ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2023, том 49, № 6, с. 401–411

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ СПИРАЛЬНОГО УЗОРА МЛЕЧНОГО ПУТИ ПО МОЛОДЫМ РАССЕЯННЫМ ЗВЕЗДНЫМ СКОПЛЕНИЯМ

© 2023 г. В. В. Бобылев[1*], А. Т. Байкова[1]

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

Поступила в редакцию 01.06.2023 г.
После доработки 29.06.2023 г.; принята к публикации 07.07.2023 г.

Оценка скорости вращения спирального узора Галактики Ω_p выполнена по большой выборке молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС). Для этого было использовано 2494 РЗС моложе 50 млн лет. Средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний были вычислены в работе Хант, Рефферт (2023) по данным каталога Gaia DR3. Для оценки Ω_p применены три способа. Все они основаны на линейной теории спиральной волны плотности Лина и Шу. Первым способом, наиболее надежным с нашей точки зрения, с использованием скоростей возмущения f_R и f_θ, найденным в результате спектрального анализа радиальных V_R и остаточных скоростей вращения $\Delta V_{\rm circ}$, получена оценка $\Omega_p = 24.26 \pm 0.52$ км/с/кпк. Вторым способом скорости f_R и f_θ были найдены из решения основных кинематических уравнений совместно с параметрами вращения Галактики, и получена оценка $\Omega_p = 23.45 \pm 0.53$ км/с/кпк. Третьим способом, основанным на анализе позиционных углов РЗС на момент их рождения $\theta_{\rm birth}$, найдено $\Omega_p = 28.9 \pm 2.8$ км/с/кпк.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, спиральная волна плотности, вращение Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010823060013, **EDN:** GNNXDV

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время имеется большой интерес к изучению спиральной структуры Галактики. Это стало возможным благодаря появлению высокоточных кинематических данных о таких индикаторах спиральной структуры, как мазерные источники, ОВ-звезды или цефеиды. Например, в работе Бобылева, Байковой (2023) по этим объектам были получены оценки угловой скорости вращения спирального узора.

Список индикаторов галактической спиральной структуры, конечно, более широкий. В частности, рассеянные звездные скопления (РЗС) имеют важное значение для изучения структуры и кинематики Галактики. Данные о РЗС используют для оценки параметров кривой вращения Галактики (Глушкова и др., 1998; Заболотских и др., 2002; Пискунов и др., 2006; Локтин, Попова, 2019; Попова, 2023), геометрических и кинематических характеристик галактической спиральной волны плотности (Амарал, Лепине, 1997; Попова, Локтин, 2005; Наоц, Шавив, 2007; Бобылев и др., 2008; Лепине и др., 2008; Юнкейра и др., 2015; Камарго и др., 2015; Бобылев, Байкова, 2019; Кантат-Гудин и др., 2020), а также других структурных и кинематических свойств РЗС (Кун и др., 2019; Таррик и др., 2021; Монтейро и др., 2021).

Важным источником массовых данных о тригонометрических параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях звезд являются каталоги, созданные в результате выполнения космического проекта Gaia (Прусти и др., 2016). В версии Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2021) тригонометрические параллаксы для примерно 500 млн звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги (мсд). Собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10% (ошибка модуля вектора собственного движения). В Gaia EDR3 значения лучевых скоростей были скопированы из предыдущей версии каталога — Gaia DR2 (Браун и др., 2018). В последней опубликованной версии каталога Gaia DR3 (Валенари и др., 2022) существенно улучшены лучевые скорости звезд, а значения параллаксов и собственных движений звезд просто скопированы из Gaia EDR3.

Каталоги, содержащие кинематические характеристики РЗС, быстро обновляются. Например,

[*] Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

хорошо известны каталоги Диаса и др. (2001, 2006, 2021). В последнем каталоге из этой серии представлены 1743 РЗС, фундаментальные параметры которых определены на основе данных Gaia DR2. Сюда входят оценки среднего расстояния, возраста и компонент собственного движения. Средние значения лучевой скорости вычислены для 831 скопления.

В каталоге Кантат-Гудин и др. (2020) содержатся данные о 2017 РЗС. Охваченными оказались 234 128 звезд-членов этих скоплений. Значения средних параметров РЗС были определены по данным Gaia DR2. Для оценки поглощения, модуля расстояния и возраста скопления была использована искусственная нейронная сеть. По мнению этих авторов, надежные результаты получены для 1867 РЗС.

В каталоге Таррик и др. (2021) даны средние значения лучевой скорости для 1382 РЗС из списка Кантат-Гудин и др. (2020). Лучевые скорости звезд были взяты из различных источников. Средневзвешенные значения лучевых скоростей у 38% этих РЗС можно считать высоконадежными, так как они вычислены с использованием более чем трех звезд, ошибки таких средних составляют менее 3 км/с.

В работе Хао и др. (2021) даны средние собственные движения и средние параллаксы 3794 РЗС, вычисленные по данным каталога Gaia EDR3. Оценки возраста собраны этими авторами из различных источников. В работе Хао и др. (2022) описаны еще 704 ранее неизвестных РЗС, найденных по данным каталога Gaia EDR3. Таким образом, каталоги этих авторов образуют одну из наиболее обширных кинематических баз о рассеянных звездных скоплениях Галактики.

Отметим, наконец, работу Йоши, Малхотры (2022), где представлены более 6000 скоплений. Из них для 4378 РСЗ имеется информация о расстоянии и возрасте, которая получена с использованием данных Gaia. Именно по таким скоплениям был проведен анализ их пространственного распределения, а также изучена их кинематика. В частности, эти авторы получили новую оценку угловой скорости вращения спирального узора Галактики $\Omega_p = 26.5 \pm 1.5$ км/с/кпк и значение радиуса коротации $R_{\rm cor} = (1.08^{+0.06}_{-0.05})R_0$. Для этого был выполнен анализ позиционных углов РЗС на момент их рождения.

Целью настоящей работы является анализ кинематики молодых РЗС, представленных в работе Хант, Рефферт (2023), которые были выделены этими авторами уже по данным каталога Gaia DR3.

