

КИНЕМАТИКА ГАЛАКТИКИ ПО ВЫБОРКЕ МОЛОДЫХ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С ДАННЫМИ 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 11.11.2018 г.; после доработки 23.11.2018 г.; принята к публикации 28.11.2018 г.

Составлена выборка из 326 молодых ($\lg t < 8$) рассеянных звездных скоплений (РЗС) с собственными движениями и расстояниями, вычисленными различными авторами по данным каталога Gaia DR2. Средние значения их лучевых скоростей также взяты из различных литературных источников. В результате кинематического анализа найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.34 \pm 0.31$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.012 \pm 0.074$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.779 \pm 0.062$ км/с/кпк³. Круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 235 \pm 5$ 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 $f_\theta = 3.8 \pm 1.2$ км/с и $f_R = 4.7 \pm 1.0$ км/с соответственно, длина волны возмущений $\lambda_\theta = 2.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_R = 2.2 \pm 0.5$ кпк для принятой модели четырехрукавной структуры. Фаза Солнца в спиральной волне близка к $\chi_\odot = -120^\circ \pm 10^\circ$.

Ключевые слова: рассеянные звездные скопления, спиральная структура Галактики, вращение Галактики.

DOI: 10.1134/S032001081903001X

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль для изучения Галактики и ее подсистем играют рассеянные звездные скопления (РЗС) благодаря высокой точности получаемых по ним средних значений целого ряда кинематических и фотометрических характеристик. РЗС используются в качестве инструмента для изучения свойств тонкого и толстого дисков Галактики, их динамической и химической эволюции, спиральной структуры, процессов звездообразования, установления шкалы расстояний и др.

В апреле 2018 г. был опубликован второй выпуск данных эксперимента Gaia (Браун и др., 2018; Линдегрен и др., 2018), а выпуск третьего релиза запланирован на середину 2020 г. Каталог Gaia DR2 содержит тригонометрические параллаксы и собственные движения около 1.7 млрд звезд. Вывод их значений базируется на орбитальных наблюдениях, выполненных в течение 22 мес. Средняя ошибка определения тригонометрического параллакса и обеих компонент собственного движения в этом каталоге зависит от звездной величины. Например, для ярких звезд ($G < 15^m$) ошибки параллаксов лежат в интервале

0.02–0.04 мсд, а для слабых звезд ($G = 20^m$) — 0.7 мсд. Для значительного количества (более 7 млн) звезд спектральных классов F–G–K определены их лучевые скорости со средней ошибкой около 1 км/с.

Использование высокоточных данных Gaia DR2 позволило вывести новые средние значения кинематических параметров значительного количества РЗС (Бабиссо и др., 2018; Кун и др., 2018; Кантат-Гудин и др., 2018), с небывалой детализацией изучить 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) и РЗС (Субиран и др., 2018; Диас и др., 2018), обнаружить новые РЗС (Беккари и др., 2018), изучить тонкую структуру диаграммы Герцшпрунга–Рассела (Бабиссо и др., 2018), важную для уточнения эмпирических изохрон, эволюционных процессов, что в итоге должно привести к более глубокому пониманию физики звезд.

При уровне относительных ошибок параллаксов звезд из каталога Gaia DR2 менее 10% радиус околосолнечной окрестности с этими звездами составляет около 3 кпк (рис. 1 в работе Сюй и др.,

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

2018). Это позволяет охватить практически весь Местный рукав, а также “дотянуться” до краев рукава Персея и Киля—Стрельца и определить характеристики спиральной структуры.

В работе Бобылева, Байковой (2018) по выборке из около 500 OB-звезд с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2 были уточнены параметры вращения Галактики, а также параметры спиральной волны плотности. Можно ожидать, что кинематический анализ PЗС с использованием характеристик, вычисленных по данным каталога Gaia DR2, позволит, при наличии необходимой статистики, подтвердить или даже улучшить эти результаты, поскольку скорости PЗС определяются с более высокой точностью, чем скорости одиночных звезд.

Целью настоящей работы является уточнение параметров вращения Галактики и ее спиральной структуры с использованием новейших данных о рассеянных звездных скоплениях. Для этого мы используем средние значения собственных движений и параллаксов PЗС, которые вычислены различными авторами исключительно по данным каталога Gaia DR2. А средние значения лучевых скоростей этих PЗС получены в основном из наземных наблюдений, хотя имеются случаи, когда они определены по данным каталога Gaia DR2.

ДАННЫЕ

Собственные движения и лучевые скорости PЗС

Основным источником средних значений собственных движений и параллаксов, вычисленных по данным каталога Gaia DR2, для нас послужила работа Кантат-Гудина и др. (2018), в которой эти величины определены для 1229 PЗС. Параметры еще нескольких других PЗС взяты из работы Бабиссо и др. (2018), где они были вычислены исключительно по данным каталога Gaia DR2, по большому количеству наиболее вероятных членов скоплений.

