiv: 2002.03089 (2020).
52. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), MNRAS **403**, 1829 (2010).
53. 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. Bull. **73**, 335 (2018)].