

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИКИ ПО ОБ-ЗВЕЗДАМ 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 14.02.2019 г.; после доработки 01.04.2019 г.; принята к публикации 01.04.2019 г.

Изучена выборка, содержащая около 6000 ОБ-звезд, с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2. Найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.70 \pm 0.11$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.035 \pm 0.031$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.620 \pm 0.014$ км/с/кпк³. Круговая скорость вращения окосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 238 \pm 5$ км/с для принятого расстояния Солнца до галактического центра $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк. Амплитуды тангенциальных и радиальных скоростей возмущений, вызванных спиральной волной плотности, составили $f_\theta = 4.4 \pm 1.4$ км/с и $f_R = 5.1 \pm 1.2$ км/с соответственно, длина волны возмущений $\lambda_\theta = 1.9 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_R = 2.1 \pm 0.5$ кпк для принятой модели четырехрукавной структуры. Фаза Солнца в спиральной волне составляет $\chi_\odot = -178^\circ \pm 12^\circ$.

Ключевые слова: ОБ-звезды, вращение Галактики, спиральная волна плотности.

DOI: 10.1134/S0320010819060019

ВВЕДЕНИЕ

Важным инструментом для изучения Галактики и ее подсистем являются звезды спектральных классов O и B. Благодаря своей молодости они хорошо трассируют спиральные рукава, так как в большинстве своем не далеко удалились (кроме небольшого процента высокоскоростных “убегающих” звезд) от места своего рождения. ОБ-звезды имеют галактические орбиты, близкие к круговым, поэтому служат прекрасным материалом для изучения галактического вращения. Они видны с больших расстояний, поэтому хорошо подходят для изучения структуры галактического диска, спиральной структуры, центрального бара, молодых рассеянных звездных скоплений, ОБ-ассоциаций и различных областей звездообразования. Такие исследования были выполнены, например, в работах Жоржелен, Жоржелен (1976), Била, Овендена (1978), Маиса-Апельяниса (2001), Заболотских и др. (2002) или Руссейль (2003).

В настоящее время ценным источником данных для изучения структуры и кинематики Галактики являются результаты космического эксперимента Gaia (Браун и др., 2016). В 2018 г. опубликован второй релиз данных этого каталога, Gaia DR2 (Браун и др., 2018; Линдегрэн и др., 2018). Он содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.3 млрд звезд. Средние ошибки тригонометрических параллаксов яр-

ких 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. Известно, что ошибки определения лучевых скоростей ОБ-звезд являются существенно большими из-за особенностей спектров этих звезд.

Использование высокоточных данных Gaia DR2 уже позволило получить ряд значимых кинематических результатов. Например, в работе Хельми и др. (2018) по данным Gaia DR2 были определены новые значения собственных движений 75 галактических шаровых скоплений, ряда карликовых галактик-спутников Млечного пути, в том числе Магеллановых облаков. Из анализа их пространственных скоростей получена новая оценка массы Галактики, составившая $9.8_{-2.7}^{+6.7} \times 10^{11} M_\odot$. В работе Антохи и др. (2018) на основе кинематического анализа пространственных скоростей из каталога Gaia DR2 обнаружены проявления продолжающегося до сих пор дрожжания диска Млечного пути после пролета через него карликовой галактики Стрелец.

По данным каталога Gaia DR2 Кантат-Гудин и др. (2018) определили новые средние значения собственных движений 1229 рассеянных звездных скоплений (РЗС). А в работе Субиран и др. (2018), исключительно по данным Gaia DR2, для значительной части этого списка РЗС выведены средние значения их лучевых скоростей. Кинематика этих

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

РЗС изучена в работе Бобылева, Байковой (2019). С небывалой ранее детализацией изучены пространственные и внутренние кинематические свойства целого ряда близких к Солнцу молодых звездных ассоциаций (Зари и др., 2018; Франциосини и др., 2018; Роккатаглиата и др., 2018; Кункель и др., 2018).

Выборка, содержащая около 500 ОВ-звезд с параллаксами и собственными движениями из каталога Gaia DR2, была изучена Бобылевым, Байковой (2018б). Целью настоящей работы является уточнение параметров вращения Галактики и параметров галактической спиральной волны плотности по огромной выборке ОВ-звезд, для которых имеются тригонометрические параллаксы и собственные движения в каталоге Gaia DR2. Такую выборку ОВ-звезд, содержащую данные о 5772 звездах, недавно опубликовали Сюй и др. (2018).

МЕТОДЫ

Параметры вращения Галактики

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

$$V_r = -U_\odot \cos b \cos l - V_\odot \cos b \sin l - W_\odot \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \quad (1)$$

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

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

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (3)$$

Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные

угловой скорости, $V_0 = |R_0\Omega_0|$. В уравнениях (1)–(2) определяемыми являются пять неизвестных U_\odot , V_\odot , Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 . Причем в уравнении (1) неизвестных параметров только четыре, так как отсутствует угловая скорость вращения Ω_0 .

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, 2017а), $R_0 = 8.4 \pm 0.4$ 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.

Кинематические параметры определяются в результате решения условных уравнений вида (1)–(2) методом наименьших квадратов. Используются веса вида $w_r = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_r}^2}$ и $w_l = S_0/\sqrt{S_0^2 + \sigma_{V_l}^2}$, где S_0 — “космическая” дисперсия, σ_{V_r} и σ_{V_l} — 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). В настоящей работе принято характерное для молодых звезд значение $S_0 = 12$ км/с. Система уравнений вида (1)–(2) решается в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения звезд с большими невязками.