Средние значения гелиоцентрических лучевых скоростей PЗС в основном взяты нами из каталога MWSC (Milky Way Star Clusters, Харченко и др., 2013), а в ряде случаев — из работ Куна и др. (2018), Бабиссо и др. (2018), Касамикелы и др. (2016), Конрад и др. (2014), а также Мермийо и др. (2008). В работе Субиран и др. (2018) показано, что имеется хорошее согласие между значениями лучевых скоростей PЗС, вычисленными только по данным каталога Gaia DR2, со значениями из каталога MWSC.

В настоящей работе рассматриваются PЗС с относительными ошибками параллаксов $\sigma_{\pi}/\pi < 30\%$, где значение дисперсии σ_{π} взято из 109 колонки каталога Кантат-Гудина и др. (2018). Имеется 925 таких PЗС различного возраста, для каждого из которых имеются собственные движения и параллаксы. Из них 459 PЗС имеют еще и оценки лучевой скорости, для таких скоплений можем вычислить их полные пространственные скорости. Последняя выборка содержит 211 относительно молодых PЗС, для которых $\lg t < 8$. Для изучения кинематики Галактики именно эти PЗС представляют наибольший интерес, так как они принадлежат вращающемуся тонкому диску, подвержены влиянию спиральной волны плотности и должны иметь небольшую дисперсию остаточных скоростей. В этой выборке относительные ошибки параллаксов всех PЗС не превышают 30%. Их распределение на плоскости $l - Z$ (l — галактическая долгота, Z — координата, в прямоугольной системе направленная в галактический полюс) показано на рис. 1. Как можно видеть из рисунка, все эти PЗС удалены от галактической плоскости не более, чем на 300 пк, то есть все они принадлежат тонкому диску. Хорошо также видна асимметрия в распределении PЗС относительно горизонтальной оси. Это отражает известный факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики. По данным о 211 PЗС мы нашли $Z_{\odot} = -20 \pm 5$ пк. Это значение находится в хорошем согласии с результатами анализа выборок других молодых объектов тонкого диска (Бобылев, Байкова, 2016).

Поправка к параллаксам каталога Gaia DR2

Впервые Линдегрен 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 настоящее время имеется несколько надежных шкал расстояний, сравнение с которыми позволяет, по мнению авторов этих шкал, контролировать систематику тригонометрических параллаксов Gaia. В работе Арену и др. (2018) даны результаты сравнения параллаксов Gaia DR2 с 29 независимыми каталогами, которые подтверждают наличие смещения в параллаксах Gaia DR2 $\Delta\pi \sim -0.03$ мсд.

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

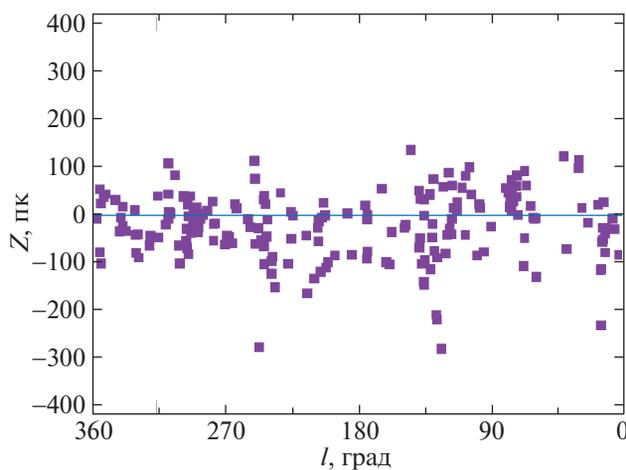


Рис. 1. Положение молодых ($\lg t < 8$) РЗС относительно плоскости Галактики.

строгих критериев, предъявляемых к фотометрическим характеристикам. В итоге относительные ошибки определения звездных радиусов, эффективных температур и болометрической светимости, по которой оценивается расстояние, не превышают 3%.

Бобылев (2019) получил оценку $\Delta\pi = -0.038 \pm 0.046$ мсд из сравнения с каталогом Gaia DR2 88 радиозвезд, тригонометрические параллаксы которых измерены различными авторами методом РСДБ. Известно, что этот метод позволяет определять параллаксы звезд с ошибкой около 10 микросекунд. Таких звезд, правда, пока мало, поэтому велика ошибка полученной оценки.

В работе Ялялиевой и др. (2018) из сравнения астрометрических (Gaia DR2) и фотометрических параллаксов 94 рассеянных звездных скоплений найдена поправка $\Delta\pi = -0.045 \pm 0.009$ мсд. Высокая точность полученной оценки связана с высокой точностью оценок фотометрических расстояний до РЗС. Для этого были привлечены данные современных 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 получена также этими авторами из

анализа звезд, принадлежащих так называемому “красному сгущению” $\Delta\pi = -0.050 \pm 0.004$ мсд. 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.

Отметим также эксперимент сравнения расстояний до РЗС из различных каталогов, описанный в работе Кантат-Гудина и др. (2018), показал, что поправка $\Delta\pi$ отличается от рекомендованного Линдгреном и др. (2018), и должна быть близкой к -0.050 мсд.

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.

