

КИНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ ПО МОЛОДЫМ РАССЕЯННЫМ ЗВЕЗДНЫМ СКОПЛЕНИЯМ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА GAIA EDR3

© 2022 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

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

Поступила в редакцию 29.10.2021 г.

После доработки 29.10.2021 г.; принята к публикации 03.12.2021 г.

Проведен анализ кинематики рассеянных звездных скоплений (РЗС) с собственными движениями и расстояниями, вычисленными Хао и др. по данным каталога Gaia EDR3. Для ряда скоплений из этого списка известны средние значения лучевых скоростей. Показано, что параметры вращения Галактики, определенные по выборкам РЗС различного возраста, находятся в хорошем согласии между собой. Наиболее интересные результаты получены по выборке 967 наиболее молодых РЗС со средним возрастом 18 млн лет. В частности, только с использованием их собственных движений и расстояний найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.01 \pm 0.15$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.674 \pm 0.040$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.565 \pm 0.023$ км/с/кпк³. Круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики здесь составляет $V_0 = 226.9 \pm 3.1$ км/с для принятого расстояния Солнца от галактического центра $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. Параметры спиральной волны плотности определены по пространственным скоростям 233 молодых скоплений. Амплитуды тангенциальных и радиальных скоростей возмущений, вызванных волной плотности, составили $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с и $f_\theta = 4.6 \pm 1.2$ км/с соответственно, длина волны возмущений $\lambda_R = 3.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.6$ кпк для принятой модели четырехрукавной структуры. Фаза Солнца в спиральной волне оказалась равной $\chi_\odot = -100^\circ \pm 11^\circ$.

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

DOI: 10.31857/S0320010821120019

ВВЕДЕНИЕ

Рассеянные звездные скопления (РЗС) имеют важное значение для изучения структуры и кинематики Галактики. Их, в частности, используют для оценки параметров кривой вращения Галактики (Глушкова и др., 1998; Заболотских и др., 2002; Локтин, Бешенов, 2003; Пискунов и др., 2006; Локтин, Попова, 2019), геометрических и кинематических характеристик спиральной волны плотности (Амарал, Лепине, 1997; Попова, Локтин, 2005; Локтин, Попова, 2007; 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) и других их структурных и кинематических свойств (Бабиссо и др., 2018; Кун и др., 2018; Таррик и др., 2021; Монтейро и др., 2021).

Постоянно возрастает количество открытых и изученных РЗС (Диас и др., 2001; 2006; 2021; Харченко и др., 2005; 2007; 2013; Шольц и др., 2015; Кантат-Гудин и др., 2018; Хао и др., 2021).

Улучшается точность определения средних значений их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний.

Точность кинематических параметров РЗС имеет важное значение для решения самых разнообразных кинематических задач. Массовые расстояния до РЗС обычно оцениваются с помощью диаграммы Герцшпрунга–Рассела по фотометрическим данным, либо с использованием других не прямых методов (без тригонометрических параллаксов). Реализация космического эксперимента Gaia (Прусти и др., 2016) позволила не только вычислять высокоточные средние значения собственных движений (Кантат-Гудин и др., 2018) и лучевых скоростей РЗС, но и их средние тригонометрические параллаксы (Кантат-Гудин и др., 2020; Хао и др., 2021).

В настоящее время опубликована версия каталога Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2021), в которой по сравнению с предыдущей версией, Gaia DR2 (Браун и др., 2018), уточнены примерно на 30% значения тригонометрических параллаксов и собственных движений для около

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

1.5 млрд звезд. В каталоге Gaia EDR3 тригонометрические параллаксы для примерно 500 млн звезд измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги (мсд), т.е. примерно треть звезд с измеренными параллаксами. Собственные движения около половины звезд каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%.

В параллаксах каталога Gaia EDR3, по-видимому, сохранился небольшой систематический сдвиг по отношению к инерциальной системе координат (Рен и др., 2021; Маис-Апельянис, 2021). Впервые такой сдвиг был выявлен в параллаксах Gaia DR2 с величиной $\Delta\pi = -0.029$ мсд (Линдгрен и др., 2018). Такую поправку необходимо прибавлять к измеренным параллаксам, поэтому истинные расстояния до звезд должны слегка уменьшиться.

Для звезд со звездными величинами $G < 15^m$ случайные ошибки измерения собственных движений лежат в интервале 0.02–0.04 мсд/год (Браун и др., 2021), и они довольно сильно увеличиваются у более слабых звезд. Новых измерений лучевых скоростей в каталоге Gaia EDR3 нет. Таким образом, данные о лучевых скоростях более 7 млн звезд берутся из версии Gaia DR2.

Целью настоящей работы является определение параметров вращения Галактики и параметров спиральной волны плотности на основе новейших данных о РЗС. Для этого мы используем средние значения собственных движений и параллаксов РЗС, которые вычислены в работе Хао и др. (2021) по данным каталога Gaia EDR3, для ряда скоплений имеются также средние значения лучевых скоростей.

МЕТОД

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую 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 коэффициентом размерности, 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:

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (1)$$

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_{circ} , направленную в направлении вращения Галактики, можем найти на основе следующих соотношений:

$$\begin{aligned} V_{\text{circ}} &= U \sin \theta + (V_0 + V) \cos \theta, \\ V_R &= -U \cos \theta + (V_0 + V) \sin \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где позиционный угол θ удовлетворяет соотношению $\text{tg } \theta = y/(R_0 - x)$, 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 окосолнечном 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 ΔV_{circ} .

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

$$\begin{aligned} V_r &= -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l - \\ &- W_{\odot} \sin b + R_0(R - R_0) \sin l \cos b \Omega'_0 + \\ &+ 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} V_l &= U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r\Omega_0 \cos b + \\ &+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega'_0 + \\ &+ 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b) \Omega''_0, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V_b &= U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b - \\ &- W_{\odot} \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 - \\ &- 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0, \end{aligned} \quad (5)$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0r \cos b \cos l + R_0^2$. 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, $V_0 = |R_0\Omega_0|$. Скорости V_R и ΔV_{circ} должны быть освобождены от пекулярной скорости Солнца $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$. 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.