1. ДАННЫЕ

В работе Хант, Рефферт (2023) представлены 7200 РЗС, которые были выделены по данным каталога Gaia DR3. Для выделения членов скоплений использовался популярный алгоритм кластерного анализа HDBSCAN. Новыми кандидатами в РЗС являются 2420 из общего числа найденных скоплений, 4780 РЗС известны из литературы, включая 134 шаровые скопления. Более строгий раздел каталога содержит 4114 высоконадежных РЗС, 749 из которых являются новыми. Для всех РЗС каталога определены такие параметры, как возраст, время жизни и расстояния. Большой процент РЗС в каталоге имеет оценку среднего значения лучевой скорости, вычисленную по данным каталога Gaia DR3.

В настоящей работе для анализа кинематики Галактики и спиральной волны плотности были отобраны РЗС моложе 50 млн лет. При этом были использованы только РЗС с отметкой ‘o’, т.е. движущиеся группы и шаровые скопления исключались. Не использовались РЗС, лежащие во внутренней области Галактики с $R < 4$ кпк, где имеется сильное влияние центрального бара. Всего отобрано 2494 скопления со средним возрастом 21.1 млн лет. Из них для 1722 РЗС вычислены средние значения лучевых скоростей. Эту выборку мы разделили на две примерно равные части по возрасту. В первую вошли 1332 РЗС моложе 20 млн со средним возрастом 9.6 млн лет. Во вторую вошли 1162 РЗС с возрастами из интервала 20–50 млн со средним возрастом 34.3 млн лет.

На рис. 1 дано распределение РЗС моложе 20 млн лет и с возрастами в интервале 20–50 млн лет в проекции на галактическую плоскость XY. Использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце; направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ (Бобылев, Байкова, 2014), построенный со значением $R_0 = 8.1$ кпк; римскими цифрами пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля–Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав. Из рисунка следует, что в обоих случаях отобранные РЗС неплохо трассируют спиральный узор.

2. МЕТОДЫ

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую 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

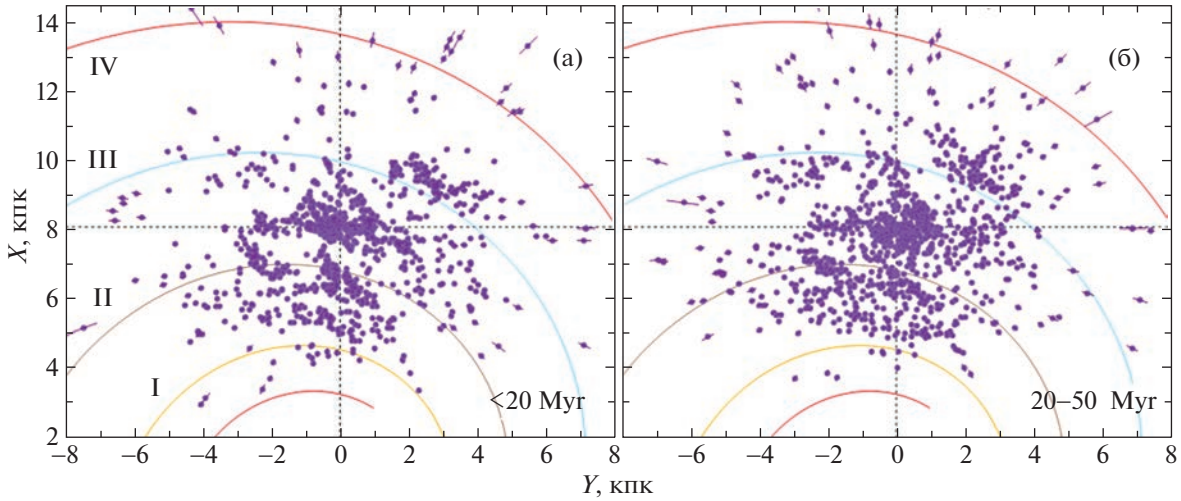

Рис. 1. Распределение в проекции на галактическую плоскость XY РЗС моложе 20 млн лет (а) и с возрастами в интервале 20–50 млн лет (б).

в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W, направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

$$U = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \quad (1)$$
$$V = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$
$$W = V_r \sin b + V_b \cos b,$$

где скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V — в направлении вращения Галактики и W — на северный галактический полюс. Две скорости: V_R, направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость $V_{\rm circ}$ — направленную в направлении вращения Галактики, можем найти из выражений

$$V_{\rm circ} = U \sin\theta + (V_0 + V)\cos\theta, \quad (2)$$
$$V_R = -U \cos\theta + (V_0 + V)\sin\theta,$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\mathrm{tg}\,\theta = y/(R_0 - x)$, 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. Но для анализа периодичностей в тангенциальных скоростях необходимо определить сглаженную кривую галактического вращения и сформировать остаточные скорости $\Delta V_{\rm circ}$.

2.1. Основные кинематические уравнения

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

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

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + \quad (4)$$
$$+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r\cos b)\Omega_0' +$$
$$+ 0.5(R - R_0)^2 (R_0 \cos l - r\cos b)\Omega_0'' +$$
$$+ f_R \cos\chi \sin(l + \theta) +$$
$$+ f_\theta \sin\chi \cos(l + \theta),$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \quad (5)$$
$$- W_\odot \cos b - R_0(R - R_0)\sin l \sin b \Omega_0' -$$
$$- 0.5 R_0 (R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega_0'' +$$
$$+ f_R \cos\chi \cos(l + \theta)\sin b -$$
$$- f_\theta \sin\chi \sin(l + \theta)\sin b,$$

где R — расстояние звезды от оси вращения Галактики $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Скорости $(U, V, W)_\odot$ являются средней групповой скоростью выборки, берутся с обратным знаком и отражают пекулярное движение Солнца; 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 настоящей работе значение R_0 принимается равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору Бобылева, Байковой (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок. А также используется четырехрукавная модель спирального узора Галактики $m = 4$.