Отметим, что в каталоге Кантат-Гудина и др. (2018) даны два вида расстояний. Во-первых, даны средние параллаксы РЗС, вычисленные по оригинальным значениям тригонометрических параллаксов вероятных членов скопления, которые взяты этими авторами из каталога Gaia DR2. Именно эти значения (и аналогичные величины, взятые у других авторов) мы используем в настоящей работе для вычисления расстояний до РЗС. Во-вторых, даны расстояния до РЗС, вычисленные по средним параллаксам с прибавлением поправки $\Delta\pi = 0.029$ мсд, но в настоящей работе эти расстояния не используются.

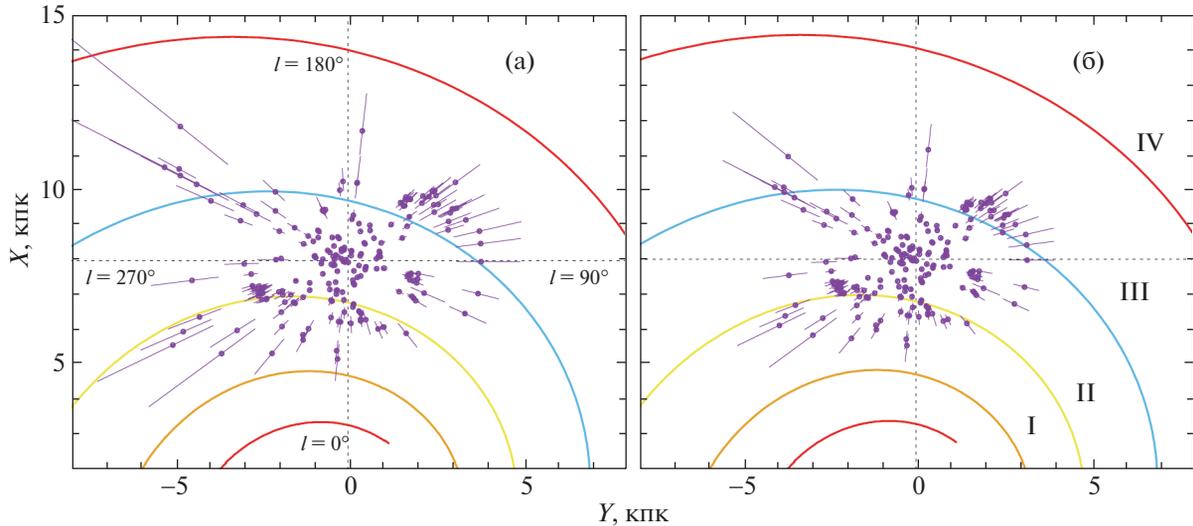


Рис. 2. Распределение на галактической плоскости XY молодых ($\lg t < 8$) РЗС, расстояния до которых вычислены с использованием оригинальных значений параллакс из каталога Gaia DR2 (а), с поправкой $\Delta\pi = 0.050$ мсд (б); Солнце имеет координаты $(X, Y) = (8, 0)$ кпк, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки -13° (Бобылев, Байкова, 2014), отрезки спиральных рукавов пронумерованы римскими цифрами.

На рис. 2 показано распределение на галактической плоскости XY молодых РЗС, расстояния до которых вычислены как с использованием оригинальных средних значений параллакс из каталога Gaia DR2, так и с прибавлением поправки $\Delta\pi = 0.050$ мсд к этим значениям. Римскими цифрами на рисунке пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля—Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав. Из рисунка следует, что поправка оказывает значительное влияние на вычисление расстояний до РЗС, в особенности, далеких от Солнца. Отметим также, что распределение точек на рис. 2б лучше согласуется с указанным спиральным узором.

МЕТОД

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 — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год. Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

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

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

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_{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 $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, 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. 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 :

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

$$+ 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \cos b \Omega''_0,$$

$$V_l = U_\odot \sin l - V_\odot \cos l - r\Omega_0 \cos b + \quad (4)$$

$$+ (R - R_0)(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega'_0 +$$

$$+ 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos l - r \cos b)\Omega''_0,$$

$$V_b = U_\odot \cos l \sin b + V_\odot \sin l \sin b - \quad (5)$$

$$- W_\odot \cos b - R_0(R - R_0) \sin l \sin b \Omega'_0 -$$

$$- 0.5R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b \Omega''_0,$$

где R — расстояние от звезды до оси вращения Галактики:

$$R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2. \quad (6)$$

Величина Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости, $V_0 = |R_0 \Omega_0|$. Как показывает практика, для построения гладкой кривой вращения галактики в диапазоне расстояний R от 2 до 12 кпк достаточно знать две производные угловой скорости Ω'_0 и Ω''_0 . Отметим, что скорости V_R и ΔV_{circ} должны быть освобождены от пекулярной скорости Солнца U_\odot , V_\odot , W_\odot .