Влияние спиральной волны плотности в радиальных V_R и остаточных тангенциальных скоростях ΔV_{circ} является периодическим с амплитудой порядка 6–10 км/с. Согласно линейной теории волн плотности (Линь, Шу, 1964), оно 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. Периодичности, связанные со спиральной волной плотности проявляются также и в вертикальных скоростях W молодых галактических объектов (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

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

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

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

ДАННЫЕ

В настоящей работе основным источником данных послужила работа Хао и др. (2021), в которой средние собственные движения и средние параллаксы PC3 были вычислены по данным каталога Gaia EDR3. Оценки возраста собраны этими авторами из различных источников. В каталоге содержатся данные о 3794 PC3, поэтому на сегодняшний день он является наиболее обширной кинематической базой о рассеянных звездных скоплениях Галактики.

В каталоге Хао и др. (2021) даны именно параллаксы π , через которые в дальнейшем мы вычисляем расстояния r по формуле $r = 1/\pi$. Относительные ошибки определения средних значений параллаксов PC3 во всем каталоге малы, и в среднем составляют около 10%. Единичные случаи с ошибками параллаксов более 30% и такие PC3 в настоящей работе не используются.

На рис. 1 дано распределение PC3 трех выборок различного возраста 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.

Выборка PC3 моложе 60 млн лет содержит всего 967 членов со средним возрастом 18 млн лет. На рис. 1а показано распределение 233 PC3, для которых имеются лучевые скорости. По пространственным скоростям таких скоплений проводим спектральный анализ с целью определения параметров спиральной волны плотности.

Выборка PC3 с возрастными в интервале 60–300 млн лет содержит всего 863 члена. Здесь средний возраст скоплений составляет 163 млн лет. На рис. 1б показано распределение 398 PC3, для которых имеются лучевые скорости.

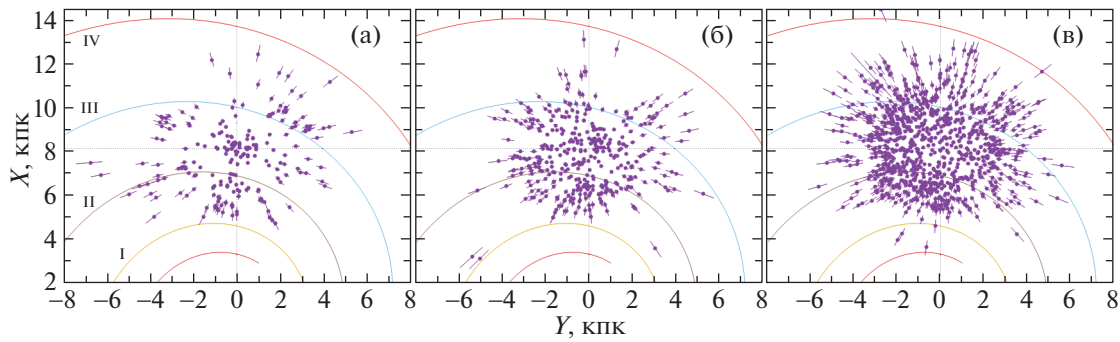


Рис. 1. Распределение на галактической плоскости XY РЗС моложе 60 млн лет (а), с возрастными в интервале 60–300 млн лет (б) и старше 300 млн лет (в), показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, согласно работе Бобылева, Байковой (2014).

Выборка РЗС с возрастными более 300 млн лет содержит всего 1794 члена. Средний возраст скоплений в этой выборке составляет 1.1 млрд лет. На рис. 1в показаны 1000 РЗС с лучевыми скоростями.

Отметим, что распределения всех РЗС в проекции на плоскость XY с разбивкой на четыре возрастные интервала даны на рис. 1 в работе Хао и др. (2021). Там отлично видно, что РЗС с возрастными менее 20 млн лет, а также в интервале 20–200 млн лет имеют сильную концентрацию к спиральным рукавам.

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, σ_{V_r} , σ_{V_l} , σ_{V_b} — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей. Значение S_0 сопоставимо со среднеквадратической невязкой σ_0 (ошибка единицы веса) при решении условных уравнений вида (3)–(5). При анализе выборки молодых РЗС мы приняли $S_0 = 7$ –8 км/с, а для выборки более старых РЗС — $S_0 = 11$ –14 км/с. Система уравнений вида (3)–(5) решалась в несколько итераций с применением критерия 3σ для исключения РЗС с большими невязками.

Способ I

Первый способ заключается в поиске решения только по собственным движениям РЗС. В этом случае решается система из двух условных вида (4)–(5).

Найденные параметры галактического вращения для трех выборок РЗС различного возраста

даны в табл. 1. Для каждой выборки вычислены средний возраст \bar{t} и среднее значение координаты \bar{z} (отражает эффект возвышения Солнца над плоскостью Галактики). Отметим, что найденные величины \bar{z} находятся в очень хорошем согласии со значением $\bar{z} = -23 \pm 3$ пк, найденным из анализа РЗС с данными из каталога Gaia DR2 в работе Кантат-Гудин и др. (2020).

В нижней части таблицы даны значения постоянных Оорта $A = 0.5\Omega'_0 R_0$ и $B = A - \Omega_0$, вычисленные с использованием полученных значений Ω_0 и Ω'_0 . Дана также линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии $V_0 = R_0 \Omega_0$ для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

По всей выборке из 3624 РЗС этим методом найдены следующие компоненты скорости $(U, V, W)_\odot = (7.89, 14.35, 6.97) \pm (0.22, 0.29, 0.16)$ км/с и параметры угловой скорости галактического вращения:

$$\Omega_0 = 27.37 \pm 0.10 \text{ км/с/кпк}, \quad (12)$$

$$\Omega'_0 = -3.510 \pm 0.027 \text{ км/с/кпк}^2,$$

$$\Omega''_0 = 0.534 \pm 0.014 \text{ км/с/кпк}^3.$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 9.4$ км/с. Линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет $V_0 = 221.7 \pm 2.9$ км/с, а постоянные Оорта $A = 14.21 \pm 0.11$ км/с/кпк и $B = -13.15 \pm \pm 0.15$ км/кпк.