Согласно линейной теории волн плотности (Линь, Шу, 1964), возмущения от галактической спиральной волны плотности в скоростях V_R и $\Delta V_{\rm circ}$ являются периодическими и описываются фукциями следующего вида:

$$V_R = f_R \cos\chi, \qquad (6)$$
$$\Delta V_{\rm circ} = f_\theta \sin\chi,$$

где χ — радиальная фаза спиральной волны

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

а $\chi_\odot$ — радиальная фаза Солнца в спиральной волне, m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающихся спиралей), f_R и f_θ — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей соответственно. Длина волны λ (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$2\pi R_0/\lambda = m\,\mathrm{ctg}(|i|). \qquad (8)$$

Из решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с учетом (7) можем определить значения следующих неизвестных: $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0, Ω_0', Ω_0'', i, $\chi_\odot$, f_R и f_θ.

2.2. Спектральный анализ

Другой подход состоит в том, что из решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с исключенными параметрами спиральной волны находим значения всего шести неизвестных: $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0, Ω_0' и Ω_0''. Затем формируются остаточные скорости V_R, $\Delta V_{\rm circ}$ и W. Остаточными они являются в том смысле, что а) из них вычтено пекулярное движение Солнца с найденными значениями $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, и б) в скоростях $\Delta V_{\rm circ}$ учтено вращение Галактики с найденными значениями Ω_0, Ω_0' и Ω_0''.

Пусть имеется ряд измеренных скоростей V_{R_n} (это могут быть как радиальные V_R, тангенциальные $\Delta V_{\rm circ}$, так и вертикальные W скорости), $n = 1, \ldots, N$, 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 $\chi_\odot$.

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):

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

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

$$R_n' = R_0\ln(R_n/R_0), \qquad (10)$$
$$V_n'(R_n') = V_n(R_n')\exp(jm\theta_n).$$

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

$$f_R(f_\theta, f_W) = 2\sqrt{S_{\rm peak}}. \qquad (11)$$

2.3. Оценка скорости Ω_p

В основе подхода, который мы применяем в настоящей работе, лежит вытекающее из линейной теории волн плотности Линя, Шу (1964) соотношение (Рольфс, 1980):

$$\chi = m[\Omega_p - \Omega(R)]t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)\mathrm{ctg}\,i = \qquad (12)$$
$$= \varkappa\nu t + \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)\mathrm{ctg}\,i,$$

где $\Omega = \Omega(R)$ — угловая скорость вращения Галактики, Ω_p — угловая скорость вращения спирального узора, $\varkappa^2 = 4\Omega^2\left(1 + \dfrac{R}{2\Omega}\dfrac{d\Omega}{dR}\right)$ — эпициклическая частота ($\varkappa > 0$), $\nu = m(\Omega_p - \Omega)/\varkappa$ — частота, с которой пробная частица встречает проходящее спиральное возмущение.

2.3.1. Способ I (ν). С другой стороны, f_R и f_θ имеют следующий вид:

$$f_R = \frac{kA}{\varkappa}\frac{\nu}{1-\nu^2}\Im_\nu^{(1)}(x), \qquad (13)$$

$$f_\theta = -\frac{kA}{2\Omega}\frac{1}{1-\nu^2}\Im_\nu^{(2)}(x), \qquad (14)$$

где A — амплитуда потенциала спиральной волны, $k = m\,\mathrm{ctg}\,i/R$ — радиальное волновое число, $\Im_\nu^{(1)}(x)$ и $\Im_\nu^{(2)}(x)$ — редукционные факторы:

$$\Im_\nu^{(1)}(x) = \frac{1-\nu^2}{x}\left[1 - \frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \right. \quad (15)$$
$$\left. \times \frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))}\cos(\nu s)ds\right],$$

$$\Im_\nu^{(2)}(x) = (\nu^2-1)\frac{\nu\pi}{\sin(\nu\pi)} \times \quad (16)$$
$$\times \frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{1}{2\pi}\int_{-\pi}^{+\pi} e^{-x(1+\cos(s))}\cos(\nu s)ds\right],$$

являющиеся функциями координаты $x = k^2\sigma_R^2/\varkappa^2$, где σ_R — среднеквадратическое значение дисперсии радиальных скоростей звезд. Соотношения (13)–(16) позволяют определить Ω_p после подстановки значений параметров $(f_R, f_\theta, \Omega_0, \Omega_0', \sigma_R)$, полученных из наблюдений.

Амплитуду потенциала спиральной волны A оцениваем на основе известного соотношения (Фернандес и др., 2008):

$$A = \frac{(R_0\Omega_0)^2 f_{r0}\,\mathrm{tg}\,i}{m}, \quad (17)$$

где значение отношения радиальной компоненты гравитационной силы, соответствующей спиральным рукавам, к общей гравитационной силе Галактики, f_{r0}, берем равным 0.04 ± 0.01 (Байкова, Бобылев, 2012).

2.3.2. Способ II (прямой). Уравнение логарифмической спирали можно записать следующим образом (Юань, 1969):

$$\ln\left(\frac{R}{R_0}\right) = \mathrm{tg}\,i\,\left(\theta + \frac{\chi-\chi_0}{m} - \Omega_p t\right), \quad (18)$$

где t — время, прошедшее с момента рождения объекта. Из выражения (18) вытекает простое соотношение

$$\Omega_p = \frac{\theta - \theta_{\mathrm{birth}}}{t}, \quad (19)$$

где θ — текущее положение звезды, θ_{birth} — позиционный угол, соответствующий месту рождения звезды, а t — возраст звезды. Если в (10) возраст t выражен в млн лет, то умножая разность $\Delta\theta$, выраженную в радианах, на коэффициент 1023, получим Ω_p в км/с/кпк.

Такой метод оценивания Ω_p, следуя Диасу, Лепине (2005), называем прямым. Его применяют в тех случаях, когда известны пространственные скорости звезд, их индивидуальные возрасты, а иногда (например, Йоши, Малхотра, 2022) и принадлежность к конкретному спиральному рукаву. Для определения места рождения звезд θ_{birth} интегрируются их галактические орбиты назад во времени с использованием подходящей модели гравитационного потенциала Галактики.