При анализе звезд, равномерно распределенных по небесной сфере, используют еще и третье уравнение, где в левых частях находятся компоненты V_b . При анализе ОВ-звезд, расположенных практически в галактической плоскости, где $\sin b \approx 0$, применение уравнения с V_b малоэффективно. Однако даже при совместном решении системы условных уравнений вида (1)–(2) плохо определяется скорость W_\odot , поэтому в настоящей работе мы ее считаем известной $W_\odot = 7$ км/с.

Влияние спиральной волны плотности

Для изучения влияния галактической спиральной волны плотности в первую очередь необходимо для каждой звезды вычислить три 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. Эти скорости вычисляются через компоненты V_r , V_l , V_b :

$$U = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \quad (4)$$

$$V = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$

$$W = V_r \sin b + V_b \cos b.$$

Таким образом, они могут быть определены только для тех звезд, для которых измерены как лучевые скорости, так и их собственные движения.

Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра и ортогональную ей скорость V_{circ} , направленную в направлении вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{\text{circ}} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, x, y, z — прямоугольные гелиоцентрические координаты звезды (вдоль соответствующих осей x, y, z направлены скорости U, V, W), V_0 — линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 . Скорости V_R и W практически не зависят от характера кривой вращения Галактики. Для анализа периодичностей в тангенциальных скоростях необходимо сформировать остаточные скорости ΔV_{circ} путем учета сглаженной кривой галактического вращения.

Согласно линейной теории волн плотности (Линь, Шу, 1964), влияние спиральной волны плотности описывается соотношениями следующего вида:

$$\begin{aligned} V_R &= -f_R \cos \chi, \\ \Delta V_{\text{circ}} &= f_\theta \sin \chi, \end{aligned} \quad (6)$$

где

$$\chi = m[\text{ctg}i \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot \quad (7)$$

фаза спиральной волны (m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки спирального узора, χ_\odot — радиальная фаза Солнца в спиральной волне); f_R и f_θ — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей, которые считаются положительными. Как показал анализ современных высокоточных данных, периодичности, связанные со спиральной волной плотности, проявляются также и в вертикальных скоростях W (Бобылев, Байкова, 2015; Расторгуев и др., 2017).

Для изучения периодичностей в скоростях V_R и ΔV_{circ} применяем модифицированный спектральный анализ (Байкова, Бобылев, 2012). Длина волны λ (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$\lambda m \text{ctg} i = 2\pi R_0. \quad (8)$$

Пусть имеется ряд измеренных скоростей V_{R_n} (это могут быть как радиальные V_R , так и тангенциальные ΔV_{circ} скорости, $n = 1, 2, \dots, N$, где N — число объектов. Задачей спектрального анализа является выделение периодичности из ряда данных

в соответствии с принятой моделью, описывающей спиральную волну плотности с параметрами f , λ (или i) и χ_\odot .

В результате учета логарифмического характера спиральной волны, а также позиционных углов объектов θ_n , наш спектральный (периодограммный) анализ рядов возмущений скоростей сводится к вычислению квадрата амплитуды (спектра мощности) стандартного преобразования Фурье (Байкова, Бобылев, 2012):

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (9)$$

где \bar{V}_{λ_k} — k -я гармоника преобразования Фурье с длиной волны $\lambda_k = D/k$, D — период анализируемого ряда,

$$\begin{aligned} R'_n &= R_0 \ln(R_n/R_0), \\ V'_n(R'_n) &= V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n). \end{aligned} \quad (10)$$

Пиковому значению спектра мощности S_{peak} соответствует искомая длина волны λ . Угол закрутки спиральной волны плотности находится из выражения (8). Амплитуду и фазу возмущений мы находим в результате подгонки гармоник с найденной длиной волны к измеренным данным. Для оценки амплитуды возмущений также может быть использовано соотношение

$$f_R(f_\theta) = 2 \times \sqrt{S_{\text{peak}}}. \quad (11)$$

Итак, подход состоит из двух этапов: а) построение гладкой кривой вращения Галактики и б) спектральный анализ радиальных V_R и остаточных тангенциальных ΔV_{circ} скоростей. Такой метод применялся Бобылевым, Байковой (2012, 2018б) при изучении кинематики молодых галактических объектов.

Статистическое моделирование

Статистическое моделирование Монте-Карло используется нами для оценки ошибок определяемых параметров спиральной волны плотности. В соответствии с этим методом мы формируем M независимых реализаций данных о параллаксах и скоростях объектов с учетом случайных ошибок их измерения, которые нам известны.

Считаем, что ошибки измерения данных распределены по нормальному закону со средним, равным номинальному значению, и дисперсией, равной $\sigma_l = \text{error}_l$, $l = 1, 2, \dots, N_d$, где N_d — число данных, error_l — обозначение ошибки измерения одного измерения с номером l (одна сигма). Каждый элемент случайной реализации формируется независимо путем суммирования номинального значения измеренного данного с номером l и случайного

числа, сгенерированного по нормальному закону с нулевым средним и дисперсией σ_l . Отметим, что последнее ограничивается сверху значением $3\sigma_l$.

Далее каждая сформированная таким образом случайная реализация данных с номером j ($j = 1, 2, \dots, M$) подвергается обработке по алгоритму, описанному выше, с целью определения искомым параметров $f_R^j, \lambda^j, \chi_\odot^j$. Затем из полученных последовательностей оценок определяются средние значения параметров и их дисперсии: $m_{f_R} \pm \sigma_{f_R}, m_\lambda \pm \sigma_\lambda, m_{\chi_\odot} \pm \sigma_{\chi_\odot}$. С использованием соотношения (8) могут быть определены статистические характеристики угла закрутки спиральной волны i : $m_i \pm \sigma_i$.