Способ II

При этом подходе мы используем все возможности имеющихся данных. Скопления с собственными движениями, лучевыми скоростями и расстояниями дают все три уравнения вида (3)–(5), а скопления, для которых имеются только собственные движения, дают лишь два уравнения (4) и (5). Такую систему уравнений решаем совместно.

Таблица 1. Параметры вращения Галактики, найденные по РЗС различных возрастов только по их собственным движениям (уравнения (4)–(5)), N_* — количество использованных скоплений, \bar{t} — средний возраст выборки

Параметры	<60 млн лет	60–300 млн лет	>300 млн лет
N_*	967	863	1794
\bar{t} , млн лет	18	163	1100
\bar{z} , пк	-20 ± 4	-19 ± 8	-24 ± 9
U_\odot , км/с	7.34 ± 0.31	7.64 ± 0.44	8.64 ± 0.35
V_\odot , км/с	10.61 ± 0.45	13.07 ± 0.61	17.67 ± 0.46
W_\odot , км/с	7.45 ± 0.23	7.33 ± 0.31	6.55 ± 0.24
Ω_0 , км/с/кпк	28.01 ± 0.15	26.96 ± 0.21	27.06 ± 0.16
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.674 ± 0.040	-3.629 ± 0.056	-3.284 ± 0.043
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.565 ± 0.023	0.622 ± 0.034	0.463 ± 0.021
σ_0 , км/с	7.0	9.1	10.3
A , км/с/кпк	14.88 ± 0.16	14.70 ± 0.23	13.30 ± 0.17
B , км/с/кпк	-13.13 ± 0.22	-12.26 ± 0.31	-13.76 ± 0.24
V_0 , км/с	226.9 ± 3.1	218.4 ± 3.2	219.2 ± 3.0

Таблица 2. Параметры вращения Галактики, найденные по РЗС различных возрастов в результате совместного МНК-решения системы из трех уравнений (3)–(5)), N_* — количество использованных скоплений, N_{RV} — количество РЗС с лучевыми скоростями

Параметры	<60 млн лет	60–300 млн лет	>300 млн лет
N_*	967	863	1794
N_{RV}	233	398	1000
U_\odot , км/с	7.52 ± 0.33	8.57 ± 0.43	9.70 ± 0.38
V_\odot , км/с	12.43 ± 0.45	13.58 ± 0.56	19.80 ± 0.46
W_\odot , км/с	7.53 ± 0.27	7.37 ± 0.37	6.78 ± 0.33
Ω_0 , км/с/кпк	28.07 ± 0.16	27.34 ± 0.22	27.62 ± 0.19
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.713 ± 0.041	-3.782 ± 0.053	-3.486 ± 0.045
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.613 ± 0.025	0.674 ± 0.036	0.548 ± 0.024
σ_0 , км/с	8.2	10.9	13.9
A , км/с/кпк	15.04 ± 0.17	15.32 ± 0.21	14.12 ± 0.18
B , км/с/кпк	-13.03 ± 0.23	-12.02 ± 0.31	-13.50 ± 0.26
V_0 , км/с	227.3 ± 3.1	221.5 ± 3.3	223.7 ± 3.2