В настоящей работе используем трехкомпонентную осесимметричную модель гравитационного потенциала Галактики, которая содержит вклады от таких подсистем, как центральный балдж, диск и гало темной материи. В этом случае $\Phi(R,z) = \Phi_b(r(R,z)) + \Phi_d(r(R,z)) + \Phi_h(r(R,z))$, где $\Phi_b(r(R,z))$ — вклад балджа, $\Phi_d(r(R,z))$ — вклад диска, и $\Phi_h(r(R,z))$ — вклад гало темной материи. Галактический балдж моделируется сферой Пламмера (Пламмер, 1911):

$$\Phi_b(r) = -\frac{GM_b}{\sqrt{r^2+b_b^2}}. \quad (20)$$

Диск моделируется сжатым сфероидом в форме, предложенной Миямото, Нагаи (1975):

$$\Phi_d(R,z) = -\frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + \left[a_d + \sqrt{z^2+b_d^2}\right]^2}}. \quad (21)$$

Для представления гало темной материи применяем модель Наварро, Френка, Уайта (Наварро и др., 1997):

$$\Phi_h(r) = -\frac{GM_h}{r}\ln\left(1+\frac{r}{a_h}\right), \quad (22)$$

где M_b, M_d, M_h — массы компонент, b_b, a_d, b_d, a_h — масштабные параметры компонент. В работах Байковой, Бобылева (2016, 2017) подход на основе соотношений (21)–(22) соответствует модели III.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Система условных уравнений вида (3)–(5) решается методом наименьших квадратов (МНК) с весами 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, $\sigma_{V_r}, \sigma_{V_l}, \sigma_{V_b}$ — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 при решении условных уравнений вида (3)–(5). В настоящей работе принято $S_0 = 10$ км/с. Система уравнений вида (3)–(5) решалась в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения РЗС с большими невязками.

Таблица 1. Оценки параметров галактического вращения

Параметры	<50 млн лет	<20 млн лет	20–50 млн лет
$N_\star$	2494	1332	1162
$N_\star$ с лучевыми скоростями	1722	984	738
$U_\odot$, км/с	8.43 ± 0.24	7.79 ± 0.30	9.22 ± 0.36
$V_\odot$, км/с	8.70 ± 0.27	7.99 ± 0.34	9.65 ± 0.41
$W_\odot$, км/с	7.88 ± 0.22	7.89 ± 0.29	7.85 ± 0.34
Ω_0, км/с/кпк	29.18 ± 0.13	29.43 ± 0.17	29.00 ± 0.18
Ω_0', км/с/кпк^2	-3.854 ± 0.030	-3.861 ± 0.041	-3.885 ± 0.044
Ω_0'', км/с/кпк^3	0.590 ± 0.012	0.592 ± 0.016	0.605 ± 0.017
σ_R, км/с	13.55	12.54	14.66
f_R, км/с	4.7 ± 0.2	5.5 ± 0.4	5.8 ± 0.4
f_θ, км/с	3.7 ± 0.2	4.2 ± 0.4	6.0 ± 0.4

Примечание. $N_\star$ — количество использованных звезд, указанные здесь оценки скоростей f_R и f_θ найдены в результате спектрального анализа остаточных скоростей V_R и $\Delta V_{\rm circ}$.

3.1. Метод I

В табл. 1 даны оценки параметров галактического вращения, найденные в результате МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5) с шестью неизвестными, $U_\odot$, $V_\odot$, $W_\odot$, Ω_0, Ω_0' и Ω_0''.

Для трех указанных в таблице выборок были заранее вычислены соответствующие значения дисперсии их скоростей в радиальном (вдоль оси R) направлении σ_R, которые требуются для корректного применения этого метода.

Указанные в таблице оценки скоростей возмущений f_R и f_θ были найдены в результате спектрального анализа остаточных скоростей V_R и $\Delta V_{\rm circ}$. В частности, по выборке РЗС моложе 50 млн лет были также получены следующие оценки: $\lambda_R = 2.4 \pm 0.2$ кпк и $\lambda_\theta = 2.1 \pm 0.2$ кпк, $(\chi_\odot)_R = -154 \pm 11^\circ$ и $(\chi_\odot)_\theta = -129 \pm 10^\circ$. Спектральный анализ вертикальных скоростей этой выборки показал наличие сильнейшего всплеска в околосолнечной окрестности радиусом около 0.5 кпк. Периодические возмущения в вертикальных скоростях РЗС, связанные со спиральной волной плотности, также присутствуют, но имеют очень малую амплитуду. Так, по вертикальным скоростям мы получили следующие оценки: $f_W = 1.1 \pm 0.4$ км/с, $\lambda_W = 2.2 \pm 0.2$ кпк и $(\chi_\odot)_W = -135 \pm 12^\circ$. Результаты спектрального анализа выборки РЗС моложе 50 млн лет отражены на рис. 2–5.

Применение к выборке РЗС моложе 50 млн лет метода, описанного в подпункте 2.3.1, дало следующее значение угловой скорости вращения спирального узора:

$$\Omega_p = 24.26 \pm 0.52 \text{ км/с/кпк}. \qquad (23)$$

Значение радиуса коротации можно вычислить на основе соотношения, полученного путем приравнивания линейной скорости вращения Галактики и найденной скорости вращения спирального узора:

$$R_{\rm cor} = R_0 + (\Omega_p - \Omega_0)/\Omega_0'. \qquad (24)$$

Со значениями Ω_0 и Ω_0', взятыми из первого столбца табл. 1, находим

$$R_{\rm cor} = 9.38 \pm 0.13 \text{ кпк} = (1.16 \pm 0.02) R_0. \qquad (25)$$

3.2. Метод II

Здесь для оценки Ω_p применяем подход, сходный с первым способом (подпункт 2.3.1). Отличие