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

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:

$$V_R = -f_R \cos \chi, \quad (7)$$

$$\Delta V_{\text{circ}} = f_\theta \sin \chi,$$

где

$$\chi = m[\text{ctgi} \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_\odot \quad (8)$$

— 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

$$\frac{2\pi R_0}{\lambda} = m \text{ctg } i. \quad (9)$$

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):

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N V'_n(R'_n) \exp\left(-j \frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \quad (10)$$

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

$$R'_n = R_0 \ln(R_n/R_0), \quad (11)$$

$$V'_n(R'_n) = V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n).$$

Пиковому значению спектра мощности S_{peak} соответствует искомая длина волны λ . Угол закрутки спиральной волны плотности находится из выражения (9). 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

$$f_R(f_\theta) = 2 \times \sqrt{S_{\text{peak}}}. \quad (12)$$

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, 2013, 2015, 2018) 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 среднеквадратическим отклонением, равным $\sigma_l = \text{erf} \sigma_l$, $l = 1, 2, \dots, N_d$, где N_d — число данных, $\text{erf} \sigma_l$ — 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 среднеквадратическим отклонением 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 , λ^j , χ_{\odot}^j . Затем из полученных последовательностей оценок определяются средние значения параметров и их среднеквадратические отклонения: $m_{f_R} \pm \sigma_{f_R}$, $m_{\lambda} \pm \sigma_{\lambda}$, $m_{\chi_{\odot}} \pm \sigma_{\chi_{\odot}}$. С использованием соотношения (9) могут быть определены статистические характеристики угла закрутки спиральной волны i : $m_i \pm \sigma_i$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Система условных уравнений вида (3)–(5) решается методом наименьших квадратов 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, $\sigma_{V_r}^2$, $\sigma_{V_l}^2$, $\sigma_{V_b}^2$ — 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 $S_0 = 8$ км/с, а для выборки более старых РЗС — $S_0 = 11$ 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 по таким РЗС, для которых возможно вычислить пространственные скорости U, V, W . Вначале по выборке из 211 относительно молодых

($\lg t < 8$) РЗС было получено решение системы условных уравнений вида (3)–(5) по оригинальным данным, то есть без исправления параллаксов. При таком подходе найдены следующие кинематические параметры:

$$\begin{aligned} (U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) &= & (13) \\ &= (7.63, 11.72, 8.93) \pm (0.60, 0.74, 0.61) \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= 28.34 \pm 0.37 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.832 \pm 0.090 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.851 \pm 0.073 \text{ км/с/кпк}^3. \end{aligned}$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 8.5$ км/с.

Следующее решение условных уравнений вида (3)–(5) было получено с исправленными значениями параллаксов РЗС поправкой $\Delta\pi = 0.050$ мсд. В этом случае найдены следующие кинематические параметры:

$$\begin{aligned} (U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) &= & (14) \\ &= (7.36, 12.15, 8.22) \pm (0.57, 0.72, 0.57) \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= 28.79 \pm 0.39 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.999 \pm 0.091 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.921 \pm 0.096 \text{ км/с/кпк}^3. \end{aligned}$$

В этом решении значение ошибки единицы веса составляет $\sigma_0 = 7.9$ км/с. Для принятого значения $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк линейная скорость вращения Галактики ($V_0 = |R_0\Omega_0|$) составляет $V_0 = 230 \pm 6$ км/с, а постоянные Оорта ($A = -0.5\Omega'_0 R_0$, $B = -\Omega_0 + A$) принимают следующие значения: $A = 16.00 \pm 0.37$ км/с/кпк, $B = -12.79 \pm 0.53$ 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.

Применяем данный способ для анализа РЗС моложе 1 млрд лет ($\lg t < 9$). Для этого разделили выборку на две части: 326 относительно молодых ($\lg t < 8$) РЗС и 481 более старых ($8 < \lg t < 9$) РЗС.

По выборке молодых ($\lg t < 8$) РЗС найдены следующие кинематические параметры:

$$\begin{aligned} (U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) &= & (15) \\ &= (7.88, 11.17, 8.28) \pm (0.48, 0.63, 0.45) \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= 29.34 \pm 0.31 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -4.012 \pm 0.074 \text{ км/с/кпк}^2, \end{aligned}$$