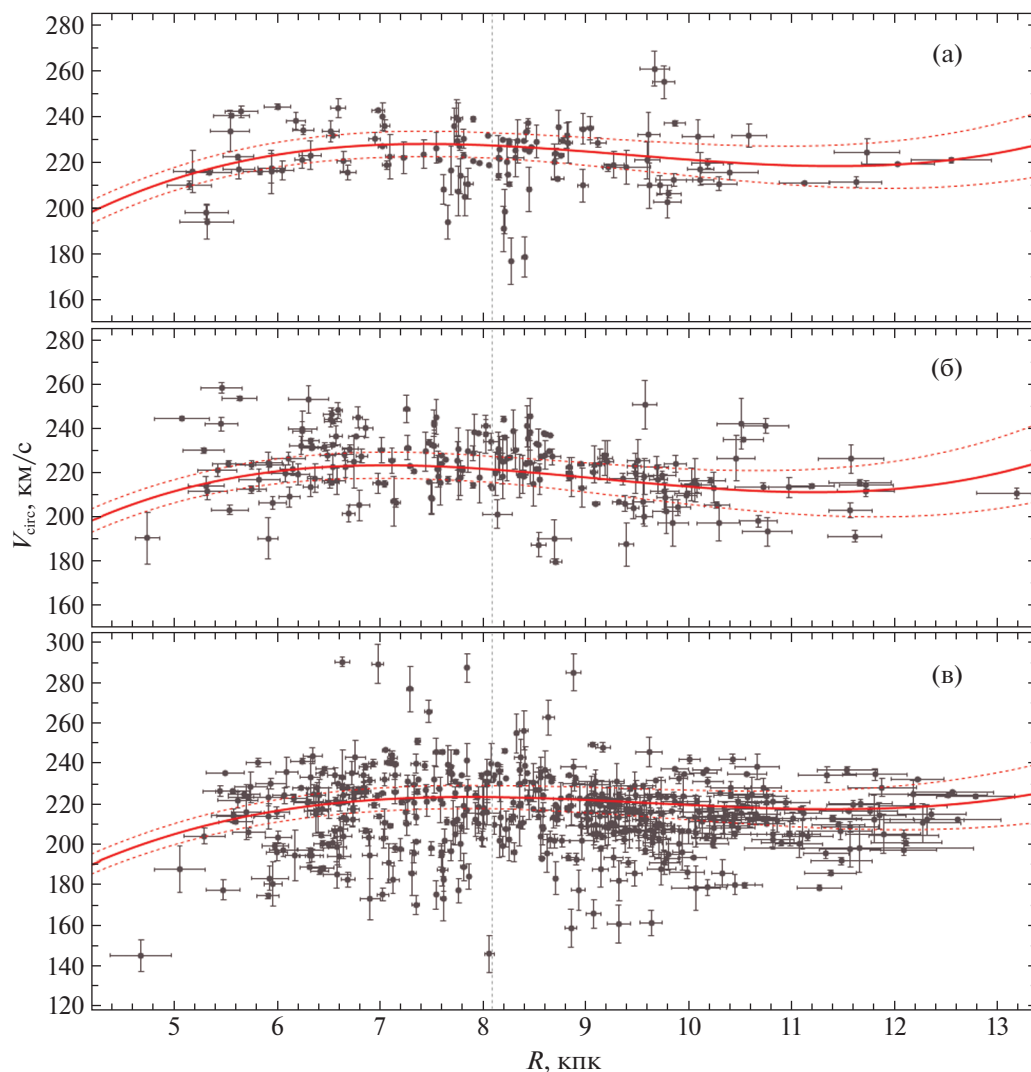


Рис. 2. Круговые скорости вращения V_{circ} в зависимости от расстояния R самых молодых РЗС (а), с возрастными интервалами 60–300 млн лет (б) и старше 300 млн лет (в), для каждой выборки показана найденная по этим РЗС кривая вращения Галактики с указанием границ доверительных областей, соответствующих уровню 1σ .

Найденные этим способом параметры галактического вращения для трех выборок РЗС различного возраста даны в табл. 2. Указано количество использованных в решении РЗС с лучевыми скоростями N_{RV} . При этом не были использованы РЗС с ошибками их средних лучевых скоростей более 10 км/с.

В результате использования данных обо всех 3624 РЗС найдены $(U, V, W)_{\odot} = (8.73, 16.03, 7.10) \pm (0.24, 0.30, 0.20)$ км/с и

$$\begin{aligned} \Omega_0 &= 27.79 \pm 0.12 \text{ км/с/кпк}, & (13) \\ \Omega'_0 &= -3.669 \pm 0.028 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.606 \pm 0.016 \text{ км/с/кпк}^3. \end{aligned}$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 12.0$ км/с. Линейная скорость вра-

щения Галактики на околосолнечном расстоянии составляет $V_0 = 225.1 \pm 2.9$ км/с, а постоянные Оорта $A = 14.86 \pm 0.11$ км/с/кпк и $B = -12.93 \pm 0.16$ км/кпк.

Как можно видеть из сравнения параметров (12) и (13), а также табл. 1 и 2, привлечение лучевых скоростей приводит к росту дисперсии оценок.

На рис. 2 даны круговые скорости вращения V_{circ} в зависимости от расстояния R для трех выборок РЗС различного возраста. Для построения кривой вращения для каждой выборки были взяты параметры из соответствующего столбца табл. 2. Видно хорошее согласие между этими кривыми вращения Галактики. Поэтому любую из них можно использовать для формирования остаточных скоростей ΔV_{circ} для дальнейшего спектрального анализа.

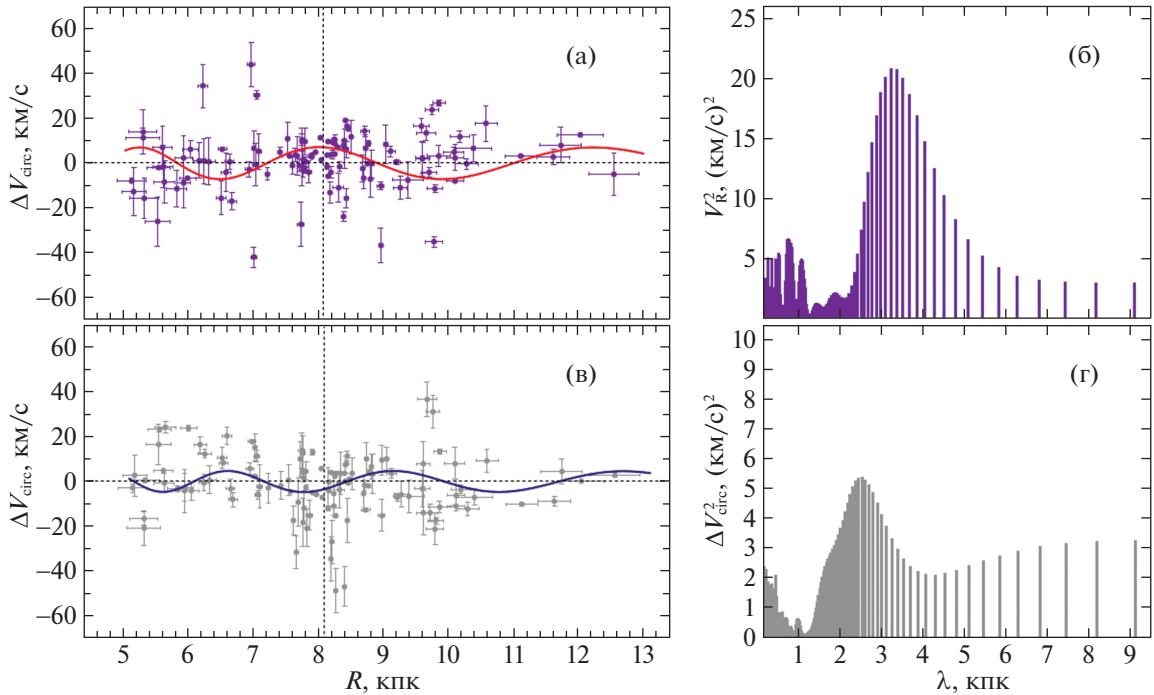


Рис. 3. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R самых молодых РЗС (а), спектр мощности этой выборки (б), остаточные скорости вращения ΔV_{circ} самых молодых РЗС (в) и их спектр мощности (г).