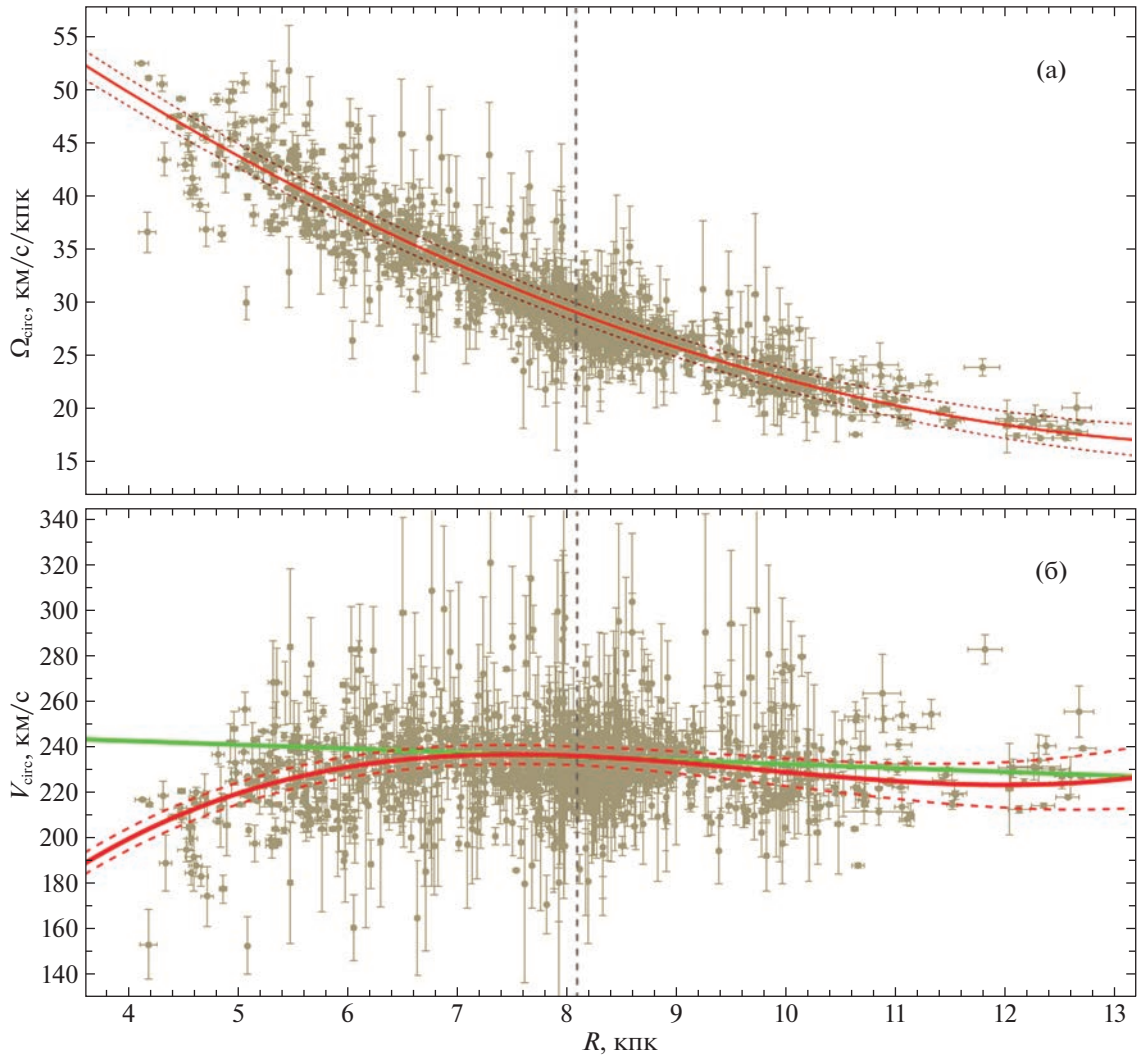

Рис. 2. Угловые Ω_{circ} (а) и линейные V_{circ} (б) скорости кругового вращения выборки РЗС моложе 50 млн лет в зависимости от расстояния R, на каждой панели дана найденная кривая вращения Галактики с указанием границ доверительных областей, соответствующих уровню 1σ, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца, зеленой линией на панели (б) дана кривая вращения из работы Эйлерса и др. (2019).

заключается в том, что оценки скоростей возмущений f_R и f_θ находим в результате МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5). Так, по выборке РЗС моложе 50 млн лет были получены следующие оценки:

$$\begin{gathered} U_\odot = 7.95 \pm 0.26 \text{ км/с}, \\ V_\odot = 9.85 \pm 0.28 \text{ км/с}, \\ W_\odot = 7.39 \pm 0.22 \text{ км/с}, \\ \Omega_0 = 27.46 \pm 0.15 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega_0' = -3.800 \pm 0.028 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega_0'' = 0.640 \pm 0.014 \text{ км/с/кпк}^3, \\ i = -11.8 \pm 0.7^\circ, \\ \chi_\odot = -143 \pm 4^\circ, \\ f_R = -3.32 \pm 0.22 \text{ км/с}, \\ f_\theta = -2.48 \pm 0.16 \text{ км/с} \end{gathered} \tag{26}$$

при фиксированном значении $R_0 = 8.1 \pm 0.1$. В результате реализации алгоритма, описанного в подпункте 2.3.1, получено

