

ПАРАМЕТРЫ ГАЛАКТИЧЕСКОЙ СПИРАЛЬНОЙ ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ ПО МАЗЕРАМ С ОШИБКАМИ ПАРАЛЛАКСОВ МЕНЕЕ 10%

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

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

Поступила в редакцию 10.04.2022 г.

После доработки 26.05.2022 г.; принята к публикации 20.06.2022 г.

Изучена кинематика галактических мазерных источников и радиозвезд с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами и собственными движениями. Рассматривались мазеры с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%. По ним определены параметры вращения Галактики. В частности, линейная скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии R_0 найдена равной 244.4 ± 4.3 км/с (для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). Выполнен совместный и раздельный спектральный анализ радиальных, остаточных тангенциальных и вертикальных скоростей мазеров. Так, по вертикальным скоростям мазеров получена оценка амплитуды скорости возмущения $f_W = 5.2 \pm 1.5$ км/с с длиной волны $\lambda_W = 2.6 \pm 0.7$ кпк, что говорит в пользу представления о влиянии спиральной волны плотности на вертикальные скорости звезд. По 104 мазерам из околосолнечной окрестности радиусом 3 кпк в результате совместного решения получены оценки скорости радиальных $f_R = 6.7 \pm 1.1$ км/с и тангенциальных $f_\theta = 2.6 \pm 1.2$ км/с возмущений, длины волны возмущений $\lambda = 2.1 \pm 0.3$ кпк, а также фазы Солнца в спиральной галактической волне плотности $\chi_\odot = -148 \pm 15^\circ$. Подтверждено наличие волны Рэдклиффа в пространственном распределении мазеров и радиозвезд, принадлежащих Местному рукаву.

Ключевые слова: мазеры, радиозвезды, кинематика, спиральная волна плотности, волна Рэдклиффа, вращение Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010822070014

ВВЕДЕНИЕ

Известны несколько классов объектов, представляющих важнейшее значение для изучения структуры и кинематики Галактики благодаря возможности оценить расстояния до них с приемлемой точностью. К ним относятся, например, звездные скопления, ОВ-звезды, или цефеиды. Применение РСДБ-метода в задаче по измерению тригонометрических параллаксов галактических мазеров сделало их первоклассными объектами для изучения Галактики. Причем в настоящей работе нас будут интересовать только мазеры, связанные с наиболее молодыми звездами и протозвездами, которые находятся в областях активного звездообразования.

В настоящее время имеется около 200 тригонометрических параллаксов мазеров (Рид и др., 2019; Хирота и др., 2020), измеренных с высокой астрометрической точностью. Случайные ошибки РСДБ-измерений большинства из этих источников

составляют менее 0.020 миллисекунд дуги (мсд). Например, известен результат практически прямого определения этим методом измерения расстояния от Солнца до центра Галактики, R_0 . Речь идет об измерении параллакса радиоисточника Sgr B, $\pi = 0.129 \pm 0.012$ мсд, что дает оценку $R_0 = 7.9^{+0.8}_{-0.7}$ (Рид и др., 2009).

Выполнено достаточно много исследований, посвященных изучению фундаментальных свойств галактического диска с использованием мазеров. Отметим работы Хонмы и др. (2012), Санны и др. (2017), Расторгуева и др. (2017), Сюя и др. (2018), Рида и др. (2019), Хироты и др. (2020), Бобылева и др. (2020), где по различным выборкам мазеров были получены оценки расстояния R_0 , скорости вращения околосолнечной окрестности вокруг центра Галактики V_0 , а также геометрические характеристики спирального узора или кинематические параметры спиральной волны плотности.

К настоящему времени практически все опубликованные результаты РСДБ-измерений триго-

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

нометрических параллаксов мазеров получены инструментами, расположенными в северном полушарии Земли. Поэтому, хотя и распределены эти источники по огромному галактическому пространству, все же имеется пустая зона в четвертом галактическом квадранте. Измерений, впрочем, уже достаточно для успешной оценки по пространственному распределению, например, углов закрутки спиральных рукавов (Рид и др., 2019) или значения R_0 (Никифоров, Веселова, 2018).

Радиоастрономы, выполняющие РСДБ-наблюдения мазеров, постоянно отмечают наличие отклонений от круговых движений этих объектов с величиной 10–20 км/с (Ву и др., 2019; Иммер и др., 2019; Сакаи и др., 2019; Хирота и др., 2020; Сюй и др., 2021). Как известно, многие мазерные источники связаны с двойными звездными системами, с расширяющимися, зачастую несимметричными, оболочками вокруг звезд. Не исключена также принадлежность их к убегающим звездам. Все это ведет к увеличению дисперсии наблюдаемых скоростей этих объектов. Однако наличие систематических отклонений от круговых движений наиболее молодых звезд вообще и мазерных источников, в частности, мы связываем (Бобылев, Байкова, 2010; Бобылев и др., 2020) с влиянием галактической спиральной волны плотности.

Целью настоящей работы является переопределение параметров вращения Галактики и галактической спиральной волны плотности с использованием новейших данных о мазерных источниках и радиозвездах с тригонометрическими параллаксами и собственными движениями, измеренными РСДБ-методом. Для достижения этой цели мы используем наиболее точные данные — мазеры с относительными ошибками параллаксов менее 10%.

МЕТОДЫ

Из наблюдений для каждой звезды имеем лучевую скорость V_r , направленную вдоль луча зрения, и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактических долготы l и широты b соответственно, 4.74 является коэффициентом размерности. Все три скорости выражены в км/с, 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 параллельно направлению на центр Галактики, точнее, на ось галактического вращения, 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 вдоль 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 околосолнечном расстоянии R_0 .

Определение параметров вращения Галактики

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

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

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

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

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, они отражают пекулярное движение Солнца, поэтому взяты с обратными знаками. Ω_0 является угловой скоростью вращения Галактики на солнечном расстоянии R_0 , параметры Ω'_0 и Ω''_0 — соответствующие производные угловой скорости вращения $V_0 = R_0\Omega_0$.

Мы принимаем R_0 равным 8.1 ± 0.1 кпк. Это значение было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок в работе Бобылева, Байковой (2021). Интересно отметить высокоточное современное индивидуальное измерение R_0 , полученное Абутером и др. (2019) из анализа шестнадцатилетнего

ряда наблюдений движения звезды S2 вокруг массивной черной дыры Sgr A* в центре Галактики, $R_0 = 8.178 \pm 0.013$ (стат.) ± 0.022 (сист.) кпк. Правда, в последней публикации этого коллектива (Абутер и др., 2021) показано наличие инструментальных aberrаций. Поэтому все предыдущие оценки коллаборации, начиная с 2018 г., были пересмотрены, и предложено уточненное значение $R_0 = 8.275 \pm 0.009 \pm 0.033$ кпк.

Решение условных уравнений вида (3)–(5) ищется методом наименьших квадратов (МНК). В итоге получаем оценку шести следующих неизвестных: $(U, V, W)_\odot$, Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 . Отметим, что скорости U , V и W в уравнениях (2) освобождены от пекулярной скорости Солнца U_\odot , V_\odot и W_\odot со значениями, найденными в результате МНК-решения кинематических уравнений вида (3)–(5).