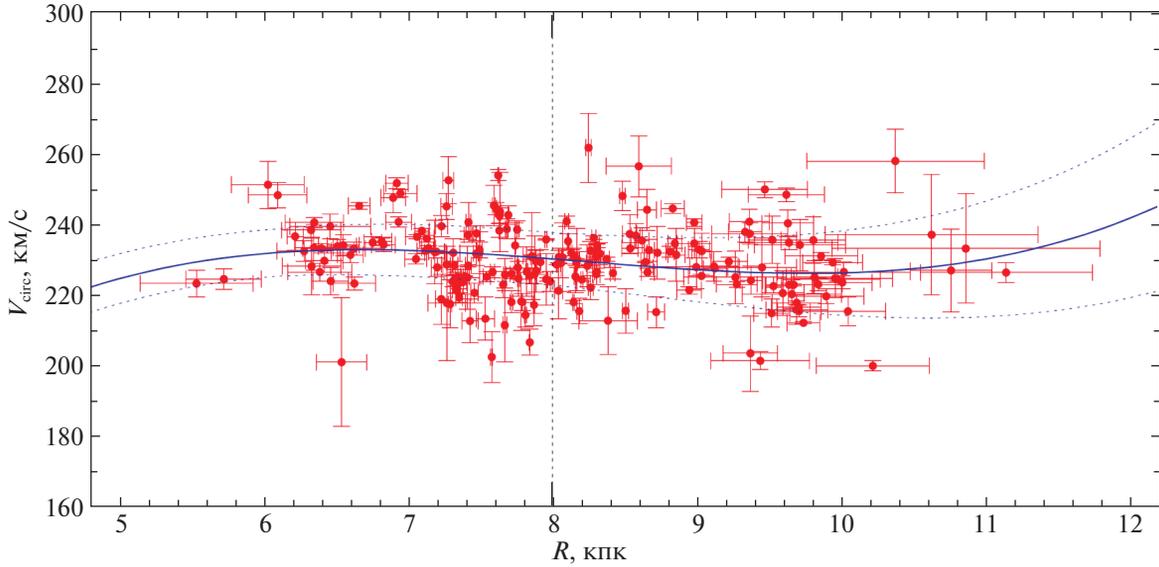


Рис. 3. Круговые скорости молодых РЗС в зависимости от галактоцентрического расстояния, дана кривая вращения Галактики, построенная согласно решению (14), с границами доверительных интервалов, соответствующими уровню 1σ ; вертикальным пунктиром обозначено положение Солнца.

$$\Omega''_0 = 0.779 \pm 0.062 \text{ км/с/кпк}^3,$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 7.9 \text{ км/с}$, скорость вращения Галактики $V_0 = 235 \pm 5 \text{ км/с}$, а значения постоянных Оорта $A = 16.05 \pm \pm 0.30 \text{ км/с/кпк}$ и $B = -13.29 \pm 0.43 \text{ км/кпк}$. Это решение по сути является улучшением решения (14), так как к 211 РЗС, использованным при поиске решения (14), здесь были добавлены еще 115 РЗС, для которых имеются только параллаксы и собственные движения.

По выборке из 481 более старого ($8 < \lg t < 9$) РЗС найдены следующие кинематические параметры:

$$\begin{aligned} (U_\odot, V_\odot, W_\odot) &= (16) \\ &= (8.58, 11.10, 7.54) \pm (0.61, 0.76, 0.52) \text{ км/с}, \\ \Omega_0 &= 28.42 \pm 0.39 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.972 \pm 0.097 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.642 \pm 0.061 \text{ км/с/кпк}^3, \end{aligned}$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 11.1 \text{ км/с}$, скорость вращения Галактики $V_0 = 227 \pm 5 \text{ км/с}$, а значения постоянных Оорта $A = 15.89 \pm \pm 0.39 \text{ км/с/кпк}$ и $B = -12.54 \pm 0.55 \text{ км/кпк}$.

Скорости возмущения от волны плотности

На рис. 3 даны круговые скорости РЗС в зависимости от галактоцентрического расстояния,

приведена кривая вращения Галактики, построенная согласно решению (15). Как можно видеть из рисунка, остаточные скорости имеют малую дисперсию, хорошо просматривается периодичность с длиной около 2 кпк.

По отклонению от кривой галактического вращения (15) были вычислены остаточные круговые скорости ΔV_{circ} . По рядам радиальных V_R и остаточных тангенциальных ΔV_{circ} скоростей этой выборки РЗС, с применением периодограммного анализа найдены параметры галактической спиральной волны плотности. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 4.7 \pm 1.0 \text{ км/с}$ и $f_\theta = 3.8 \pm 1.2 \text{ км/с}$ соответственно.

На рис. 4 показаны спектры мощности скоростей РЗС. Из этого рисунка хорошо видно, что в обоих случаях пики распределения лежат практически на одном значении λ . Действительно, длина волны возмущений составила $\lambda_R = 2.2 \pm 0.5 \text{ кпк}$ ($i = -10 \pm 2^\circ$) и $\lambda_\theta = 2.3 \pm 0.5 \text{ кпк}$ ($i = -11 \pm 2^\circ$) для принятой четырехрукавной модели спирального узора ($m = 4$).

На рис. 5 приведены радиальные и остаточные тангенциальные скорости РЗС. Хорошо видно, что периодические кривые, указанные на рис. 5а и рис. 5б, идут со сдвигом по фазе в 90° . Фазу Солнца в спиральной волне χ_\odot отсчитываем от рукава Киля–Стрельца ($R \sim 7 \text{ кпк}$), в нашем случае ее значение оказалось очень близким к значению $-120 \pm 10^\circ$.