Отметим, что наилучшей мы считаем кривую вращения Галактики, полученную с наименьшей ошибкой единицы веса $\sigma_0 = 7$ км/с. Параметры этой кривой вращения, найденные способом I только по собственным движениям наиболее молодых РЗС, даны в первом столбце табл. 1.

Спектральный анализ

В начале были определены параметры спиральной волны плотности по выборке наиболее молодых РЗС с возрастaми менее 60 млн лет (со средним возрастaм 18 млн лет). Для этого были использованы 233 РЗС, для которых имеются лучевые скорости. Спектральный анализ их радиальных и остаточных тангенциальных скоростей показал принципиальное согласие в значениях длины волны и скоростей возмущений, найденных независимо по каждому виду скоростей.

Результаты спектрального анализа РЗС этой выборки отражены на рис. 3. На рисунке даны радиальные скорости V_R и остаточные скорости вращения ΔV_{circ} в зависимости от расстояния R и их спектры мощности.

По 233 РЗС этой выборки найдены следующие значения длины волны $\lambda_R = 3.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.6$ кпк. Для модели четырехрукавной спиральной структуры ($m = 4$ и принятому R_0) этим значениям соответствует угол закрутки $i_R = -14.5 \pm 2.1^\circ$ и $i_\theta = -11.4 \pm 2.6^\circ$. Фаза Солнца

в спиральной волне близка к $\chi_\odot = -100^\circ \pm 11^\circ$, ее отсчитываем от предполагаемого центра рукава Киля—Стрельца — от $R \sim 7$ кпк в сторону увеличения R . Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с и $f_\theta = 4.6 \pm 1.2$ км/с соответственно.

Спектральный анализ пространственных скоростей РЗС с возрастaми из интервала 60–300 млн лет показал, что в них также имеется влияние спиральной волны плотности. Результаты спектрального анализа РЗС этой выборки отражены на рис. 4, где даны скорости V_R , ΔV_{circ} и их спектры мощности.

По 398 РЗС этой выборки найдены следующие значения длины волны и скоростей возмущений $\lambda_R = 2.2 \pm 0.6$ кпк и $\lambda_\theta = 4.1 \pm 0.8$ кпк. Для модели четырехрукавной спиральной структуры ($m = 4$ и принятому R_0) этим значениям соответствует угол закрутки $i_R = -9.6 \pm 2.6^\circ$ и $i_\theta = -17.9 \pm 3.3^\circ$. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 6.1 \pm 1.8$ км/с и $f_\theta = 3.9 \pm 2.2$ км/с соответственно. Фаза Солнца в спиральной волне χ_\odot здесь составляет около -190° . Видим, что довольно надежно и в согласии с описанными выше результатами определяются параметры спиральной волны плотности по радиальным скоростям этих РЗС.

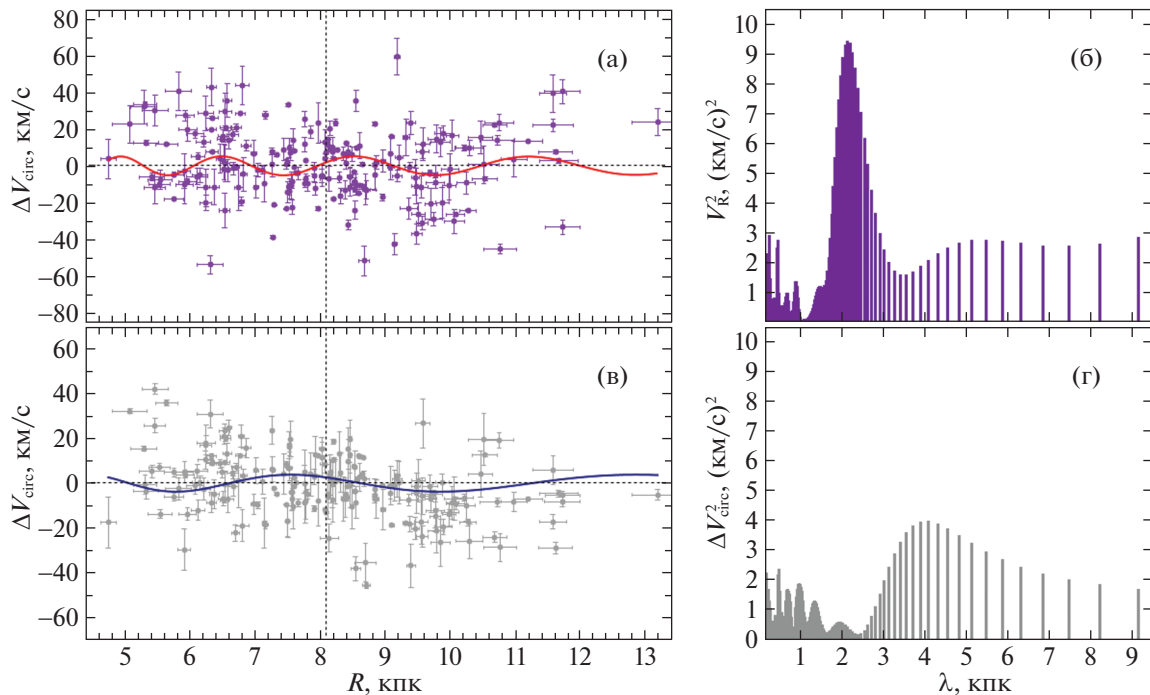


Рис. 4. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R для РЗС с возрастaми в интервале 60–300 млн лет (а), спектр мощности этой выборки (б), остаточные скорости вращения ΔV_{circ} для РЗС с возрастaми в интервале 60–300 млн лет (в) и их спектр мощности (г).