Определение параметров волны плотности

Влияние спиральной волны плотности в радиальных V_R и остаточных тангенциальных скоростях ΔV_{circ} является периодическим с амплитудой около 10–15 км/с. Впрочем, уточнение конкретных значений амплитуд возмущений является одной из задач настоящего исследования. Согласно линейной теории волн плотности Линя и Шу (1964), скорости возмущений удовлетворяют следующим соотношениям:

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

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, $i < 0$ для закручивающейся спирали, χ_\odot — радиальная фаза Солнца в спиральной волне); f_R и f_θ — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей, которые считаются положительными.

Выявление периодичностей в скоростях V_R и ΔV_{circ} осуществляется нами на основе спектрального (периодограммного) анализа, который описан в работе Байковой, Бобылева (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 радиальные V_R , тангенциальные ΔV_{circ} или вертикальные W 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 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,

$$R'_n = R_0 \ln(R_n/R_0), \quad (10)$$

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

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

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

При спектральном анализе оценка ошибок искомых параметров была выполнена с применением статистического моделирования методом Монте-Карло на основе выполнения 100 циклов вычислений. При этом числе циклов средние значения решений практически совпадают с решениями, полученными по исходным данным без добавления ошибок измерения. Ошибки измерения добавлялись в скорости V_R , ΔV_{circ} и W , а также в ошибки координат источников x , y , z .

ДАННЫЕ

Источниками мазерного излучения являются звезды с протяженными газо-пылевыми оболочками, в которых возникает эффект накачки. Эффектом мазерного излучения обладают как молодые звезды и протозвезды различной массы, так и старые звезды, например, мириды. В настоящей работе мы используем наблюдения только молодых объектов, которые тесно связаны с областями активного звездообразования.

Основными источниками данных в настоящей работе являются каталоги Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020). В список Рида и др. (2019) включены данные о 199 мазерах. РСДБ-наблюдения

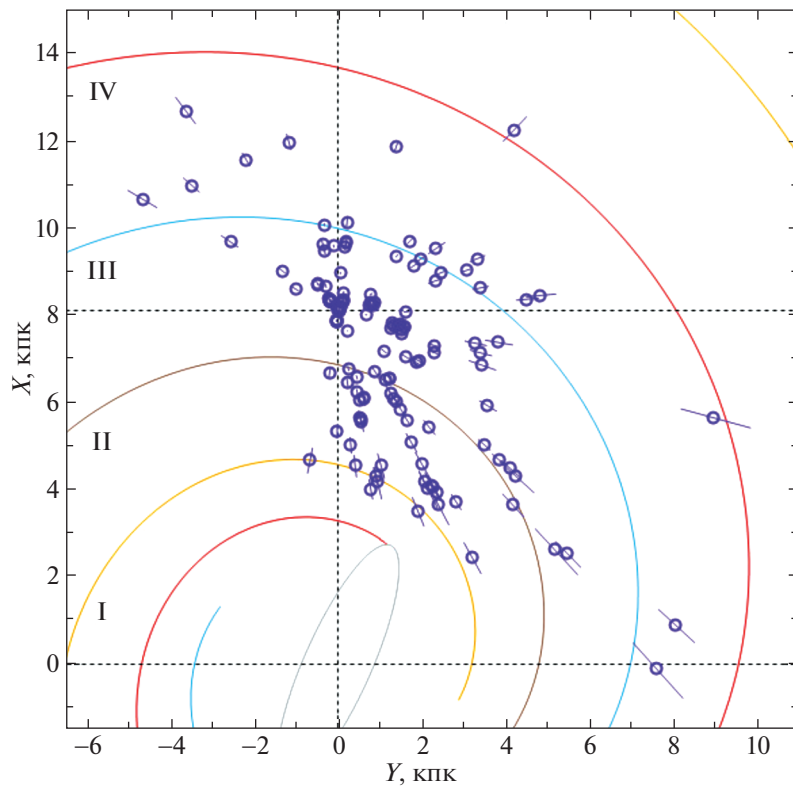


Рис. 1. Распределение 150 мазеров и радиозвезд с ошибками тригонометрических параллаксах менее 10% в проекции на галактическую плоскость XY , показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$, отмечен центральный галактический бар.

проводились на нескольких радиочастотах в рамках проекта BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey¹). Хирота и др. (2020) представили каталог из 99 источников мазерного излучения, наблюдавшихся исключительно на частоте 22 ГГц по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry²). Списки Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020) имеют большой процент общих измерений, поэтому мы составили список данных без совпадений. Кроме того, нами добавлены несколько новых результатов определений параллаксов ряда мазерных источников, выполненных после 2020 г. (Сакаи и др., 2020; Ортиз-Леон и др., 2020; Сюй и др., 2021; Сакаи и др., 2022; Биан и др., 2022). Помимо мазерных источников в нашем списке имеется некоторое количество радиозвезд, которые являются очень молодыми звездами, расположенными в основном в области пояса Гулда. Наблюдения этих звезд выполнены РСДБ-методом в континууме (Ортиз-Леон и др., 2018; Гайи и др., 2018). На данный момент наш список содержит всего 267 результатов определения РСДБ-параллаксов и собственных движений мазеров и радиозвезд.

¹<http://bessel.vlbi-astrometry.org>

²<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

В настоящей работе используются источники с относительными ошибками параллаксов менее 10%. Такой подход связан с тем, что при относительных ошибках измеренных параллаксов более 10% необходимо учитывать, например, эффект Лутца–Келкера (1973). Для применения этого эффекта необходимо хорошо знать распределение вещества в Галактике. Реальное же распределение вещества на больших расстояниях от Солнца, где расположена большая часть мазеров, в настоящее время не известно достаточно хорошо для решения этой задачи. Поправки за этот эффект являются модельно зависимыми, поэтому необходимость в них возникает лишь в крайних случаях. Как показано в работе Степанищева, Бобылева (2013), в единичных случаях (при $\sigma_\pi/\pi \gg 10\%$) для мазеров поправки могут быть значительными.

Отбор источников выполнен при условии $R > 4$ кпк. Это связано с тем, что на кинематику звезд в области $R < 4$ кпк сильное гравитационное влияние оказывает центральный бар, что приводит к возникновению значительных отклонений от круговых орбит, к увеличению дисперсии наблюдаемых пространственных скоростей звезд. Поэтому при поиске параметров вращения Галактики обычно (Рид и др., 2019) область $R < 4$ кпк исключается