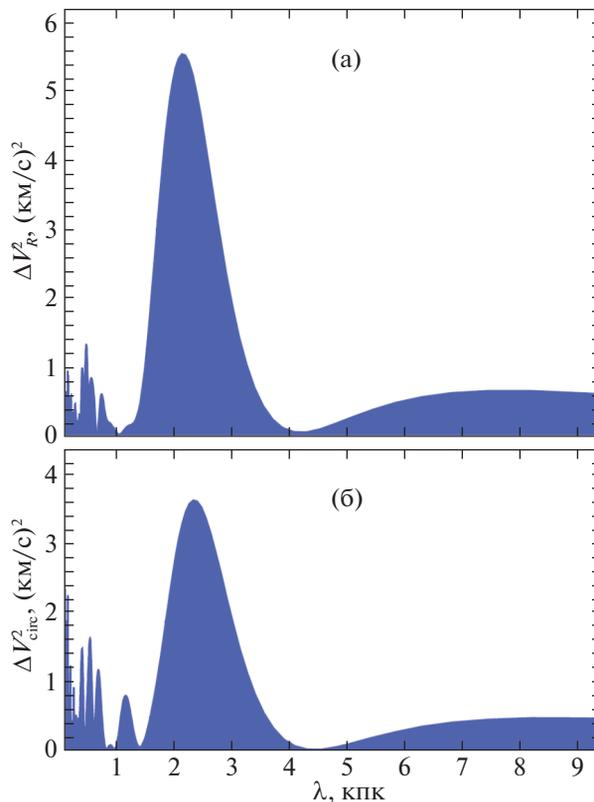


Рис. 4. Спектр мощности радиальных (а) и остаточных тангенциальных (б) скоростей молодых РСЗ.

На рис. 3 и рис. 5 виден ряд РСЗ, значительно уклоняющихся от общей картины. Например, большое отклонение от кривой вращения $\Delta V_{\text{circ}} = -32 \pm 18$ км/с имеет скопление Stock 16 ($R = 6.5$ кпк). Еще одно “шагающее не в ногу” РСЗ — NGC 2453 ($R = 10.4$ кпк) имеет $\Delta V_{\text{circ}} = 31 \pm 9$ км/с. Оба эти скопления имеют большие относительные ошибки параллаксов $\sigma_{\pi}/\pi = 30\%$ у Stock 16 и $\sigma_{\pi}/\pi = 22\%$ у NGC 2453. Если Stock 16 достаточно молодое, $\lg t = 6.78$, то NGC 2453 старше, $\lg t = 7.86$. Отметим, что оба эти скопления и еще несколько РСЗ с меньшими случайными ошибками определения скоростей V_R и V_{circ} были отброшены по критерию 3σ при поиске решений (13)–(15).

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе Бобылева и др. (2016) был выполнен кинематический анализ РСЗ из каталога MWSC (Харченко и др., 2013) с использованием фотометрических оценок расстояний до них. Прежде всего необходимо отметить, что распределение на галактической плоскости XY (рис. 2) выборки молодых РСЗ с тригонометрическими расстояниями визуально гораздо лучше согласуется с моделью

спирального узора по сравнению с их распределением, которое было получено с использованием фотометрических оценок расстояний (см. рис. 1 в работе Бобылева и др., 2016).

Ошибка единицы веса σ_0 , которую мы находим при решении условных уравнений вида (3)–(5), характеризует усредненную по трем направлениям дисперсию остаточных скоростей РСЗ. Известно, что дисперсия остаточных скоростей водородных облаков в галактическом диске составляет около 5 км/с. Дисперсия остаточных скоростей ОВ-звезд лежит в интервале 8–10 км/с, аналогичная дисперсия скоростей цефеид составляет около 14 км/с. Можно ожидать, что дисперсия скоростей молодых РСЗ близка к дисперсии ОВ-звезд. В решениях (14) и (15) найдено значение $\sigma_0 = 7.9$ км/с, которое прекрасно согласуется с ожидаемой величиной. Поэтому удивительно, что при анализе самых молодых РСЗ из каталога MWSC (Харченко и др., 2013) в работе Бобылева и др. (2016) σ_0 составила 15.7 км/с. Это можно объяснить тем, что велики ошибки собственных движений звезд, взятые из каталога PPMXL (Резер и др., 2010), где их значения лежат в интервале 4–10 мсд/год, то есть на два порядка превосходят уровень случай-