ДАННЫЕ

В настоящей работе используется каталог OB-звезд, составленный Сюем и др. (2018). В нем для 5772 звезд спектральных классов O–B2 даны собственные движения и тригонометрические параллаксы, взятые из каталога Gaia DR2. Для примерно 2000 OB-звезд даны значения лучевых скоростей, взятые из электронной базы SIMBAD¹⁾. Отметим, что в каталоге Сюя и др. (2018) лучевые скорости OB-звезд даны относительно местного стандарта покоя, поэтому заранее переводим их в гелиоцентрические с использованием параметров стандартного апекса Солнца $(U, V, W)_\odot = (10.3, 15.3, 7.7)$ км/с.

Поправка к параллаксам каталога Gaia DR2

Впервые Линдегреном и др. (2018) отмечено наличие возможного систематического сдвига $\Delta\pi = -0.029$ мсд в параллаксах Gaia DR2 по отношению к инерциальной системе координат. Здесь знак минус означает, что эту поправку необходимо прибавить к параллаксам звезд Gaia DR2 для приведения их к эталону.

В работе Арену и др. (2018) был дан обзор результатов сравнения параллаксов Gaia DR2 с 29 независимыми шкалами расстояний, которые подтверждают наличие смещения в параллаксах Gaia DR2 $\Delta\pi \sim -0.03$ мсд. Расхождения между отдельными результатами оказались очень большими (звезды программ HIPPARCOS и RECONS, звезды карликовых галактик Phoenix, Leo I и Leo II), в итоге Арену и др. (2018) не вывели среднего значения для этой поправки. Позднее некоторые результаты, использованные в работе Арену и др. (2018), были подтверждены другими авторами по новым данным. Например, Муравьева и др. (2018) по звездам типа RR Лиры нашли

поправку $\Delta\pi = -0.057$ мсд, или Бобылев (2019) по 88 радиозвездам, тригонометрические параллаксы которых измерены различными авторами методом РСДБ, получил оценку $\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046$ мсд.

Наибольший интерес представляют совершенно новые результаты. Стассун и Торрес (2018) нашли поправку $\Delta\pi = -0.082 \pm 0.033$ мсд в результате сравнения параллаксов 89 разделенных затменно-двойных звезд с их тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2. Эти звезды были отобраны по литературным данным с использованием очень строгих критериев, предьявляемых к фотометрическим характеристикам. В итоге относительные ошибки определения звездных радиусов, эффективных температур и болометрической светимости, по которой оценивается расстояние, не превышают 3%.

В работе Ялялиевой и др. (2018) из сравнения тригонометрических параллаксов Gaia DR2 и фотометрических параллаксов 94 рассеянных звездных скоплений найдена поправка $\Delta\pi = -0.045 \pm 0.009$ мсд. Высокая точность найденной оценки обусловлена высокой точностью оценок фотометрических расстояний до РЗС, полученных с привлечением первоклассных фотометрических обзоров в инфракрасной области спектра, таких как IPHAS, 2MASS, WISE и Pan-STARRS.

Риссом и др. (2018) оценка $\Delta\pi = -0.046 \pm 0.013$ мсд была получена по выборке из 50 долгопериодических цефеид при сравнении их параллаксов с параллаксами из каталога Gaia DR2. Использовались фотометрические характеристики этих цефеид, измеренные с борта космического телескопа им. Хаббла.

В работе Зинна и др. (2018) из сравнения расстояний около 3000 звезд из каталога APOKAS-2 (Пинсонью и др., 2018), принадлежащих ветви красных гигантов, с данными каталога Gaia DR2 найдена поправка $\Delta\pi = -0.053 \pm 0.003$ мсд. Близкая величина, $\Delta\pi = -0.050 \pm 0.004$ мсд, получена также этими авторами из анализа звезд, принадлежащих сгущению красных гигантов. Оценки расстояний до таких звезд были вычислены по астросейсмическим данным. Согласно этим авторам, здесь ошибки определения параллаксов примерно равны ошибкам оценивания радиуса звезды и в среднем составляют 1.5%. Такие маленькие ошибки в сочетании с огромным количеством звезд позволили определить значение $\Delta\pi$ с высокой точностью.

Перечисленные результаты позволяют заключить, что необходимо исправлять тригонометрические параллаксы звезд из каталога Gaia DR2 небольшой поправкой. Мы будем ориентироваться на результаты Ялялиевой и др. (2018), Рисса и др. (2018) и Зинна и др. (2018), которые выглядят наиболее достоверными.

¹⁾<http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/>

Таблица 1. Параметры вращения Галактики, найденные по ОБ-звездам с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами ($\sigma_\pi/\pi < 15\%$) при различных значениях поправки к параллаксам каталога Gaia DR2

Параметры	$\pi = \pi + 0.0$ мсд	$\pi = \pi + 0.02$ мсд	$\pi = \pi + 0.03$ мсд	$\pi = \pi + 0.05$ мсд
U_\odot , км/с	9.49 ± 0.72	9.19 ± 0.71	9.24 ± 0.70	9.27 ± 0.69
V_\odot , км/с	12.59 ± 0.69	13.16 ± 0.68	12.81 ± 0.69	13.24 ± 0.67
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.380 ± 0.100	-3.559 ± 0.098	-3.591 ± 0.097	-3.811 ± 0.096
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.483 ± 0.118	0.676 ± 0.014	0.613 ± 0.125	0.742 ± 0.120
σ_0 , км/с	18.32	18.35	18.54	18.54
N_\star	1783	1839	1876	1925
U_\odot , км/с	6.12 ± 0.26	6.25 ± 0.25	6.22 ± 0.24	6.17 ± 0.23
V_\odot , км/с	6.77 ± 0.44	7.10 ± 0.42	7.13 ± 0.40	7.38 ± 0.38
Ω_0 , км/с/кпк	29.90 ± 0.13	29.76 ± 0.13	29.73 ± 0.13	29.56 ± 0.12
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.202 ± 0.037	-4.175 ± 0.036	-4.154 ± 0.035	-4.119 ± 0.035
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.647 ± 0.032	0.658 ± 0.032	0.645 ± 0.029	0.648 ± 0.029
σ_0 , км/с	12.17	11.84	11.73	11.31
N_\star	4249	4408	4488	4620
$(\Omega'_0)_{V_r}/(\Omega'_0)_{V_l}$	0.80	0.85	0.86	0.93