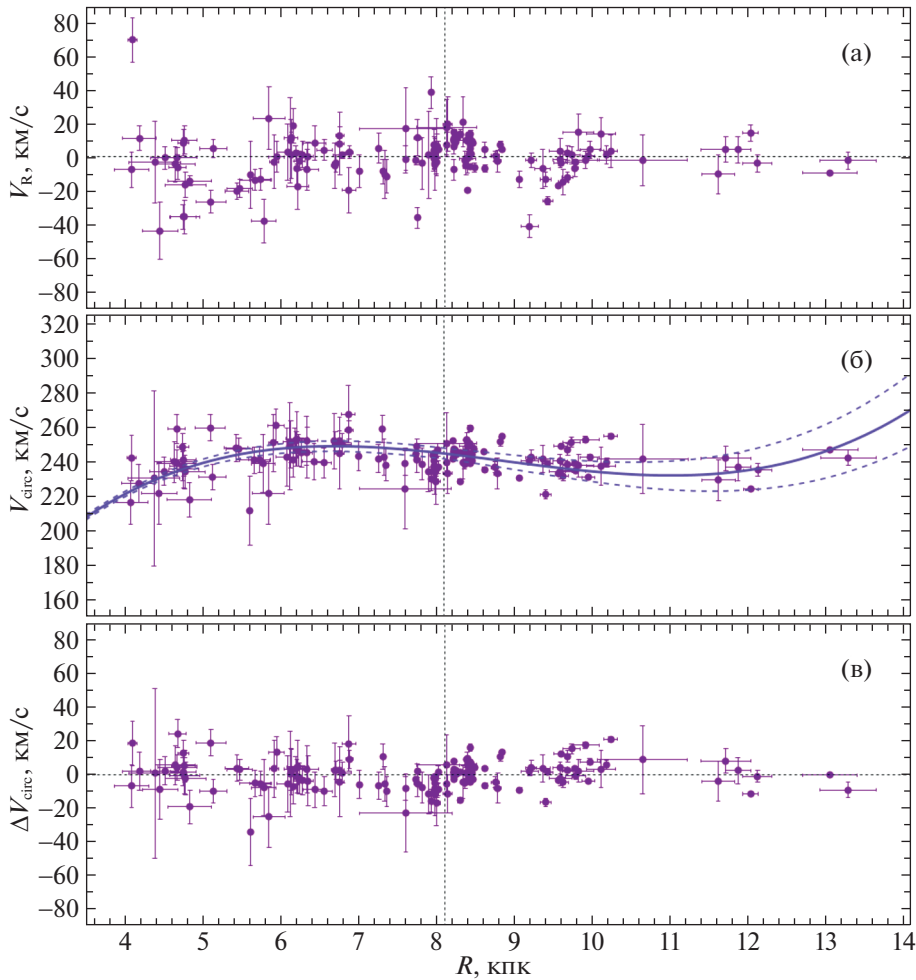


Рис. 2. Радиальные скорости V_R (а), скорости вращения V_{circ} (б) и остаточные скорости вращения ΔV_{circ} мазеров (в) в зависимости от расстояния R . Дана найденная по этим источникам кривая вращения с указанием границ доверительных областей, соответствующих уровню 1σ , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

из рассмотрения. Более того, спиральный узор начинается от концов центрального бара, поэтому и при поиске параметров спиральной волны плотности в использовании объектов из области $R < 4$ кпк нет необходимости.

Чтобы избавиться от сильных отскоков, используем следующие ограничения на пространственные скорости:

$$\begin{aligned} |U| &< 90 \text{ км/с}, \\ |V| &< 90 \text{ км/с}, \\ |W| &< 60 \text{ км/с}, \end{aligned} \quad (12)$$

где скорости U , V и W являются остаточными, так как из них заранее вычтены пекулярная скорость Солнца и скорость вращения Галактики. В качестве заранее известной используем кривую вращения Галактики, параметры которой найдены из анализа мазеров в работе Бобылева и др. (2020). В результате применения критериев отбрасываются 5–6 звезд с самыми большими отскоками. В целом

же при поиске МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5) используем критерий отбрасывания 3σ .

Распределение имеющихся мазерных источников с относительными ошибками параллаксов менее 10%, отобранных при условии $R > 4$ кпк, дано на рис. 1. Количество таких объектов составляет 150. На этом рисунке использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ дан согласно работе Бобылева, Байковой (2014), здесь он построен со значением $R_0 = 8.1$ кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие четыре спиральные рукава: I — Щита, II — Киля—Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав.

Таблица 1. Кинематические параметры, найденные по 150 мазерным источникам, расположенным в области Галактики $R > 4$ кпк

Параметры	$V_r + V_l + V_b$	$V_l + V_b$	V_l
U_{\odot} , км/с	9.15 ± 0.86	9.23 ± 1.46	8.89 ± 1.56
V_{\odot} , км/с	12.81 ± 0.86	11.15 ± 1.01	11.22 ± 1.04
W_{\odot} , км/с	8.93 ± 0.75	8.47 ± 0.67	—
Ω_0 , км/с/кпк	30.18 ± 0.38	29.46 ± 0.43	29.39 ± 0.45
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.368 ± 0.077	-3.914 ± 0.108	-3.906 ± 0.110
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.845 ± 0.037	0.652 ± 0.045	0.653 ± 0.046
σ_0 , км/с	8.9	8.1	8.5
V_0 , км/с	244.4 ± 4.3	238.6 ± 4.6	238.1 ± 4.7

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры вращения Галактики

Для поиска МНК-решения системы условных уравнений вида (3)–(5) применялись три способа. В первом случае использовались все уравнения, т.е. участвовали все три скорости — V_r , V_l и V_b . Во втором случае использовались два уравнения вида (4) и (5) только с участием собственных движений мазеров. В третьем случае использовалось только одно уравнение вида (4) с участием лишь одной компоненты скоростей V_l .

Применение трех подходов к использованию условных уравнений вида (3)–(5) обусловлено следующими соображениями. В первую очередь необходимо отметить, что РСДБ-наблюдения дают оригинальные значения тригонометрических параллаксов и собственных движений мазеров или радиозвезд. Значения систематической лучевой скорости объектов берутся из других источников. Поэтому интересно сравнить результаты, полученные с участием и без участия лучевых скоростей. Особенность в использовании компонент V_l и V_b заключается в том, что доминирующий вклад в оценку почти всех искомым кинематических параметров вносят скорости V_l . Однако только при использовании компоненты V_l нельзя определить значение скорости W_{\odot} . Как можно видеть из уравнения (5), коэффициенты перед искомыми параметрами $(U, V)_{\odot}$, Ω_0 , Ω'_0 и Ω''_0 содержат очень близкий к нулю для далеких мазеров член $\sin b$, и только при неизвестном W_{\odot} стоит $\cos b$. Поэтому интересно сравнить решения, найденные с участием и без участия скоростей V_b . Отметим, что наша выборка содержит значительное количество близких источников, с относительно большими значениями углов b .

Кинематические параметры, найденные всеми тремя способами по 150 мазерным источникам, расположенным в области Галактики $R > 4$ кпк, даны в табл. 1. На рис. 2 даны радиальные скорости V_R , скорости вращения V_{circ} и остаточные скорости вращения ΔV_{circ} выборки из 150 мазеров.

На рис. 2 можно видеть, что радиальные и тангенциальные скорости небольшой группировки звезд в области Пояса Гулда ($r < 0.5$ кпк) “стоят торчком”. Для оценки влияния этой группировки звезд на параметры общего решения нами было получено совместное $(V_r + V_l + V_b)$ решение с исключением области Пояса Гулда ($r < 0.5$ кпк). При таком подходе с использованием 119 мазерных источников были найдены скорости $(U, V, W)_{\odot} = (5.02, 13.86, 8.77) \pm (1.21, 1.22, 0.93)$ км/с, а также:

$$\Omega_0 = 29.73 \pm 0.48 \text{ км/с/кпк}, \quad (13)$$

$$\Omega'_0 = -4.246 \pm 0.089 \text{ км/с/кпк}^2,$$

$$\Omega''_0 = 0.826 \pm 0.043 \text{ км/с/кпк}^3,$$

где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 9.9$ км/с и $V_0 = 240.8 \pm 4.9$ км/с (для принятого $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк).