ОБСУЖДЕНИЕ

Скорости $(U, V, W)_{\odot}$

Скорости $(U, V, W)_{\odot}$ являются групповой скоростью рассматриваемой выборки РЗС, взятые с обратным знаком. Эти скорости содержат пекулярное движение Солнца относительно местного стандарта покоя, возмущения от спиральной волны плотности (для относительно молодых объектов) и влияние на скорость V_{\odot} так называемого асимметричного дрейфа (отставание от круговой скорости вращения с возрастом выборки).

В настоящее время считается, что наиболее достоверно компоненты пекулярной скорости Солнца относительно местного стандарта покоя определены в работе Шонриха и др. (2010), которые составляют $(U, V, W)_{\odot} = (11.1, 12.2, 7.3) \pm \pm (0.7, 0.5, 0.4)$ км/с. Можем видеть, что значения скоростей U_{\odot} и W_{\odot} , которые в настоящей работе найдены по различным выборкам РЗС, в пределах ошибок согласуются с оценкой Шонриха и др. (2010). Кроме того, в наших результатах можно видеть возрастание скорости V_{\odot} с увеличением возраста РЗС, что является проявлением асимметричного дрейфа.

Вращение Галактики

Важнейшим локальным параметром является значение линейной скорости V_0 . Наиболее быстрым вращением обладают такие объекты тонкого

диска Галактики, как водородные облака, мазерные источники, звезды спектральных классов О и В, молодые РЗС, цефеиды и др.

Например, из анализа выборки РЗС моложе 50 млн лет из каталога MWSC (Milky Way Star Clusters, Харченко и др., 2013) в работе Бобылева и др. (2016) была получена оценка $V_0 = 236 \pm 6$ км/с для принятого значения $R_0 = 8.3 \pm 0.2$ кпк. Мроз и др. (2019) при анализе около 770 цефеид с известными лучевыми скоростями получили оценку $V_0 = 233.6 \pm 2.8$ км/с для принятого значения $R_0 = 8.122 \pm 0.031$ кпк. В работе Аблимита и др. (2020) с использованием около 3500 классических цефеид была построена кривая вращения Галактики на интервале расстояний $R : 4 - 19$ кпк и с очень высокой точностью найдена скорость $V_0 = 232.5 \pm 0.9$ км/с для принятого $R_0 = 8.122 \pm 0.031$ кпк. Из анализа 800 цефеид с известными лучевыми скоростями Бобылев и др. (2021) нашли $V_0 = 240 \pm 3$ км/с для найденного значения $R_0 = 8.27 \pm 0.10$ кпк.

Отметим ряд результатов определения параметров угловой скорости вращения Галактики, полученных с использованием разнообразных данных. Так, по данным о 130 галактических мазерах с измеренными тригонометрическими параллаксами в работе Расторгуева и др. (2017) были получены следующие оценки: $(U, V)_{\odot} = (11.40, 17.23) \pm (1.33, 1.09)$ км/с, $\Omega_0 = 28.93 \pm$

± 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, где значение линейной скорости V_0 составило 243 ± 10 км/с для найденного значения $R_0 = 8.40 \pm 0.12$ кпк.

В работе Бобылева, Байковой (2018) по выборке из 495 ОВ-звезд с собственными движениями из каталога Gaia DR2 (Браун и др., 2018) были найдены следующие значения: $(U, V, W)_\odot = (8.16, 11.19, 8.55) \pm (0.48, 0.56, 0.48)$ 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.

По 788 цефеидам из списка Мроза и др. (2019) с собственными движениями и лучевыми скоростями из каталога Gaia DR2 в работе Бобылева и др. (2021) было найдено $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (10.1, 13.6, 7.0) \pm (0.5, 0.6, 0.4)$ км/с, а также: $\Omega_0 = 29.05 \pm 0.15$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.789 \pm 0.045$ км/с/кпк², $\Omega''_0 = 0.722 \pm 0.027$ км/с/кпк³, $\Omega'''_0 = -0.087 \pm 0.007$ км/с/кпк⁴, $R_0 = 8.27 \pm 0.10$ кпк.

В работе Рида и др. (2019) по выборке из 147 мазеров были найдены следующие значения двух важнейших кинематических параметров: $R_0 = 8.15 \pm 0.15$ кпк и $\Omega_\odot = -30.32 \pm 0.27$ км/с/кпк, где $\Omega_\odot = \Omega_0 + V_\odot/R$. Значение скорости $V_\odot = 12.24$ км/с было взято из работы Шонриха и др. (2010). Эти авторы использовали разложение в ряд линейной скорости вращения Галактики.

Интерес представляют и значения постоянных Оорта A и B . Например, Бови (2017) из анализа собственных движений и параллаксов локальной выборки из 304 267 звезд главной последовательности каталога Gaia DR1 (Браун и др., 2016) нашел $A = 15.3 \pm 0.5$ км/с и $B = -11.9 \pm 0.4$ км/с, на основе которых он получил оценку угловой скорости вращения Галактики $\Omega_0 = 27.1 \pm 0.5$ км/с/кпк и скорости $V_0 = 219 \pm 4$ км/с. По выборке из 5627 близких ($r < 0.6$ кпк) к Солнцу звезд спектрального класса A из каталога LAMOST DR4 (The Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope, Цуй и др., 2012; Сян и др., 2017) в работе Ванга и др. (2021) получены следующие оценки постоянных Оорта: $A = 16.31 \pm 0.89$ км/с и $B = -11.99 \pm 0.79$ км/с, где $\Omega_0 = 28.30 \pm 1.19$ км/с/кпк.

Можем заключить, что значение скорости V_0 , найденное в настоящей работе по наиболее молодым РЗС находится в очень хорошем согласии с оценками этой скорости, полученными по другим молодым объектам диска Галактики. Параметры

Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 , а также постоянные Оорта A и B определены в настоящей работе с высокой точностью, их значения также находятся в хорошем согласии с оценками других авторов.