Примечание. В верхней части даны результаты, полученные только по лучевым скоростям V_r (уравнение (1)), а в нижней части — только по компоненте V_l (уравнение (2)). N_\star — количество использованных звезд.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вся выборка ОБ-звезд

Вначале рассмотрим все наши ОБ-звезды при различных ограничениях на значение относительной ошибки тригонометрических параллаксов и различных значениях поправки нуля-пункта параллаксов Gaia DR2, $\Delta\pi$.

В табл. 1 даны кинематические параметры, полученные при различных значениях поправки к параллаксам каталога Gaia DR2 в результате отдельных решений уравнения (1) и (2). Были использованы ОБ-звезды с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 15%. Как можно видеть из таблицы, заметное влияние значения поправки $\Delta\pi$ имеется при определении кинематических параметров при использовании лучевых скоростей звезд (верхняя часть табл. 1). Наибольшее влияние здесь испытывает значение второй производной галактического вращения Ω''_0 .

В последней строке табл. 1 дано отношение значений первой производной угловой скорости,

найденной только с использованием лучевых скоростей $(\Omega'_0)_{V_r}$ к найденной только с использованием собственных движений $(\Omega'_0)_{V_l}$. Этот метод основан на том, что оценка первой производной угловой скорости, получаемая по данным о собственных движениях, очень слабо зависит от ошибки принятой шкалы расстояния, в то время как оценка первой производной угловой скорости, получаемая по данным о лучевых скоростях, обратно пропорциональна принятому масштабу шкалы расстояний. Поэтому сравнение найденных различными способами значений Ω'_0 позволяет найти поправочный коэффициент шкалы расстояний p (Заболотских и др., 2002; Расторгуев и др., 2017), в нашем случае $p = (\Omega'_0)_{V_r}/(\Omega'_0)_{V_l}$. Ошибка 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 (2018a) из анализа более 50 000 звезд из каталога TGAS (Браун и др., 2016) была получена оценка $p = 0.97 \pm 0.04$. Согласно результатам, указанным в табл. 1, можем видеть, что коэффициент шкалы расстояний p стремится к единице с увеличением значения поправки $\Delta\pi$. С другой стороны, замет-

Таблица 2. Параметры вращения Галактики, найденные по ОВ-звездам с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами при совместном решении уравнений вида (1)–(2), при различных ограничениях на значения относительных ошибок параллаксов из каталога Gaia DR2, к параллаксам ОВ-звезд была прибавлена поправка $\Delta\pi = 0.050$ мсд

Параметры	$\sigma_\pi/\pi < 10\%$	$\sigma_\pi/\pi < 15\%$	$\sigma_\pi/\pi < 20\%$	$\sigma_\pi/\pi < 30\%$
U_\odot , км/с	6.13 ± 0.26	6.48 ± 0.24	6.61 ± 0.23	6.62 ± 0.23
V_\odot , км/с	10.20 ± 0.38	9.95 ± 0.33	9.79 ± 0.31	8.99 ± 0.28
Ω_0 , км/с/кпк	29.09 ± 0.17	29.13 ± 0.13	29.03 ± 0.13	29.15 ± 0.13
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.161 ± 0.045	-4.058 ± 0.035	-3.992 ± 0.033	-3.915 ± 0.032
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.824 ± 0.055	0.767 ± 0.030	0.742 ± 0.023	0.620 ± 0.015
σ_0 , км/с	12.84	13.54	13.93	14.28
N_*	3313	4569	4959	5175
A , км/с/кпк	16.64 ± 0.18	16.23 ± 0.14	15.97 ± 0.13	15.66 ± 0.13
B , км/с/кпк	-12.45 ± 0.24	-12.89 ± 0.19	-13.06 ± 0.18	-13.50 ± 0.18
V_0 , км/с	232.8 ± 4.6	233.0 ± 4.5	232.3 ± 4.5	233.2 ± 4.5

Примечание. N_* — количество использованных звезд.

ные отличия этого коэффициента от единицы в первых столбцах таблицы практически целиком определяются значениями Ω'_{0V_r} . Можно заключить, что качество лучевых скоростей этой выборки ОВ-звезд невысокое.

В табл. 2 даны кинематические параметры, найденные при совместном решении системы уравнений вида (1)–(2) при различных ограничениях на значения относительных ошибок параллаксов из каталога Gaia DR2. Здесь к параллаксам ОВ-звезд была прибавлена поправка $\Delta\pi = 0.050$ мсд. Совместное решение заключается в следующем. ОВ-звезды с собственными движениями, лучевыми скоростями и расстояниями дают два уравнения вида (1)–(2), а звезды, для которых имеются только собственные движения, дают только уравнение (2). Как видно из табл. 1, звезд с лучевыми скоростями примерно в два раза меньше, чем звезд с собственными движениями.