В работе Расторгуева и др. (2017) была рассмотрена выборка из 130 мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами. Например, на основе модели чисто круговое вращение диска (Модель А2 этих авторов) были найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_{\odot} = (7.73, 17.69, 8.64) \pm (1.52, 1.20, 0.91)$ км/с и следующие значения параметров кривой вращения Галактики:

$$\Omega_0 = 29.03 \pm 0.52 \text{ км/с/кпк},$$

$$\Omega_0^1 = -3.94 \pm 0.08 \text{ км/с/кпк}^2,$$

$$\begin{aligned}\Omega_0^2 &= 1.13 \pm 0.07 \text{ км/с/кпк}^3, \\ \Omega_0^3 &= 0.06 \pm 0.11 \text{ км/с/кпк}^4, \\ \Omega_0^4 &= 0.30 \pm 0.02 \text{ км/с/кпк}^5, \\ \Omega_0^5 &= -0.14 \pm 0.02 \text{ км/с/кпк}^6,\end{aligned}$$

где $V_0 = 241 \pm 10$ км/с для найденного значения $R_0 = 8.31 \pm 0.13$ кпк. Можно отметить, что оценки параметров, которые указаны в табл. 1, а также в решении (13) получены с меньшими ошибками. Это достигнуто нами путем использования большего количества источников, применения ограничения на величину относительной ошибки параллаксов мазеров (менее 10%), а также критериев (12).

В работе Рида и др. (2019) был произведен кинематический анализ выборки из 147 мазеров. В отличие от нашего подхода, эти авторы применяли разложение в ряд линейной скорости вращения Галактики. В итоге они получили оценки $R_0 = 8.15 \pm 0.15$ кпк и $\Omega_\odot = 30.32 \pm 0.27$ км/с/кпк, где Ω_\odot — это угловая скорость вращения именно Солнца.

Интересно также отметить результаты анализа собственных движений и тригонометрических параллаксов выборки из 9750 OB2-звезд, которые были получены в работе Бобылева, Байковой (2022). Для поиска МНК-решения было использовано одно условное уравнение вида (4) с участием лишь одной компоненты скоростей V_i . В итоге были найдены скорости $(U, V)_\odot = (7.17, 7.37) \pm (0.16, 0.24)$ км/с, а также:

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 29.700 \pm 0.076 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -4.008 \pm 0.022 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.671 \pm 0.011 \text{ км/с/кпк}^3,\end{aligned}$$

где $V_0 = 240.6 \pm 3.0$ км/с (для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк).

Имеется хорошее согласие перечисленных оценок параметров вращения Галактики, полученных различными авторами, с результатами, указанными в табл. 1 и в решении (13). В отношении же значений скоростей U_\odot и V_\odot полного согласия нет.

Ошибка единицы веса σ_0 , которую находим в результате поиска МНК-решения кинематических уравнений, вычисляется как средневзвешенное из невязок. Таким образом, эта величина является средней по трем координатам дисперсией скоростей звезд. Из табл. 1 и решения (13) можем видеть, что как при использовании только собственных движений мазеров, так и при использовании их лучевых скоростей, значения σ_0 сопоставимы, и не превышают 10 км/с. Здесь свою роль выполняют ограничения (12), но главным образом работают ограничения на относительные ошибки параллаксов.

Например, в работе Бобылева и др. (2020) была проанализирована выборка мазеров из 239 источников (практически всех имеющихся на тот момент измерений) без использования особых ограничений, где σ_0 составила 12.8 км/с, что характерно, скорее, для более старых звезд, например, для классических цефеид.

При этом были получены следующие оценки групповой скорости выборки мазеров $U_\odot = 7.79^{+1.23}_{-1.27}$ км/с, $V_\odot = 15.04^{+1.24}_{-1.25}$ км/с, $W_\odot = 8.57^{+1.18}_{-1.23}$ км/с и параметров кривой вращения Галактики:

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 29.01^{+0.33}_{-0.34} \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -3.901^{+0.068}_{-0.069} \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.831^{+0.032}_{-0.032} \text{ км/с/кпк}^3, \\ \Omega'''_0 &= -0.104^{+0.018}_{-0.019} \text{ км/с/кпк}^4,\end{aligned}$$

а также найдено $R_0 = 8.15^{+0.04}_{-0.20}$ кпк. Можем и здесь отметить, что в настоящей работе компоненты групповой скорости и параметры галактического вращения оцениваются с меньшими ошибками.

Далее была сформирована локальная выборка мазеров из 104 источников, отобранных при ограничении на гелиоцентрическое расстояние $r < 3$ кпк. Кинематические параметры, найденные по этой выборке, даны в табл. 2. Условные уравнения решались двумя способами. Здесь скорости V_b не исключались, так как звезды являются близкими, поэтому имеют высоты b , достаточные для уверенного определения искомым неизвестных модели. Можем видеть возросшее значение Ω_0 по сравнению с найденными выше по выборкам более далеких мазеров. Этот эффект, скорее всего,

Таблица 2. Кинематические параметры, найденные по 104 мазерным источникам, расположенным не далее 3 кпк от Солнца

Параметры	$V_r + V_i + V_b$	$V_i + V_b$
U_\odot , км/с	11.90 ± 0.91	12.21 ± 1.85
V_\odot , км/с	14.14 ± 0.93	12.49 ± 1.08
W_\odot , км/с	9.29 ± 0.75	8.79 ± 0.72
Ω_0 , км/с/кпк	33.5 ± 1.0	32.2 ± 1.4
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.55 ± 0.16	-4.20 ± 0.24
Ω''_0 , км/с/кпк ³	1.20 ± 0.13	0.99 ± 0.14
σ_0 , км/с	7.6	6.9
V_0 , км/с	271 ± 9	261 ± 12