Параметры волны плотности

В работе Мельник и др. (2001) были найдены $f_R = 7 \pm 1$ км/с, $f_\theta = 2 \pm 1$ км/с, $\lambda = 2.0 \pm 0.2$ кпк, для $m = 2$ из анализа ОВ-ассоциаций. В работе Заболотских и др. (2002) были найдены $f_R = 7 \pm 2$ км/с и $f_\theta = 1 \pm 2$ км/с, $i = 6.0 \pm 0.9^\circ$, для $m = 2$ с фазой $\chi_\odot \approx -85^\circ$ по данным о молодых цефеидах ($P > 9^d$) и РСЗ ($\log T < 7.6$); $f_R = 6.6 \pm 2.5$ км/с и $f_\theta = 0.4 \pm 2$ км/с, $i = -6.6 \pm 0.9^\circ$, для $m = 2$ с фазой $\chi_\odot \approx -97^\circ$ по данным об ОВ-звездах.

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.

По выборке РЗС моложе 50 млн лет из каталога MWSC (Харченко и др., 2013) Бобылева и др. (2016) нашли $f_\theta = 5.6 \pm 1.6$ км/с и $f_R = 7.7 \pm 1.4$ км/с, длина волны возмущений $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.5$ кпк ($i_\theta = -11 \pm 2^\circ$) и $\lambda_R = 2.1 \pm 0.5$ кпк ($i_R = -9 \pm 2^\circ$) для принятой модели четырехрукавной структуры ($m = 4$).

Расторгуев и др. (2017) из анализа мазерных источников с РСДБ-параллаксами нашли $i = -10.4^\circ \pm 0.3^\circ$ и $\chi_\odot = -125^\circ \pm 10^\circ$, что находится в хорошем согласии с результатами настоящей работы.

Локтин, Попова (2019) нашли $f_R = 4.6 \pm 0.7$ км/с и $f_\theta = 1.1 \pm 0.4$ км/с по РЗС из “Однородного каталога параметров рассеянных скоплений” с собственными движениями из каталога Gaia DR2. В работе этих авторов можно найти обзор результатов определения скоростей возмущений f_R и f_θ , полученных в последнее время различными авторами с использованием разнообразных индикаторов спиральной структуры.

При анализе 326 молодых ($\lg t < 8$) РЗС с собственными движениями и расстояниями, вычисленными по данным каталога Gaia DR2 в работе Бобылева, Байковой (2019) были получены следующие оценки: $f_\theta = 3.8 \pm 1.2$ км/с и $f_R = 4.7 \pm 1.0$ км/с, $\lambda_\theta = 2.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_R = 2.2 \pm 0.5$ кпк ($m = 4$, $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк), а также $\chi_\odot = -120^\circ \pm 10^\circ$.

Можно заметить, что амплитуда тангенциальных возмущений f_θ обычно плохо определяется. Как показало моделирование волн плотности в

Галактике (Бертон, 1971), ожидаемые амплитуды возмущений на околосолнечном расстоянии могут достигать $f_R \sim 8$ км/с и $f_\theta \sim 6$ км/с. Видим, что найденное в настоящей работе по самым молодым РЗС значение $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с находится в отличном согласии с ожидаемой оценкой.

По РЗС со средним возрастом 163 млн лет хорошо определяются параметры спиральной волны плотности по радиальным скоростям. Наибольший интерес здесь представляют значения фаз Солнца χ_\odot : -100° для РЗС со средним возрастом 18 млн лет и -190° со средним возрастом 163 млн лет, которые показывают, что волна движется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена выборка рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia EDR3. Для этой цели послужил каталог Хао и др. (2021), который содержит данные о 3794 РЗС различного возраста. Примерно для трети скоплений из этого каталога известны средние значения лучевых скоростей.

Показано, что параметры вращения Галактики, определенные по выборкам РЗС различного возраста, находятся в хорошем согласии между собой. Причем применялись методы анализа как с использованием пространственных скоростей, так и только собственных движений РЗС. В частности, линейная скорость вращения околосолнечной окрестности V_0 варьирует от 218 ± 3 км/с, найденной по относительно возрастным РЗС, до 227 ± 3 км/с, характерной для самых молодых РЗС.

Детально проанализирована кинематика 967 наиболее молодых РЗС со средним возрастом 18 млн лет. В первую очередь эти РЗС были использованы для переопределения параметров вращения Галактики. С использованием только их собственных движений и параллаксов на основе нелинейной модели вращения найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 28.01 \pm 0.15$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.674 \pm 0.040$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.565 \pm 0.023$ км/с/кпк³. Здесь круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 226.9 \pm 3.1$ км/с для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

Для определения параметров спиральной волны плотности применен метод, основанный на периодограммном Фурье-анализе. Этот метод учитывает как логарифмический характер спиральной структуры Галактики, так и позиционные углы объектов, что позволяет производить точный анализ скоростей объектов, распределенных в широком диапазоне галактоцентрических расстояний.

Вначале такой анализ был применен к выборке наиболее молодых 233 РЗС с лучевыми скоростями. Было показано принципиальное согласие в значениях длины волны и скоростей возмущений, найденных независимо по каждому виду скоростей, $\lambda_R = 3.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.6$ кпк. Для модели четырехрукавной спиральной структуры ($m = 4$ и принятому R_0) этим значениям соответствует угол закрутки $i_R = -14.5 \pm 2.1^\circ$ и $i_\theta = -11.4 \pm 2.6^\circ$. Фаза Солнца в спиральной волне близка к $\chi_\odot = -100^\circ \pm 11^\circ$. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с и $f_\theta = 4.6 \pm 1.2$ км/с соответственно.