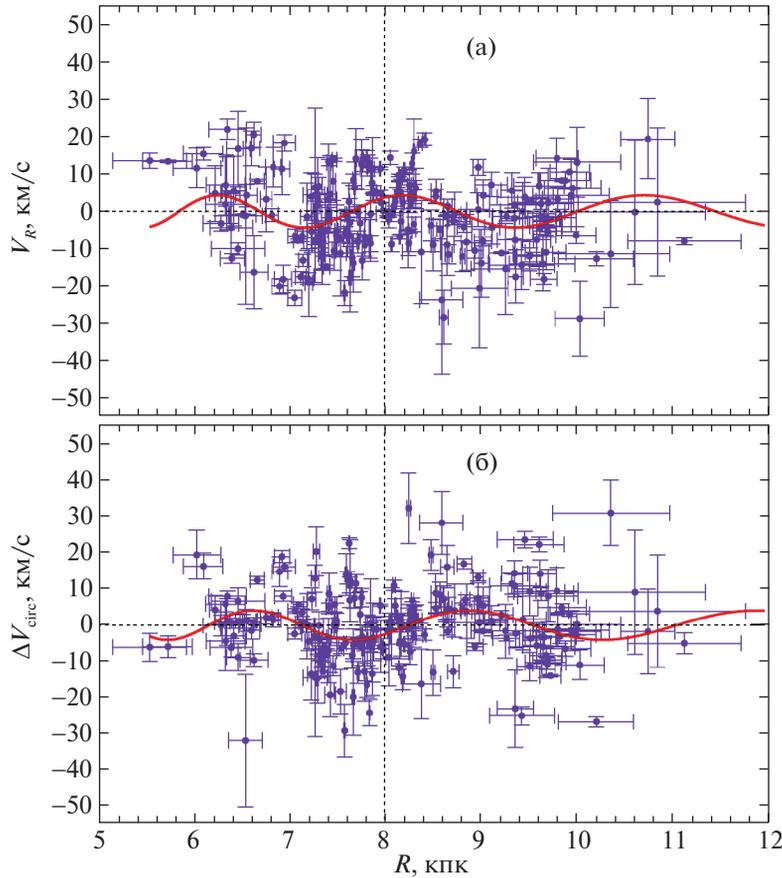


Рис. 5. Радиальные (а) и остаточные тангенциальные (б) скорости молодых РЗС в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечено положение Солнца.

ных ошибок собственных движений звезд каталога Gaia DR2. Ошибки фотометрических расстояний также вносят свой вклад.

Результаты решения (16) также представляют несомненный интерес. Увеличение значения σ_0 до 11.1 км/с связано с ростом дисперсий скоростей при увеличении возраста звезд (прогрев диска). Причем вклад чисто измерительных ошибок здесь ничтожен. Так, для РЗС с близким возрастом в работе Бобылева и др. (2016) была найдена $\sigma_0 = 21$ км/с.

По выборке из 209 молодых ($\lg t < 7.7$) РЗС из каталога MWSC в работе Бобылева и др. (2016) были найдены следующие значения компонент скорости Солнца: $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (9.7, 11.2, 6.2) \pm \pm (1.1, 1.4, 1.1)$ км/с и параметров кривой вращения Галактики $\Omega_0 = 28.60 \pm 0.81$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.04 \pm 0.16$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.19 \pm \pm 0.13$ км/с/кпк³ (было принято $R_0 = 8.3 \pm \pm 0.2$ кпк). Можем видеть, что в решении (14), при одинаковом количестве РЗС, ошибки определяемых параметров примерно в два раза меньше.

Итак, в настоящей работе были использованы практически те же значения лучевых скоростей РЗС, что и в работе Бобылева и др. (2016), но совершенно другие расстояния и собственные движения РЗС. В итоге получены надежные (мала σ_0), новые значения галактических параметров в решениях (14) и (15).

В работе Бови (2017) из анализа собственных движений и параллаксов локальной выборки из 304 267 звезд главной последовательности каталога Gaia DR1 получены следующие параметры Оорта: $A = 15.3 \pm 0.5$ 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 соответствующей линейной скорости $V_0 = 219 \pm \pm 4$ км/с.

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 (2018) 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). Можем заключить, что найденные в решениях (14) и (15) значения кинематических параметров находятся в хорошем согласии с результатами анализа современных данных, полученных в работах Бови (2017), Расторгуева и др. (2017), а также Бобылева, Байковой (2018). По уровню случайных ошибок определяемых параметров решение (15) является одним из лучших в настоящее время. Оно немного уступает в оценке параметра Ω''_0 (здесь требуется большой радиус окрестности) только решению, полученному Расторгуевым и др. (2017) по выборке мазеров с РСДБ-параллаксами.

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 (9) следует $\lambda = 3.0$ кпк. Можно видеть, что анализ нашей выборки молодых РЗС дает меньшее значение λ и соответственно меньшее значение угла закрутки $|i|$: $10^\circ - 11^\circ$.

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 $\chi_\odot = -125^\circ \pm 10^\circ$, что находится в хорошем согласии с результатами настоящей работы. Значение амплитуды возмущения радиальных скоростей f_R обычно составляет 6 – 10 км/с по мазерам (Расторгуев и др., 2017), ОВ-звездам (Бобылев, Байкова, 2015, 2018) или цефеидам (Бобылев, Байкова, 2012). Для более надежного определения параметров спиральной волны необходимо расширять выборку РЗС с целью охватить большую область Галактики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в данной работе по литературным данным составлена выборка рассеянных звездных скоплений с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia DR2. Основой для этой цели послужил каталог Кантат-Гудина и др. (2018). Основным источником лучевых скоростей послужил каталог MWSC (Харченко и др., 2013), для нескольких РСЗ лучевые скорости взяты из каталога Gaia DR2. Всего в эту выборку вошли 925 РСЗ различного возраста с относительными ошибками параллаксов менее 30%.

Детально изучена выборка из 326 наиболее молодых РСЗ с возрастом $\lg t < 8$. Все эти скопления расположены не далее 5 кпк от Солнца и не выше 300 пк над галактической плоскостью. Они были использованы для переопределения параметров вращения Галактики и параметров спиральной волны плотности.

Следуя последним результатам анализа нуля-пункта шкалы параллаксов каталога Gaia DR2, расстояния до РСЗ вычислены с прибавлением поправки $\Delta\pi = 0.050$ мсд к оригинальным средним значениям их параллаксов.