$$\Omega_p = 23.45 \pm 0.53 \text{ км/с/кпк}. \tag{27}$$

Со значениями Ω_0 и Ω_0', взятыми из решения (26), находим

$$R_{cor} = 9.16 \pm 0.14 \text{ кпк} = (1.13 \pm 0.02) R_0. \tag{28}$$

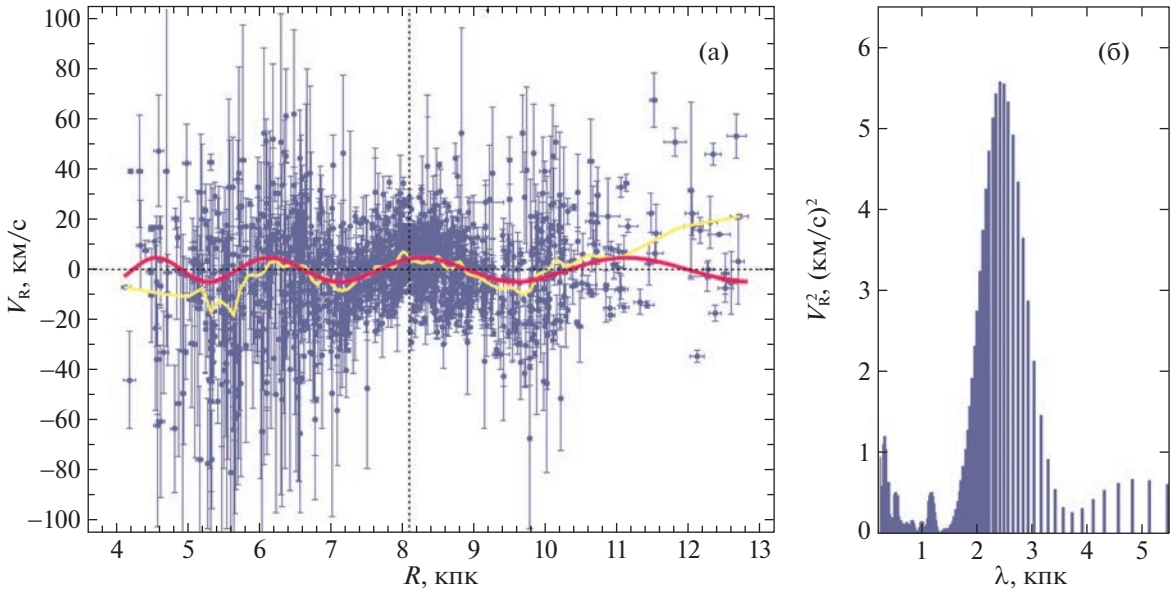

Рис. 3. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

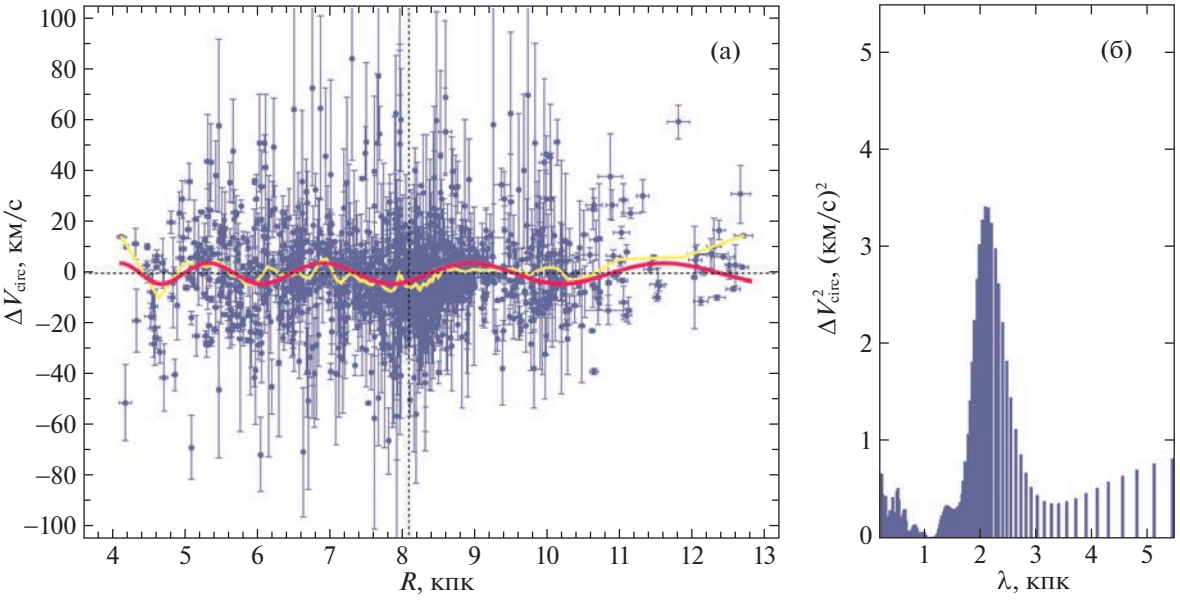

Рис. 4. Остаточные скорости вращения $\Delta V_{\rm circ}$ в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

3.3. Метод III

Здесь представляем результаты применения прямого метода, описанного в подпункте 2.3.2. На основе интегрирования галактических орбит РЗС моложе 50 млн лет найдено

$$\Omega_p = 28.9 \pm 2.8 \text{ км/с/кпк}. \qquad (29)$$

Для уменьшения ошибок скоростей далеких РЗС была использована выборка из примерно

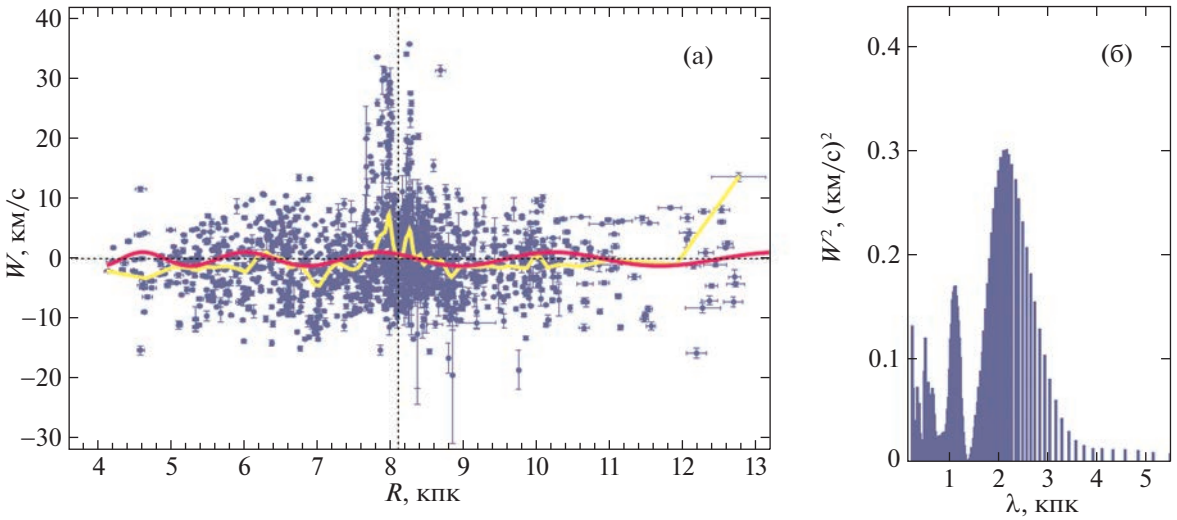

Рис. 5. Скорости W в зависимости от расстояния R выборки РЗС моложе 50 млн лет (а) и их спектр мощности (б). Усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа, — красная линия.