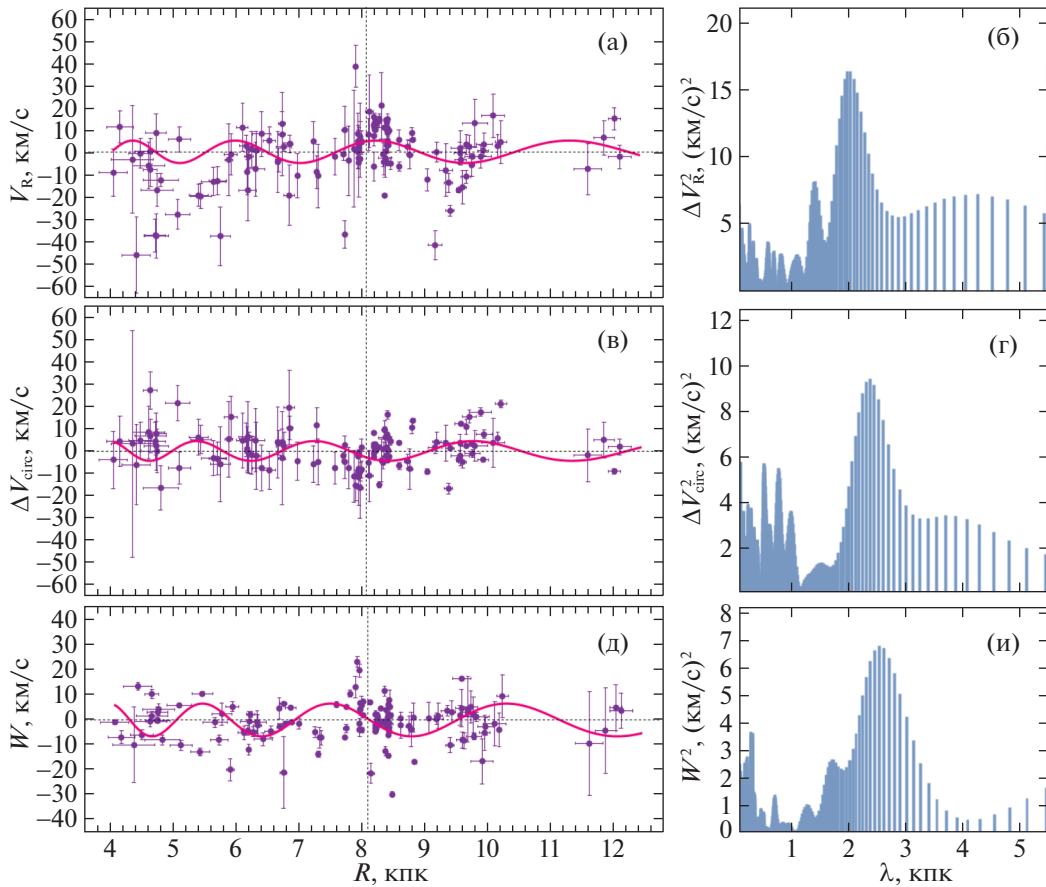


Рис. 3. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R (а) и их спектр мощности (б), остаточные скорости вращения ΔV_{circ} в зависимости от расстояния R (в) и их спектр мощности (г), вертикальные скорости W в зависимости от расстояния R (д) и их спектр мощности (е) сплошные волнистые линии отражают результаты спектрального анализа. Здесь использованы 134 мазерных источника с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%, расположенных не далее 5 кпк от Солнца.

вызван влиянием мазеров и радиозвезд, принадлежащих структуре Пояса Гулда. Главный результат, полученный при этом подходе, заключается в том, что найденное в последнем столбце табл. 2 значение ошибки единицы веса $\sigma_0 = 6.9$ км/с является очень маленькой величиной. Это говорит о том, что мы имеем дело с популяцией очень молодых объектов. При использовании все более далеких выборок звезд значение этой величины возрастает, что объясняется совместным влиянием ошибок тригонометрических параллаксов и ошибок собственных движений звезд.

Спектральный анализ

Раздельные решения. Для спектрального анализа были использованы данные о 134 мазерах из окосолнечной окрестности радиусом 5 кпк. Здесь мы немного сократили размер выборки по следующим соображениям. Согласно теории волн плотности Линя, Шу (1984), амплитуды скоростей

радиальных и тангенциальных возмущений не постоянные. Действительно, спиральный узор вращения твердотельно, поэтому в области коротации разница линейных скоростей вращения Галактики и узора нулевая, а в области концов центрального бара она максимальная. Эффект повышенной дисперсии скоростей при $R \sim 4$ кпк можно заметить на рис. 2а и 2б, который особенно заметен в радиальных скоростях. При анализе тангенциальных скоростей полезно сократить радиус выборки — лучше использовать такой интервал R , где кривая галактического вращения наиболее близка к плоской.

При раздельном спектральном анализе радиальных V_R , остаточных тангенциальных ΔV_{circ} и вертикальных скоростей мазеров были получены следующие оценки:

$$f_R = 8.1 \pm 1.4 \text{ км/с,}$$

$$f_\theta = 6.1 \pm 1.7 \text{ км/с,}$$

$$f_W = 5.2 \pm 1.5 \text{ км/с,}$$

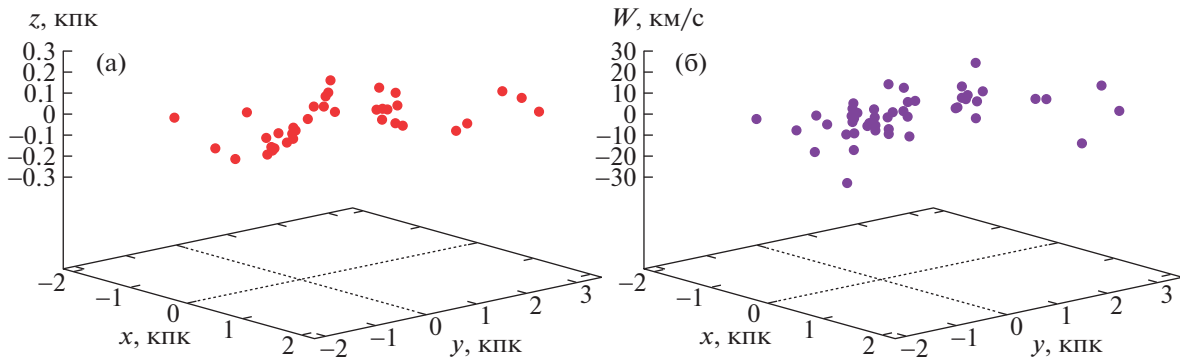


Рис. 4. Трехмерное распределение мазеров и радиозвезд, принадлежащих Местному рукаву (а), и их вертикальные скорости (б).

$$\begin{aligned}\lambda_R &= 2.1 \pm 0.3 \text{ кпк}, \\ \lambda_\theta &= 2.4 \pm 0.8 \text{ кпк}, \\ \lambda_W &= 2.6 \pm 0.7 \text{ кпк}, \\ (\chi_\odot)_R &= -158 \pm 15^\circ, \\ (\chi_\odot)_\theta &= -140 \pm 18^\circ, \\ (\chi_\odot)_W &= -180 \pm 18^\circ,\end{aligned}$$

Результаты такого анализа отражены на рис. 3.

Интересно отметить величину значимости (sig) главного пика в каждом из отмеченных на рис. 3 случаях: $\text{sig}_R = 0.9997$, $\text{sig}_\theta = 0.9408$ и $\text{sig}_W = 0.8386$. Эти значения говорят о том, что наиболее надежно определены параметры спиральной волны плотности по радиальным скоростям V_R и наименее надежно — по вертикальным скоростям W .

В то же время наличие периодичности в вертикальных скоростях мазеров является важным результатом настоящей работы. Дело в том, что в классической теории волн плотности Линя и Шу (1964) вертикальные скорости звезд не рассматриваются. В работе Бобылева, Байковой (2015) на основе спектрального анализа впервые была обнаружена периодичность в вертикальных скоростях мазеров с длиной волны $\lambda_W = 3.4 \pm 0.7$ кпк и амплитудой $f_W = 4.3 \pm 1.2$ км/с.

В настоящее время известно наличие скоростей вертикальных возмущений различной природы в диске Галактики (Лопес-Корредойра и др., 2014; Видроу и др., 2014; Антоха и др., 2018; Ванг и др., 2020; Туласидхаран и др., 2021). Это могут быть крупномасштабные возмущения, связанные с искривлением галактического диска, вызванные как гравитационным влиянием какого-либо внешнего фактора, так и негравитационным, например, падение на диск или близкий пролет карликовой галактики-спутника Млечного Пути, либо сгустка темной материи большой массы. Могут быть и возмущения вертикальных скоростей, связанные с

собственными колебаниями диска или с влиянием крупномасштабных магнитных полей и др.