В результате найдены следующие значения параметров угловой скорости вращения Галактики: $\Omega_0 = 29.34 \pm 0.31$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -4.012 \pm 0.074$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.779 \pm 0.062$ км/с/кпк³, здесь круговая скорость вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики составляет $V_0 = 235 \pm 5$ км/с для принятого расстояния значения $R_0 = 8.0 \pm 0.15$ кпк.

Как в пространственном распределении, так и в скоростях исследуемой выборки обнаружено влияние галактической спиральной волны плотности. Спектральный анализ радиальных и остаточных тангенциальных скоростей молодых РСЗ показал очень хорошее согласие в значениях длины волны возмущений, найденных независимо по каждому виду скоростей, $\lambda_R = 2.2 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.3 \pm 0.5$ кпк. Для модели четырехрукавной спиральной структуры ($m = 4$ и принятому R_0) этим значениям соответствует угол закрутки $i \sim -10^\circ$. Фаза Солнца в спиральной волне близка к $\chi_\odot = -120^\circ \pm 10^\circ$. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили $f_R = 4.7 \pm 1.0$ км/с и $f_\theta = 3.8 \pm 1.2$ км/с соответственно.

Была также рассмотрена выборка из 481 более старого ($\lg t : 8-9$) РСЗ. Показано, что эти РСЗ вращаются медленнее, со скоростью $V_0 = 227 \pm 5$ км/с. Параметры спиральной волны плотности для этой выборки не определялись.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН П–28, подпрограмма “Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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).
2. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в *Астрон. журн.* **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, et al., *Astron. Lett.* **38**, 549 (2012)].
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. Беккари и др. (G. Beccari, H.M.J. Boffin, T. Jerabkova, N.J. Wright, V.M. Kalari, G. Carraro, G. De Marchi, and W.-J. de Wit), *MNRAS* **481**, L11 (2018).
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **38**, 715 (2012) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **38**, 638 (2012)].
6. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **39**, 601 (2013) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **39**, 532 (2013)].
7. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **41**, 516 (2015) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **41**, 473 (2015)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **42**, 3 (2016) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016)].
10. 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)].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в *Астрон. журн.* **44**, 739 (2018) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **44**, 675 (2018)].
12. Бобылев В.В., Письма в *Астрон. журн.* **44**, (2019) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **44**, (2019)].
13. Бови (J. Vovv), *MNRAS* **468**, L63 (2017).
14. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, S.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
15. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. Sp. Sci.* **362**, 79 (2017a).
16. Валле (J.P. Vallée), *New Astron. Rev.* **79**, 49 (2017c).
17. де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **232**, 22 (2017).
18. 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)].
19. Диас и др. (W.S. Dias, H. Monteiro, J.R.D. Lépine, R. Prates, C.D. Gneiding, and M. Sacchi), *MNRAS* **481**, 3887 (2018).
20. Зари и др. (E. Zari, H. Hashemi, A.G.A. Brown, K. Jardine, and P.T. de Zeeuw), *Astron. Astrophys.* **620**, A172 (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), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **130**, 4101 (2018).
23. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Núñez, C. Soubiran, et al.), arXiv: 1805.08726 (2018).
24. Касамикела и др. (L. Casamiquela, R. Carrera, C. Jordi, L. Balaguer-Núñez, E. Pancino, S.L. Hidalgo, C.E. Martínez-Vázquez, S. Murabito, et al.), *MNRAS* **458**, 3150 (2016).
25. Конрад и др. (C. Conrad, R.-D. Scholz, N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, C. Boeche, G. Kordopatis, et al.), *Astron. Astrophys.* **562**, 54 (2014).
26. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), arXiv: 1807.02115 (2018).
27. 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).
28. 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).
29. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
30. Мермильо и др. (J.C. Merrell, M. Mayor, and S. Udry), *Astron. Astrophys.* **485**, 303 (2008).
31. Пинсонью и др. (M.H. Pinsonneault, Y.P. Elsworth, J. Tayar, A. Serenelli, D. Stello, J. Zinn, S. Mathur, R. Garcia, et al.), arXiv: 1804.09983, (2018).
32. 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)].
33. Резер и др. (S. Röser, M. Demleitner, and E. Schilbach), *Astron. J.* **139**, 2440 (2010).
34. 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).
35. Роккатаглиата и др. (V. Roccatagliata, G.G. Sacco, E. Franciosini, and S. Randich), *Astron. Astrophys.* **617**, L4 (2018).

36. Стассун, Торрес (K.G. Stassun and G. Torres), *Astrophys. J.* **862**, 61 (2018).
37. Субиран и др. (C. Soubiran, T. Cantat-Gaudin, M. Romero-Gomez, L. Casamiquela, C. Jordi, A. Vallenari, T. Antoja, L. Balaguer-Núñez, et al.), arXiv: 1808.01613 (2018).
38. 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).
39. 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).
40. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, E. Schilbach, S. Röser, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **558**, 53 (2013).
41. Ялялиева Л.Н., Чемель А.А., Глушкова Е.В., Дамбис А.К., Клиничев А.Д., *Астрофиз. Бюлл.* **73**, 355 (2018) [L.N. Yalyalieva, et al., *Astrophys. Bull.* **73**, 335 (2018)].