По выборке из 5335 звезд, к параллаксам которых была прибавлена поправка $\Delta\pi = 0.050$ мсд, из решения только уравнений вида (2) найдены следующие значения кинематических параметров:

$$\begin{aligned}
 (U_\odot, V_\odot) &= & (12) \\
 &= (6.53, 7.27) \pm (0.24, 0.31) \text{ км/с,} \\
 \Omega_0 &= 29.70 \pm 0.11 \text{ км/с/кпк,} \\
 \Omega'_0 &= -4.035 \pm 0.031 \text{ км/с/кпк}^2, \\
 \Omega''_0 &= 0.620 \pm 0.014 \text{ км/с/кпк}^3,
 \end{aligned}$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 12.33$ км/с, значения постоянных Оорта $A = 16.14 \pm 0.13$ км/с/кпк и $B = -13.56 \pm 0.17$ км/кпк, а линейная скорость вращения Галактики на солнечном расстоянии $V_0 = 237.6 \pm 4.5$ км/с.

Параметры (12) необходимо сравнивать с теми, что даны в последнем столбце табл. 2, так как оба эти решения были получены при одинаковых ограничениях. Такое сравнение показывает, что в случае использования только собственных движений ОВ-звезд (решение (12)) кинематические параметры определяются с меньшими ошибками по сравнению с результатами совместного решения (табл. 2).

ОВ-звезды с лучевыми скоростями

В этом разделе производится анализ ОВ-звезд, для которых имеется полная информация. Таким образом, имеются измерения их тригонометрических параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей. Такая выборка содержит более 2000 ОВ-звезд. Для каждой такой звезды можем вычислить скорости U, V, W , а также V_R и V_{circ} . Результаты анализа этих звезд отражены на рис. 1–4.

Ранее (табл. 1–2) уравнения вида (1)–(2) решались в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения звезд с большими невязками.

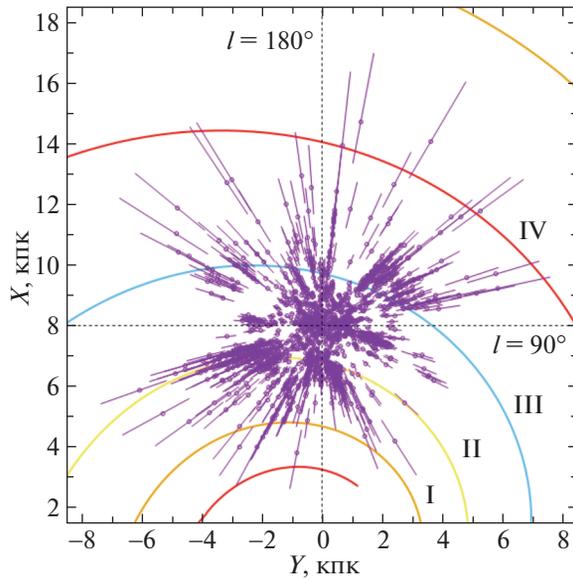


Рис. 1. Распределение на галактической плоскости XU выборки ОВ-звезд, для которых имеются как лучевые скорости, так и собственные движения; Солнце имеет координаты $(X, Y) = (8, 0)$ кпк, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки -13° (Бобылев, Байкова, 2014), отрезки спиральных рукавов пронумерованы римскими цифрами.

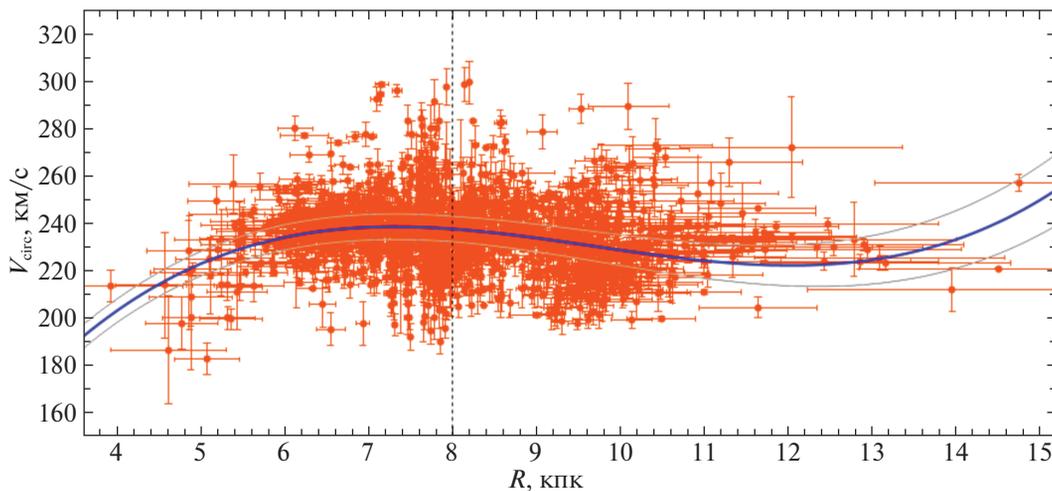


Рис. 2. Круговые скорости ОВ-звезд в зависимости от галактоцентрического расстояния, дана кривая вращения Галактики, построенная согласно решению (12), с границами доверительных интервалов, соответствующими уровню 1σ ; вертикальным пунктиром обозначено положение Солнца.

Теперь при отборе ОВ-звезд, чтобы улучшить качество пространственных скоростей (из-за низкого качества ряда лучевых скоростей ОВ-звезд), используем следующие дополнительные ограничения:

$$\begin{aligned} \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} &< 60 \text{ км/с}, \\ |W| &< 40 \text{ км/с}, \end{aligned} \quad (13)$$

где при вычислении скоростей U, V, W учтена кривая вращения (12).

На рис. 1 дано распределение на галактической плоскости XU 2023 ОВ-звезд с относительными

ошибками параллаксов не более 30%. Расстояния до них вычислены с использованием поправки $\Delta\pi = 0.050$ мсд к оригинальным значениям тригонометрических параллаксов. Римскими цифрами на рисунке пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля-Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав.