Отметим, что в локальной области из анализа распределения молекулярных облаков недавно обнаружена волна Рэдклиффа (Алвес и др., 2020), распространяющаяся вдоль Местного рукава. По мнению Алвеса и др. (2020), волна имеет длину волны около 2 кпк с амплитудой около 160 пк и является затухающей. Природа возникновения этой волны пока не установлена.

Мы отобрали мазеры и радиозвезды, принадлежащие Местному рукаву. Эти источники отлично видны вблизи Солнца на рис. 1 в виде довольно узкой цепочки. При отборе мы считали, что источники Местного рукава расположены не далее 3.5 кпк от Солнца, и ограничены двумя параллельными линиями: $x = 0.286y - 0.8$ и $x = 0.286y + 0.3$. Всего в этой выборке оказалось 68 источников, подавляющее большинство из которых являются маломассивными звездами типа Т Тельца. По данным об отобранных звездах построен рис. 4. В положениях звезд на рис. 4а отлично видна волна Рэдклиффа. Ярко выраженной волны в распределении вертикальных скоростей отобранных звезд (рис. 4б) не наблюдается.

В итоге мы склоняемся к тому, что волна в вертикальных скоростях мазеров, скорее, связана с более крупномасштабным явлением, например, с влиянием спиральной волны плотности (рис. 3д). Можно также отметить работу Мартинеса-Медины и др. (2022), где показано наличие отличных от шумов крупномасштабных особенностей в распределении вертикальных скоростей молодых звезд из каталога Gaia EDR3, связанных с галактической спиральной структурой. Причем наиболее заметная особенность отмечена этими авторами при $R \sim 9.5$ кпк, т.е. вытянутость в районе рукава Персея.

Совместное решение. При совместном спектральном анализе радиальных V_R и остаточных тангенциальных ΔV_{circ} скоростей предполагается,

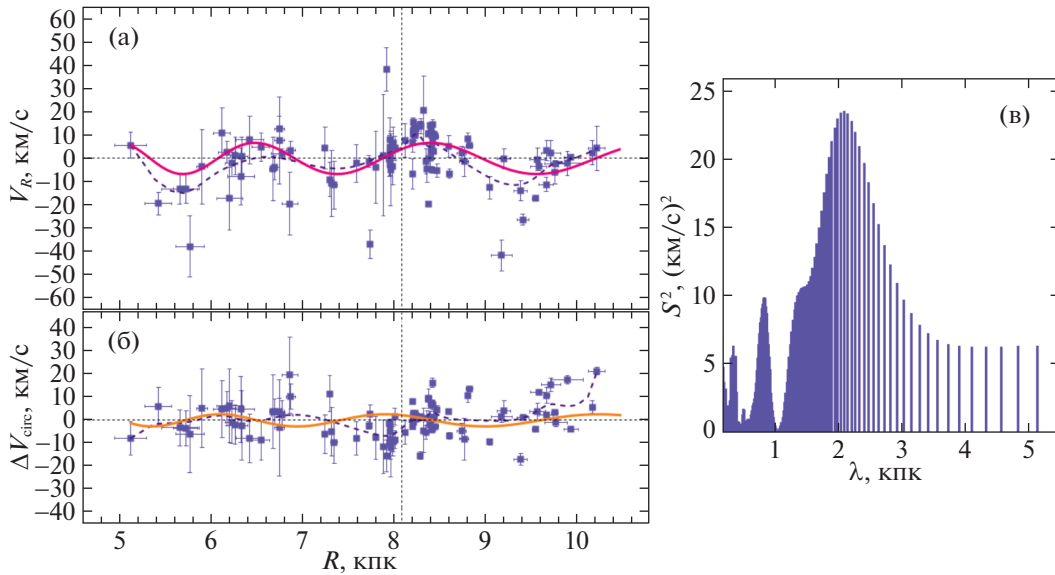


Рис. 5. Радиальные скорости V_R (а) и остаточные скорости вращения ΔV_{circ} (б) в зависимости от расстояния R , а также их спектр мощности (в), усреднение данных показано пунктирными линиями; сплошные волнистые линии отражают результаты спектрального анализа. Здесь использованы 104 мазерных источника с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10%, расположенных не далее 3 кпк от Солнца.

что имеется одно значение длины волны и фазы Солнца в волне плотности для обоих видов скоростей.

По данным о 134 мазерах из околосолнечной окрестности радиусом 5 кпк с относительными ошибками тригонометрических параллаксов менее 10% были получены следующие оценки: $f_R = 6.1 \pm 1.3$ км/с, $f_\theta = 3.2 \pm 1.4$ км/с и $\lambda = 2.1 \pm 0.3$ кпк, $\chi_\odot = -141 \pm 15^\circ$. Значимость главного пика на спектре мощности найдена равной $\text{sig} = 0.99991$.

Отметим, что применяемый спектральный анализ учитывает как логарифмический характер спиральной волны плотности, так и распределение позиционных углов объектов. В логарифмической волне длина волны является переменной величиной — она возрастает с увеличением R . При этом оценка параметров $\lambda, f_{\{R,\theta,W\}}, \chi_\odot$ относится к локальной области — к области вблизи Солнца. Как видно из распределения мазеров в проекции на Галактическую плоскость XU на рис. 1, практически в выборке представлены только два отрезка спиральных рукавов, Киля—Стрельца и Персея. Поэтому мы решили провести спектральный анализ и по локальной выборке, которая как раз и охватывает этот район. При этом для формирования остаточных скоростей вращения была использована кривая вращения Галактики, параметры которой были найдены по выборке из 150 мазеров (рис. 2б). В итоге по 104 мазерам были получены следующие оценки:

$$f_R = 6.7 \pm 1.1 \text{ км/с}, \quad (14)$$

$$f_\theta = 2.6 \pm 1.2 \text{ км/с},$$

$$\lambda = 2.1 \pm 0.3 \text{ кпк},$$

$$\chi_\odot = -148 \pm 15^\circ.$$

Результаты этого спектрального анализа отражены на рис. 5, где значимость главного пика на спектре мощности составляет $\text{sig} = 0.99999$. Здесь значение sig немного выше, чем в предыдущем случае, найденном при анализе более широкой околосолнечной окрестности.

На рис. 5, помимо найденных периодичностей, отмеченных жирными линиями, пунктирными линиями даны усредненные значения наблюдаемых скоростей мазеров. На больших расстояниях от Солнца сравнение таких линий не имеет особого смысла из-за наличия больших значений позиционных углов некоторых источников. Но в локальной околосолнечной окрестности (охватывающей два ближайших к Солнцу отрезка спиральных рукавов гранд-дизайна) такое сравнение имеет смысл. Как можно видеть из рис. 5а, имеется прекрасное согласие между жирной и пунктирной линиями, что говорит о надежности найденных значений λ, f_R, χ_\odot . В тангенциальных скоростях имеем существенно худшее согласие между такими линиями, но и амплитуда f_θ здесь очень мала.

В табл. 3 представлены оценки параметров галактической спиральной волны плотности, полученные по наиболее важным трассерам спиральной структуры. Как следует из этой сводки, значение f_θ обычно имеет меньшее значение по сравнению с f_R .