1500 РЗС, расположенных в околосолнечной окрестности радиусом 3 кпк.

Со значениями Ω_0 и Ω'_0, взятыми из первого столбца табл. 1, находим

$$R_{\rm cor} = 8.17 \pm 0.73 \text{ кпк} = (1.01 \pm 0.09) R_0. \quad (30)$$

4. ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Бобылева, Байковой (2022) была проанализирована выборка из около 150 мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами РСДБ-методом. Использовались мазеры, относительные ошибки измерения тригонометрических параллаксов которых не превышали 10%. По ним были найдены компоненты групповой скорости $(U,V,W)_\odot = (9.15, 12.81, 8.93) \pm$ $\pm$ (0.86, 0.86, 0.75) км/с и следующие параметры угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 =$ $= 30.18 \pm 0.38$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.368 \pm$ ± 0.077 км/с/кпк^2 и $\Omega''_0 = 0.845 \pm 0.037$ км/с/кпк^3, где линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 составила $244.4 \pm$ $\pm$ 4.3 км/с (для принятого $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк).

Как видно из сравнения с результатами, представленными в табл. 1, за счет большого количества молодых РЗС и первоклассных измерительных данных параметры вращения Галактики по ним определяются с маленькими ошибками. В частности, круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики, найденная по выборке РЗС моложе 50 млн лет, составляет $V_0 = 236.4 \pm 3.1$ км/с (для $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). А построенная кривая галактического вращения находится в прекрасном согласии с современными результатами других авторов (рис. 2б).

Найденные в настоящей работе двумя способами параметры галактической спиральной волны плотности f_R и f_θ находятся в хорошем согласии с оценками, полученными различными авторами по наиболее важным трассерам спиральной структуры. Обзор таких оценок можно найти, например, в работе Бобылева, Байковой (2022). В частности, по данным о 134 мазерах Бобылев, Байкова (2022) нашли: $f_R = 8.1 \pm 1.4$ км/с, $f_\theta = 6.1 \pm 1.7$ км/с и $f_W = 5.2 \pm 1.5$ км/с.

Отметим, что волна в вертикальных скоростях W с небольшой амплитудой f_W хорошо просматривается только в скоростях самых молодых объектов, таких как мазерные источники (Бобылев, Байкова, 2015; Расторгуев и др., 2017). Малоамплитудную волну видим на рис. 5. Это, по нашему мнению, говорит о высоком качестве измерительных данных РЗС. В то же время на рис. 5 можем видеть необычный всплеск положительных вертикальных скоростей в относительно небольшой околосолнечной окрестности. Этот интересный эффект, возможно связанный со структурой пояса Гулда, требует отдельного изучения.

В работе Бобылева, Байковой (2023) были проанализированы три звездные выборки — галактические мазеры с измеренными тригонометрическим параллаксами, OB2-звезды и цефеиды. По этим данным были получены следующие оценки Ω_p: 24.61 ± 2.06 км/с/кпк, 24.71 ± 1.29 км/с/кпк и

25.98 ± 1.37 км/с/кпк по выборке мазеров, OB2-звезд и цефеидам соответственно. Значения радиуса коротации для этих трех выборок составили $R_{\rm cor}/R_0$: 1.16 ± 0.09, 1.15 ± 0.06 и 1.09 ± 0.06.

В работе Бобылева, Байковой (2023) также дана таблица с семнадцатью оценками Ω_p, полученными различными авторами тремя методами по молодым объектам. Было показано, что оценки Ω_p, полученные различными авторами в последнее время, лежат в достаточно широком интервале Ω_p : 18–32 км/с/кпк.

Отметим, что значения Ω_p, полученные нами в настоящей работе методом I и II по трем выборкам, находятся в очень хорошем согласии как между собой, так и с оценками Бобылева, Байковой (2023).

С бóльшей неопределенностью получена оценка (29) методом III. И в то же время эта оценка не противоречит результатам применения метода III другими авторами, что можно видеть из табл. 2 работы Бобылева, Байковой (2023). Отметим, например, результат применения метода III к анализу РЗС в работе Диаса и др. (2019): $\Omega_p = 28.2 \pm$ $\pm$ 2.1 км/с/кпк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основой для кинематического анализа нам послужили молодые РЗС из каталога Хант, Рефферт (2023). Средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний были вычислены в работе этих авторов по данным каталога Gaia DR3. Важным достоинством каталога Хант, Рефферт (2023) является наличие лучевых скоростей для большого процента РЗС, что позволило выполнить полноценный анализ пространственных скоростей этих скоплений.

Вначале с использованием 2494 РЗС моложе 50 млн лет была получена оценка параметров вращения Галактики. В частности, найдены компоненты скорости Солнца $(U, V, W)_\odot =$ $= (8.43, 8.70, 7.88) \pm (0.24, 0.27, 0.22)$ км/с и следующие члены разложения угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.18 \pm 0.12$ км/с/кпк, $\Omega_0' = -3.854 \pm 0.030$ км/с/кпк^2 и $\Omega_0'' = 0.590 \pm$ ± 0.012 км/с/кпк^3. Здесь круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 236.4 \pm 3.1$ км/с для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

Для оценки Ω_p применены три способа, которые основаны на линейной теории спиральной волны плотности Лина и Шу. На основе первого способа, наиболее надежного с нашей точки зрения, с использованием скоростей возмущения f_R и f_θ, найденным в результате спектрального анализа радиальных V_R и остаточных скоростей вращения $\Delta V_{\rm circ}$, получена оценка $\Omega_p =$ $= 24.26 \pm 0.52$ км/с/кпк. Здесь скорости возмущения $f_R = 4.72 \pm 0.24$ км/с и $f_\theta = 3.69 \pm 0.20$ км/с были оценены по пространственным скоростям 1722 РЗС моложе 50 млн лет.