На рис. 2 даны круговые скорости 2023 ОВ-звезд в зависимости от галактоцентрического расстояния, приведена кривая вращения Галактики, построенная согласно решению (12).

По отклонению от кривой галактического вращения (12) для этой выборки ОВ-звезд были

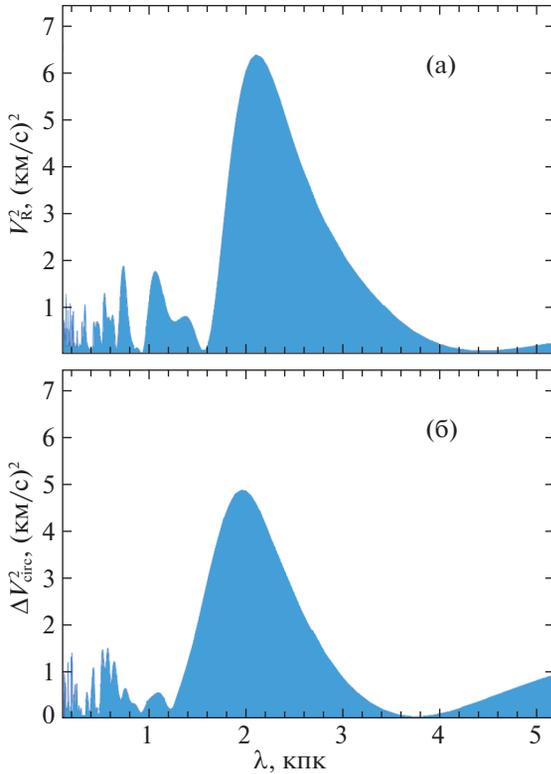


Рис. 3. Спектр мощности радиальных (а) и остаточных тангенциальных (б) скоростей ОВ-звезд.

вычислены остаточные круговые скорости ΔV_{circ} . Далее, по рядам их радиальных V_R и остаточных тангенциальных ΔV_{circ} скоростей, с применением периодограммного анализа найдены параметры галактической спиральной волны плотности.

На рис. 3 показаны спектры мощности скоростей ОВ-звезд. Из этого рисунка хорошо видно, что в обоих случаях пики распределения лежат практически на одном значении λ . Действительно, длина волны возмущений равна $\lambda_R = 2.1 \pm 0.5$ кпк (для контроля по формуле (8) вычисляем значение угла закрутки $i = -9 \pm 2^\circ$ для принятой четырехрукавной модели спирального узора, $m = 4$) и $\lambda_\theta = 1.9 \pm 0.5$ кпк ($i = -9 \pm 2^\circ$). Амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей составили $f_R = 5.1 \pm 1.2$ км/с и $f_\theta = 4.4 \pm 1.4$ км/с соответственно.

На рис. 4 приведены радиальные и остаточные тангенциальные скорости ОВ-звезд. Даны соответствующие периодические кривые, построенные с найденными в результате спектрального анализа параметрами. Хорошо видно, что эти кривые, на рис. 4а и рис. 4б, идут со сдвигом по фазе примерно в 90° . Фазу Солнца в спиральной волне χ_\odot отсчитываем от рукава Киля—Стрельца ($R \sim 7$ кпк), в нашем случае ее значение оказалось равным $-178 \pm 12^\circ$.

ОБСУЖДЕНИЕ

Расторгуевым и др. (2017) по данным о 130 мазерах с измеренными средствами РСДБ тригонометрическими параллаксами были найдены компоненты скорости Солнца $(U_\odot, V_\odot) = (11.40, 17.23) \pm (1.33, 1.09)$ км/с, и следующие значения параметров кривой вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.93 \pm 0.53$ 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 значения $R_0 = 8.40 \pm 0.12$ кпк).

Бобылевым, Байковой (2018б) по выборке из 495 ОВ-звезд с собственными движениями из каталога Gaia DR2 были найдены следующие значения кинематических параметров: $(U, V, W)_\odot = (8.16, 11.19, 8.55) \pm (0.48, 0.56, 0.48)$ км/с, $\Omega_0 = 28.92 \pm 0.39$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.087 \pm 0.083$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.703 \pm 0.067$ км/с/кпк³, где $V_0 = 231 \pm 5$ км/с (для принятого $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк). Отметим, что при поиске решения (12) настоящей работы было использовано на порядок большее количество ОВ-звезд. Здесь мы имеем отличное согласие в значениях найденных параметров, при этом ошибки определяемых параметров в решении (12) очень малы. В этом смысле решение (12) на сегодняшний день дает одни из лучших оценок параметров Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 .

Отметим также параметры, найденные в работе Бобылева, Байковой (2019) по выборке из 326 молодых ($\lg t < 8$) рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и расстояниями из каталога Gaia DR2: $(U, V, W)_\odot = (8.53, 11.22, 7.83) \pm (0.38, 0.46, 0.32)$ 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.

Параметры спиральной волны плотности. В обзоре Валле (2017б) дается среднее значение угла закрутки глобального четырехрукавного спирального узора в нашей Галактике $i = -13.6 \pm 0.4^\circ$. Тогда $m = 4$ и $R_0 = 8.0$ кпк из соотношения (8) следует $\lambda = 3.0$ кпк. Можно видеть, что анализ нашей выборки ОВ-звезд дает меньшее значение λ и соответственно меньшее значение угла закрутки $|i| : 9^\circ - 10^\circ$.

В работе Дамбиса и др. (2015) из анализа пространственного распределения большой выборки классических цефеид были получены оценки угла закрутки спирального узора $i = -9.5^\circ \pm 0.1^\circ$ и фазы Солнца $\chi_\odot = -121^\circ \pm 3^\circ$ для модели четырехрукавного спирального узора.