Таблица 3. Оценки параметров галактической спиральной волны плотности, найденные различными авторами

Выборка	Ref	f_R , км/с	f_θ , км/с	λ , кпк	$ i $, град.	χ_\odot , град.	m
ОВ-зв., цеф., РЗС	[1]	3.6 ± 0.4	4.7 ± 0.6		4.2 ± 0.2	-165 ± 1	2
Цефеиды	[2]	6.3 ± 2.4	4.4 ± 2.4		6.8 ± 0.7	-70 ± 16	2
Цефеиды	[3]	3.5 ± 1.7	7.5 ± 1.8		11.4	-20 ± 9	4
ОВ-ассоциации	[4]	6.6 ± 1.4	1.8 ± 1.4	2.0 ± 0.2			
Цефеиды	[5]	6.7 ± 2.3	1.4 ± 1.6		6.0 ± 0.7	-85 ± 15	2
РЗС	[5]	5.5 ± 2.3	0.2 ± 1.6		12.2 ± 0.7	-88 ± 15	4
ОВ-звезды	[5]	6.6 ± 2.5	0.4 ± 2.3		6.6 ± 0.9	-97 ± 18	2
РЗС, НI, НII	[6]	5.9 ± 1.1	4.6 ± 0.5	2.1 ± 0.5		-119	
Мазеры	[7]	7.7 ± 1.6		2.2 ± 0.3	5.0 ± 0.5	-147 ± 10	2
Мазеры	[8]	6.9 ± 1.4	2.8 ± 1.0		10.4 ± 0.3	-125 ± 10	4
ОВ-звезды	[9]	7.1 ± 0.3	6.5 ± 0.4	2.8 ± 0.2		-128 ± 6	4
РЗС	[10]	4.6 ± 0.7	1.1 ± 0.4				4
ОВ-звезды	[11]	4.8 ± 0.7	4.1 ± 0.9	2.1 ± 0.2	9.4 ± 0.9	-116 ± 12	4
Настоящая работа		6.7 ± 1.1	2.6 ± 1.2	2.1 ± 0.3	9.4 ± 1.0	-148 ± 15	4

Примечание. [1] — Бил, Овенден (1978); [2] — Мишуоров и др. (1997); [3] — Мишуоров, Зенина (1999); [4] — Мельник и др. (2001); [5] — Заболотских и др. (2002); [6] — Бобылев и др. (2008); [7] — Байкова, Бобылев (2012); [8] — Расторгуев и др. (2017); [9] — Бобылев, Байкова (2018); [10] — Локтин, Попова (2019); [11] — Бобылев, Байкова, (2022).

В первую очередь необходимо отметить результаты, полученные с использованием цефеид (Мишуоров и др., 1997; Мишуоров, Зенина, 1999; Заболотских и др., 2002). Они интересны тем, что расстояния до этих звезд определяют независимую шкалу расстояний, так как они оцениваются на основе соотношения период—светимость. Случайные ошибки определения расстояний этим способом составляют 10–15% (Бердников и др., 2000). Самые последние оценки расстояний до классических цефеид с использованием фотометрических данных и калибровок в ближнем инфракрасном диапазоне позволяют говорить о случайных ошибках около 5% (Сковрон и др., 2019).

Несомненный интерес представляют и результаты, полученные с использованием ОВ-звезд (Бил, Овенден, 1978; Заболотских и др., 2002; Бобылев, Байкова, 2018). Важным фактором при оценке кинематических параметров является как точность расстояний, так и точность собственных движений. Некоторые современные оценки, указанные в таблице, получены с использованием данных из каталога Gaia EDR3 (Браун и др., 2021).

Расстояния до ОВ-ассоциаций и РЗС более точные по сравнению с расстояниями до одиночных

звезд, поэтому и найденные по ним параметры должны быть более надежными (Мельник и др., 2001; Заболотских и др., 2002; Бобылев и др., 2008; Локтин, Попова, 2019).

Наконец, в таблице имеются и оценки, полученные с использованием различных выборок мазеров с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими параллаксами и собственными движениями (Байкова, Бобылев, 2012; Расторгуев и др., 2017).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен кинематический анализ большой выборки галактических мазерных источников и радиозвезд с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами и собственными движениями. При этом рассматривались только мазеры с относительными ошибками тригонометрических параллакссов менее 10%.

При оценке параметров вращения Галактики рассмотрены различные методы решения основных кинематических уравнений — с учетом и без учета лучевых скоростей, а также с использованием и без использования мазеров из области Пояса Гулда. Здесь мы ориентировались на значение ошибки

единицы веса σ_0 , которую можно рассматривать как среднюю по трем направлениям дисперсию пространственных скоростей мазеров. При анализе выборки далеких мазеров показано, что как при использовании только их собственных движений, так и при добавлении лучевых скоростей значения σ_0 близки между собой, их значения не превышают 10 км/с.

В результате совместного решения системы кинематических уравнений с использованием 150 мазеров из области Галактики $R > 4$ кпк найдены компоненты групповой скорости $(U, V, W)_\odot = (9.15, 12.81, 8.93) \pm (0.86, 0.86, 0.75)$ км/с и следующие параметры угловой скорости вращения Галактики:

$$\begin{aligned}\Omega_0 &= 30.18 \pm 0.38 \text{ км/с/кпк}, \\ \Omega'_0 &= -4.368 \pm 0.077 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \Omega''_0 &= 0.845 \pm 0.037 \text{ км/с/кпк}^3,\end{aligned}$$

где ошибка единицы веса σ_0 составила 8.9 км/с и $V_0 = 244.4 \pm 4.3$ км/с для принятого значения $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. С параметрами этой кривой вращения Галактики находим остаточные тангенциальные скорости.

Рассмотрена кинематика локальной выборки из 104 мазеров, расположенных в области радиусом 3 кпк вокруг Солнца. Показано, что параметры галактического вращения по этой выборке определяются с большими ошибками. Здесь имеется сильное влияние объектов из Пояса Гулда. Это приводит к завышенной, по-нашему мнению, оценке угловой скорости вращения $\Omega_0 = 33.5 \pm \pm 1.0$ км/с/кпк, следовательно, к завышенному значению линейной скорости вращения $V_0 = 271 \pm \pm 9$ км/с. Положительным эффектом кинематического анализа этой выборки мазеров является маленькое значение ошибки единицы веса $\sigma_0 = 6.9$ км/с. Это означает, что рассматриваемые в настоящей работе мазеры и радиозвезды действительно являются представителями наиболее молодой популяции звезд и протозвезд, принадлежащих тонкому диску Галактики. Для более далеких мазеров формальная оценка дисперсии их скоростей возрастает за счет влияния измерительных ошибок тригонометрических параллакс и ошибок их собственных движений (случайные ошибки лучевых скоростей звезд практически не зависят от расстояния).

Для оценки параметров спиральной волны плотности применялся спектральный анализ скоростей различных выборок мазеров. Для этого использовались как отдельные, так и совместные решения. Раздельный спектральный анализ применен к радиальным V_R , остаточным тангенциальным ΔV_{circ} и вертикальным W скоростям мазеров.

По данным о 134 мазерах из околосолнечной окрестности радиусом 5 кпк получены следующие оценки:

$$\begin{aligned}f_R &= 8.1 \pm 1.4 \text{ км/с}, \\ f_\theta &= 6.1 \pm 1.7 \text{ км/с}, \\ f_W &= 5.2 \pm 1.5 \text{ км/с}, \\ \lambda_R &= 2.1 \pm 0.3 \text{ кпк}, \\ \lambda_\theta &= 2.4 \pm 0.8 \text{ кпк}, \\ \lambda_W &= 2.6 \pm 0.7 \text{ кпк}, \\ (\chi_\odot)_R &= -158 \pm 15^\circ, \\ (\chi_\odot)_\theta &= -140 \pm 18^\circ, \\ (\chi_\odot)_W &= -180 \pm 18^\circ.\end{aligned}$$

Мы рассматриваем логарифмическую волну, когда длина этой волны возрастает с увеличением галактоцентрического расстояния R . Поэтому полученные оценки λ относятся к околосолнечной окрестности, где λ является расстоянием между отрезками спиральных рукавов Киля—Стрельца и Персея.