Далее показано, что в пространственных скоростях РЗС с возрастными из интервала 60–300 млн лет (средний возраст 163 млн лет) также проявляется влияние спиральной волны плотности. По 398 РЗС этой выборки проведен спектральный анализ их радиальных и остаточных тангенциальных скоростей. Хорошо определяются параметры спиральной волны плотности по радиальным скоростям этих РЗС. Так, значение длины волны и скоростей возмущений найдены следующими $\lambda_R = 2.2 \pm 0.6$ кпк ($i_R = -9.6 \pm 2.6^\circ$ для $m = 4$ и принятому R_0), $f_R = 6.1 \pm 1.8$ км/с и $f_\theta = 3.9 \pm 2.2$ км/с. Фаза Солнца в спиральной волне здесь близка к $\chi_\odot = -190^\circ$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аблитмит и др. (I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S.A. Bird), *Astrophys. J.* **895**, L12 (2020).
2. Амарал, Лепине (L.H. Amaral and J.R.D. Lépine), *MNRAS* **286**, 885 (1997).
3. Бабиссо и др. (Gaia Collaboration, C. Babusiaux, F. van Leeuwen, M.A. Barstow, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bossini, A. Bressan, T. Cantat-Gaudin, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 10 (2018).
4. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **38**, 549 (2012)].
5. Бертон (W.B. Burton), *Astron. Astrophys.* **10**, 76 (1971).
6. 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)].
7. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437**, 1549 (2014).
8. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **447**, L50 (2015).
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Широкова К.С., Письма в Астрон. журн. **42**, 793 (2016) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 721 (2016)].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 739 (2018) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **44**, 675 (2018)].

11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **45**, 151 (2019) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **45**, 109 (2019)].
12. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021)].
13. Бобылев и др. (V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, A.S. Rastorguev, and M.V. Zabolotskikh), *MNRAS* **502**, 4377 (2021).
14. Бови (J. Bovy), *MNRAS* **468**, L63 (2017).
15. 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).
16. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
17. 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).
18. Ванг и др. (F. Wang, H.-W. Zhang, Y. Huang, B.-Q. Chen, H.-F. Wang, and C. Wang), *MNRAS* **504**, 199 (2021).
19. Глушкова и др. (E.V. Glushkova, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, and A.S. Rastorguev), *Astron. Astrophys.* **329**, 514 (1998).
20. 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)].
21. Диас и др. (W.S. Dias, J.R.D. Lépine, and B.S. Alessi), *Astron. Astrophys.* **376**, 441 (2001).
22. Диас и др. (W.S. Dias, M. Assafin, V. Flório, B.S. Alessi, and V. Libero), *Astron. Astrophys.* **446**, 949 (2006).
23. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, A. Moitinho, J.R.D. Lépine, G. Carraro, E. Pauzen, B. Alessi and L. Villela), *MNRAS* **504**, 356 (2021).
24. 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)].
25. Камарго и др. (D. Camargo, C. Bonatto, and E. Bica), *MNRAS* **450**, 4150 (2015).
26. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Núñez, C. Soubiran, et al.), *Astron. Astrophys.* **618**, A93 (2018).
27. 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).
28. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), *Astrophys. J.* **870**, 32 (2018).
29. Лепине и др. (J.R.D. Lépine, W.S. Dias, and Yu. Mishurov), *MNRAS* **386**, 2081 (2008).
30. 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).
31. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
32. Локтин А.В., Бешенов Г.В., Астрон. журн. **80**, 8 (2003) [A.V. Loktin, et al., *Astron. Rep.* **47**, 6 (2003)].
33. Локтин А.В., Попова М.Э., Астрон. журн. **84**, 409 (2007) [A.V. Loktin, M.E. Popova, *Astron. Rep.* **51**, 364 (2007)].
34. Локтин А.В., Попова М.Э., Астрофиз. Бюллетень **74**, 289 (2019) [A.V. Loktin, M.E. Popova, *Astrophys. Bull.* **74**, 270 (2019)].
35. Маис-Апельянис (J. Maiz Apellániz), arXiv: 2110.01475 (2021).
36. Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 521 (2001). [A.M. Mel'nik, et al., *Astron. Lett.* **27**, 611 (2001)].
37. Монтейро и др. (H. Monteiro, D.A. Barros, W.S. Dias, and J.R.D. Lépine), *Front. Astron. Space. Sci.* **8**, 62 (2021).
38. Мроз и др. (P. Mróz, A. Udalski, D.M. Skowron, J. Skowron, I. Soszynski, P. Pietrukowicz, M.K. Szymański, R. Poleski, et al.), *Astrophys. J.* **870**, L10 (2019).
39. Наоз, Шавив (S. Naoz and N.J. Shaviv), *New Astron.* **12**, 410, (2007).
40. Попова М.Э., Локтин А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 190 (2005) [M.E. Popova, et al., *Astron. Lett.* **31**, 171 (2005)].
41. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **445**, 545 (2006).
42. Прусты и др., (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 1 (2016).
43. 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)].
44. Рен и др. (F. Ren, X. Chen, H. Zhang, R. de Grijs, L. Deng, and Yang Huang), *Astrophys. J. Lett.* **911**, 20 (2021).
45. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, Y. Wu, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).

46. Сян и др. (M.-S. Xiang, X.-W. Liu, H.-B. Yuan, Z.-Y. Huo, Y. Huang, C. Wang, B.-Q. Chen, J.-J. Ren, et al.), *MNRAS* **467**, 1890 (2017).
47. 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).
48. 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**, 102 (2021).
49. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **438**, 1163 (2005).
50. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, R.-D. Scholz, A.E. Piskunov, S. Röser, and E. Schilbach), *Astron. Nachr.* **328**, 889 (2007).
51. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **558**, A53 (2013).
52. Цуй и др. (X.-Q. Cui, Y.-H. Zhao, Y.-Q. Chu, G.-P. Li, Q. Li, L.-P. Zhang, H.J. Su, Z.-Q. Yao, et al.), *Res. Astron. Astrophys.* **12**, 1197 (2012).
53. Шольц и др. (R.-D. Scholz, N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Röser, and E. Schilbach), *Astron. Astrophys.* **581**, A39 (2015).
54. Шонрих и др. (R. Schönrich, J.J. Binney, and W. Dehnen), *MNRAS* **403**, 1829 (2010).
55. Юнкейра и др. (T.C. Junqueira, C. Chiappini, J.R.D. Lépine, I. Minchev, and B.X. Santiago), *MNRAS* **449**, 2336 (2015).