С другой стороны, Расторгуев и др. (2017) из анализа мазерных источников с РСДБ-параллаксами нашли $i = -10.4^\circ \pm 0.3^\circ$ и $\chi_\odot = -125^\circ \pm 10^\circ$,

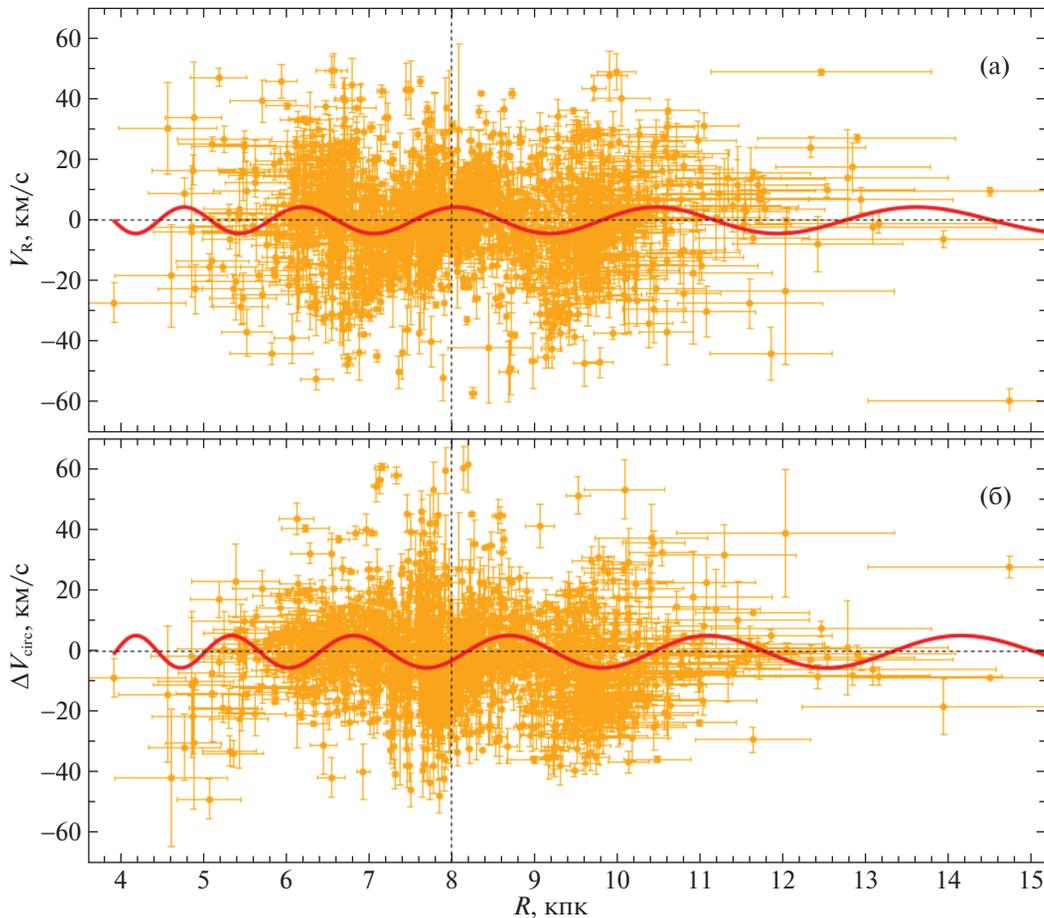


Рис. 4. Радиальные (а) и остаточные тангенциальные (б) скорости ОВ-звезд в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца.

что находится в согласии с результатами настоящей работы.

Согласно модельным оценкам Бертон (1971), амплитуды скоростей возмущений от волны плотности (f_R, f_θ) зависят от R . Причем обе эти скорости имеют достаточно широкий максимум в районе $0.5R_0 < R < 0.9R_0$, достигая ≈ 8 км/с (f_R всюду на ≈ 1 км/с больше чем f_θ), вблизи $0.2R_0$ скорости составляют около 4 км/с, и уменьшаются до 2.5 км/с в окрестности $1.3R_0$.

Анализ современных данных показывает, что в широкой окрестности R_0 скорости f_R и f_θ обычно составляют 4–9 км/с по мазерам (Расторгуев и др., 2017), ОВ-звездам (Бобылев, Байкова, 2018б) или цефеидам (Бобылев, Байкова, 2012). Отметим также новые значения $f_R = 4.6 \pm 0.7$ км/с и $f_\theta = 1.1 \pm 0.4$ км/с, полученные в недавней работе Локтина, Поповой (2019) из анализа современных данных о РЗС. Найденные в настоящей работе значения амплитуд возмущений, f_R в особенности, находятся в хорошем согласии с перечисленными выше результатами.

При анализе ОВ-звезд, молодых рассеянных звездных скоплений или молодых цефеид значение модуля фазы заключено в интервале $100\text{--}140^\circ$. Как видим, найденное нами значение фазы Солнца в спиральной волне $-178 \pm 12^\circ$ заметно отличается от перечисленных результатов других авторов, которые получены из анализа молодых объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучены кинематические свойства большой выборки ОВ-звезд (около 6000 звезд) с собственными движениями и тригонометрическими параллаксами из каталога Gaia DR2, частично (около 2000 звезд) и с их лучевыми скоростями. Для этого был использован каталог ОВ-звезд, составленный Сюем и др. (2018).