Во втором способе скорости $f_R = 3.32 \pm$ ± 0.22 км/с и $f_\theta = 2.48 \pm 0.16$ км/с были найдены из решения основных кинематических уравнений совместно с параметрами вращения Галактики. Здесь была получена оценка $\Omega_p = 23.45 \pm$ ± 0.53 км/с/кпк.

Третьим способом, основанным на анализе позиционных углов 2494 РЗС моложе 50 млн лет на момент их рождения $\theta_{\rm birth}$, найдено $\Omega_p = 28.9 \pm$ ± 2.8 км/с/кпк.

Отмечен необычный всплеск положительных вертикальных скоростей W в локальной околосолнечной окрестности радиусом $\sim$0.5 кпк. Этот эффект, возможно связанный не со спиральной структурой, а с особенностями пояса Гулда, требует отдельного изучения.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амарал, Лепине (L.H. Amaral and J.R.D. Lépine), MNRAS **286**, 885 (1997).
2. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Astron. Lett. **38**, 549 (2012)].
3. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн., **42**, 625 (2016) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Astron. Lett. **42**, 567 (2016)].
4. A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, Open Astronomy **26**, 72 (2017).
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Степанищев А.С., Письма в Астрон. журн. **34**, 570 (2008) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. **34**, 515 (2008)].
6. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **437**, 1549 (2014).
7. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **447**, L50 (2015).
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 151 (2019), [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **45**, 109 (2019)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Rep. **65**, 498 (2021)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 492 (2022) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **48**, 376 (2022)].

11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **49**, 187 (2023), [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, Astron. Lett. **49**, 110 (2023)].
12. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, 1 (2018).
13. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevely, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **649**, 1 (2021).
14. Валенари и др. (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, F. Arenou, et al.), arXiv: 2208.0021 (2022).
15. Глушкова и др. (E.V. Glushkova, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, and A.S. Rastorguev), Astron. Astrophys. **329**, 514 (1998).
16. Диас и др. (W.S. Dias, J.R.D. Lépine, and B.S. Alessi), Astron. Astrophys. **376**, 44 (2001).
17. Диас, Лепине (W.S. Dias and J.R.D. Lépine), Astrophys. J. **629**, 825 (2005).
18. Диас и др. (W.S. Dias, M. Assafin, V. Flório, B.S. Alessi, and V. Libero), Astron. Astrophys. **446**, 949 (2006).
19. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, J.R.D. Lépine, and D.A. Barros), MNRAS **486**, 5726 (2019).
20. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, J.R.D. Lepine, G. Carraro, E. Paunzen, B. Alessi, and L. Villela), MNRAS **504**, 356 (2021).
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. Йоши, Малхотра (Y.C. Joshi and S. Malhotra), arXiv: 2212.09384 (2022).
23. Камарго и др. (D. Camargo, C. Bonatto, and E. Bica), MNRAS **450**, 4150 (2015).
24. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, F. Anders, A. Castro-Ginard, C. Jordi, M. Romero-Gomez, C. Soubiran, L. Casamiquela, Y. Tarricq, et al.), Astron. Astrophys. **640**, A1 (2020).
25. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), Astrophys. J. **870**, 32 (2019).
26. Лепине и др. (J.R.D. Lépine, W.S. Dias, and Yu. Mishurov), MNRAS **386**, 2081 (2008).
27. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), Astrophys. J. **140**, 646 (1964).
28. Локтин А.В., Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. **74**, 289 (2019) [A.V. Loktin, M.E. Popova, Astrophys. Bull. **74**, 270 (2019)].
29. Миямото, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), Publ. Astron. Soc. Japan **27**, 533 (1975).
30. Монтейро и др. (H. Monteiro, D.A. Barros, W.S. Dias, and J.R.D. Lépine), Front. Astron. Space. Sci. **8**, 62 (2021).
31. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), Astrophys. J. **490**, 493 (1997).
32. Наоц, Шавив (S. Naoz and N.J. Shaviv), New Astron. **12**, 410 (2007).
33. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), Astron. Astrophys. **445**, 545 (2006).
34. Пламмер (H.C. Plummer), MNRAS **71**, 460 (1911).
35. Попова М.Э., Локтин А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 743 (2005) [M.E. Popova, A.V. Loktin, Astron. Lett. **31**, 663 (2005)].
36. Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. **78**, 139 (2023) [M.E. Popova, Astrophys. Bull. **78**, 134 (2023)].
37. 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).
38. Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюлл. **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., Astrophys. Bull. **72**, 122 (2017)].
39. Рольфс К., *Лекции по теории волн плотности* (М.: Мир, 1980) [K. Rohlfs, *Lectures on density wave theory*, Springer-Verlag, Berlin, 1977; Mir, Moscow, 1980].
40. Таррик и др. (Y. Tarricq, C. Soubiran, L. Casamiquela, T. Cantat-Gaudin, L. Chemin, F. Anders, T. Antoja, M. Romero-Gomez, et al.), Astron. Astrophys. **647**, A19 (2021).
41. Фернандес и др. (D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra), Astron. Astrophys. **480**, 735 (2008).
42. Хант, Рефферт (E.L. Hunt and S. Reffert), Astron. Astrophys. **673**, A114 (2023).
43. Хао и др. (C.J. Hao, Y. Xu, L.G. Hou, S.B. Bian, J.J. Li, Z.Y. Wu, Z.H. He, Y.J. Li, and D.J. Liu), Astron. Astrophys. **652**, A102 (2021).
44. Хао и др. (C.J. Hao, Y. Xu, Z.Y. Wu, Z.H. Lin, D.J. Liu, and Y.J. Li), Astron. Astrophys. **660**, A4 (2022).
45. Эйлерс и др. (A.-C. Eilers, D.W. Hogg, H.-W. Rix, and M.K. Ness), Astrophys. J. **871**, 120 (2019).
46. Юань (C. Yuan), Astrophys. J. **158**, 889 (1969).
47. Юнкейра и др. (T.C. Junqueira, C. Chiappini, J.R.D. Lépine, I. Minchev, and B.X. Santiago), MNRAS **449**, 2336 (2015).