Проанализированы отдельные и совместные решения основных кинематических уравнений при различных ограничениях на значение относительной ошибки тригонометрических параллаксов и различных значениях поправки нуля-пункта параллаксов Gaia DR2, $\Delta\pi$. В итоге показано, что

в рассматриваемой околосолнечной окрестности (радиусом около 4 кпк) параметры гладкой кривой вращения Галактики точнее определяются в решении, где используются только собственные движения ОВ-звезд (решение (12)), которое было получено с участием 5335 ОВ-звезд. Показано, что имеется заметное влияние поправки $\Delta\pi$ при определении кинематических параметров в случае использования лучевых скоростей ОВ-звезд. Причем наибольшее влияние здесь испытывает значение Ω_0'' .

Для изучения влияния галактической спиральной волны плотности была использована выборка из 2023 ОВ-звезд с относительными ошибками параллакса не более 30%, а также с известными лучевыми скоростями и собственными движениями. Амплитуды тангенциальных и радиальных скоростей возмущений, вызванных спиральной волной плотности, составили $f_\theta = 4.4 \pm 1.4$ км/с и $f_R = 5.1 \pm 1.2$ км/с соответственно, длина волны возмущений $\lambda_\theta = 1.9 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_R = 2.1 \pm 0.5$ кпк для принятой модели четырехрукавной структуры. Фаза Солнца в спиральной волне найдена равной $\chi_\odot = -178^\circ \pm 12^\circ$.

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований РАН No 12, подпрограмма “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антоха и др. (T. Antoja, A. Helmi, M. Romero-Gómez, D. Katz, C. Babusiaux, R. Drimmel, D.W. Evans, F. Figueras, et al.), *Nature* **561**, 360 (2018).
2. 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).
3. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, et al., *Astron. Lett.* **38**, 549 (2012)].
4. Бертон (W.B. Burton), *Astron. Astrophys.* **10**, 76 (1971).
5. Бил, Овенден (J. Byl and M.W. Ovenden), *Astrophys. J.* **225**, 496 (1978).
6. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т. (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **447**, L50 (2015).
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 210 (2018a) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 184 (2018)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 739 (2018b) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 675 (2018)].
10. Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **45**, 13 (2019) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **45**, 10 (2019)].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 151 (2019) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **45**, 109 (2019)].
12. 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).
13. 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).
14. Валле (J.P. Vallée), *Astrophysics and Space Science* **362**, 79 (2017a).
15. Валле (J.P. Vallée), *New Astronomy Rev.* **79**, 49 (2017b).
16. де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **232**, 22 (2017).
17. Дамбис А.К., Бердников Л.Н., Ефремов Ю.Н., Князев А.Ю., Расторгуев А.С., Глушкова Е.В., Кравцов В.В., Тернер Д.Г. и др., Письма в Астрон. журн. **41**, 533 (2015) [A.K. Dambis, et al., *Astron. Lett.* **41**, 489 (2015)].
18. Жоржелен, Жоржелен (Y.M. Georgelin and Y.P. Georgelin), *Astron. Astrophys.* **49**, 57 (1976).
19. 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)].
20. Зари и др. (E. Zari, H. Hashemi, A.G.A. Brown, K. Jardine, and P.T. de Zeeuw), *Astron. Astrophys.* **620**, 172 (2018).
21. Зинн и др. (J.C. Zinn, M.H. Pinsonneault, D. Huber, and D. Stello), arXiv: 1805.02650 (2018).
22. Камарильо и др. (T. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat), *PASP* **130**, 4101 (2018).
23. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Núñez, C. Soubiran, et al.), *Astron. Astrophys.* **618**, 93 (2018).
24. Кункель и др. (M. Kounkel, K. Covey, G. Suárez, C. Román-Zúñiga, J. Hernandez, K. Stassun, K.O. Jaehnig, E.D. Feigelson, et al.), *Astron. J.* **156**, 84 (2018).
25. Линдегрэн и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, S. Klioner, U. Bastian, M. Ramos-Lerate, A. de Torres, H. Steidelmüller, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 2 (2018).
26. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
27. Локтин А.В., Попова М.Э., *Астрофиз. Бюлл.* 74 (2019).
28. Маис-Апельянис (J. Maiz-Apellaniz), *Astron. J.* **121**, 2737 (2001).
29. Муравьева и др. (T. Muraveva, H.E. Delgado, G. Clementini, L.M. Sarro, and A. Garofalo), *MNRAS* **481**, 1195 (2018).
30. Пинсонью и др. (M.H. Pinsonneault, Y.P. Elsworth, J. Tayar, A. Serenelli, D. Stello, J. Zinn, S. Mathur, R. Garcia, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **239**, 32 (2018).

31. 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. Bull.* **72**, 122 (2017)].
32. 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).
33. Роккатаглиата и др. (V. Roccatagliata, G.G. Sacco, E. Franciosini, and S. Randich), *Astron. Astrophys.* **617**, L4 (2018).
34. Руссейль (D. Russeil), *Astron. Astrophys.* **397**, 133 (2003).
35. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).
36. Субиран и др. (C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gomez, L. Casamiquela, C. Jordi, A. Vallenari, T. Antoja, L. Balaguer-Núñez, et al.), *Astron. Astrophys.* **619**, 155 (2018).
37. Сюй и др. (Y. Xu, S.B. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, B. Zhang, Q.Z. Yan, T.M. Dame, K.M. Menten, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, L15 (2018).
38. Франциосини и др. (E. Franciosini, G.G. Sacco, R.D. Jeffries, F. Damiani, V. Roccatagliata, D. Fedele, and S. Randich), *Astron. Astrophys.* **616**, 12 (2018).
39. Хельми и др. (Gaia Collaboration, A. Helmi, F. van Leeuwen, P.J. McMillan, D. Massari, T. Antoja, A.C. Robin, L. Lindegren, U. Bastian, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 12 (2018).
40. 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)].