Важно отметить, что в вертикальных скоростях мазеров подтверждено наличие периодических возмущений, впервые обнаруженных в работе Бобылева, Байковой (2015). Найденные значения амплитуды возмущений f_W и длины волны λ_W близки к аналогичным значениям, полученным по радиальным и остаточным тангенциальным скоростям. Это говорит в пользу представления о влиянии спиральной волны плотности и на вертикальные скорости звезд.

Согласно классической линейной теории галактической спиральной волны плотности Линя и Шу (1964), можно ожидать наличие одного значения длины волны λ (следовательно, и фазы Солнца в волне χ_\odot) как для радиальных, так и для остаточных тангенциальных скоростей. Вертикальные скорости в этой теории не рассматривались. Здесь же мы видим лишь удовлетворительное согласие в оценке $\lambda_{R,\theta,W}$.

Интересно отметить, что по локальной выборке из 104 мазеров неплохо определяются локальные параметры спиральной волны плотности. Так, в результате совместного спектрального анализа радиальных V_R и остаточных тангенциальных ΔV_{circ} скоростей мазеров, были получены следующие оценки:

$$\begin{aligned}f_R &= 6.7 \pm 1.1 \text{ км/с}, \\ f_\theta &= 2.6 \pm 1.2 \text{ км/с}, \\ \lambda &= 2.1 \pm 0.3 \text{ кпк}, \\ \chi_\odot &= -148 \pm 15^\circ.\end{aligned}$$

Рассмотрена выборка из 68 мазеров и радиозвезд, принадлежащих Местному рукаву. Подтверждено наличие волны Рэджклиффа в пространственном распределении этих источников.

Авторы благодарны Ю.Н. Мишурову за полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абутер и др. (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, N. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **625**, L10 (2019).
- Абутер и др. (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A59 (2021).
- Алвес и др. (J. Alves, C. Zucker, A.A. Goodman, et al.), *Nature* **578**, 237 (2020).
- Антоха и др. (T. Antoja, A. Helmi, M. Romero-Gomez, et al.), *Nature* **561**, 360 (2018).
- Бердников и др. (L.N. Berdnikov, A.K. Dambis and O.V. Vozyakova), *Astron. Astrophys. Suppl.* **143**, 211 (2000).
- Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **38**, 617 (2012) [A.T. Bajkova, V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **38**, 549 (2012)].
- Биан и др. (S.B. Bian, Y. Xu, J.J. Li, Y.W. Wu, B. Zhang, X. Chen, Y.J. Li, Z.H. Lin, et al.), *Astron. J.* **163**, 54 (2022).
- Бил, Овенден (J. Byl and M.W. Ovenden), *Astrophys. J.* **225**, 496 (1978).
- 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)].
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **408**, 1788 (2010).
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **437**, 1549 (2014).
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **447**, L50 (2015).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **44**, 739 (2018) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Lett.* **44**, 676 (2018)].
- Бобылев В.В., Крисанова О.И., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **46**, 470 (2020) [V.V. Bobylev, O.I. Krisanova, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **46**, 439 (2020)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **48**, 184 (2022) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **48**, 169 (2022)].
- Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1 (2021).
- Ванг и др. (H.-F. Wang, M. López-Corredoira, Y. Huang, J. Chang, H.-W. Zhang, J. L. Carlin, et al.), *Astrophys. J.* **897**, 119 (2020).
- Видроу и др. (L.M. Widrow, J. Barber, M.H. Chequers, and E. Cheng), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **440**, 1971 (2014).
- Ву и др. (Y.W. Wu, M.J. Reid, N. Sakai, T.M. Dame, K.M. Menten, A. Brunthaler, Y. Xu, J.J. Li, et al.), *Astrophys. J.* **874**, 13 (2019).
- Гайи и др. (P.A.B. Galli, L. Loinard, G.N. Ortiz-Léon, M. Kounkel, S.A. Dzib, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, L. Hartmann, et al.), *Astrophys. J.* **859**, 33 (2018).
- 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)].
- Иммер и др. (K. Immer, J. Li, L.H. Quiroga Nuñez, M.J. Reid, B. Zhang, L. Moscadelli, and K.L.J. Rygl), *Astron. Astrophys.* **632**, A123 (2019).
- Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
- Локтин А.В., Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. **74**, 289 (2019) [A.V. Loktin, M.E. Popova, *Astrophys. Bull.* **74**, 270 (2019)].
- Лопес-Корредойра и др. (M. López-Corredoira, H. Abedi, F. Garzón, and F. Figueras), *Astron. Astrophys.* **572**, A101 (2014).
- Лутц, Келкер (T.E. Lutz and D.H. Kelker), *Pub. Astron. Soc. Pacific* **85**, 573 (1973).
- Мартинес-Медина и др. (L. Martinez-Medina, A. Pérez-Villegas, and A. Peimbert), *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **512**, 1574 (2022).
- Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 611 (2001) [A.M. Mel'nik, et al., *Astron. Lett.* **27**, 521 (2001)].
- Мишуров и др. (Yu.N. Mishurov, I.A. Zenina, A.K. Dambis, A.M. Mel'nik, and A.S. Rastorguev), *Astron. Astrophys.* **323**, 775 (1997).
- Мишуров, Зенина (Yu.N. Mishurov and I.A. Zenina), *Astron. Astrophys.* **341**, 81 (1999).
- Никифоров И.И., Веселова А.В., Письма в Астрон. журн. **44**, 102 (2018) [I.I. Nikiforov, A.V. Veselova, *Astron. Lett.* **44**, 81 (2018)].
- Орtiz-Леон и др. (G.N. Ortiz-León, L. Loinard, S.A. Dzib, P.A.B. Galli, M. Kounkel, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, R.M. Torres, et al.), *Astrophys. J.* **865**, 73 (2018).
- Орtiz-Леон и др. (G.N. Ortiz-León, K.M. Menten, T. Kaminski, A. Brunthaler, M.J. Reid, and R. Tyllenda), *Astron. Astrophys.* **638**, 17 (2020).
- Расторгуев А.С., Заболотских М.В., Дамбис А.К., Уткин Н.Д., Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрофиз. Бюллетень **72**, 134 (2017) [A.S. Rastorguev, et al., *Astrophys. Bulletin* **72**, 122 (2017)].

36. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, and Y. Xu), *Astrophys. J.* **705**, 1548 (2009).
37. Рид и др. (M.J. Reid, N. Dame, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
38. Сакаи и др., (N. Sakai, M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, and T.M. Dame), *Astrophys. J.* **876**, 30 (2019).
39. Сакаи и др. (N. Sakai, T. Nagayama, H. Nakanishi, N. Koide, T. Kurayama, N. Izumi, T. Hirota, T. Yoshida, et al.), *PASJ* **72**, 53 (2020).
40. Сакаи и др. (N. Sakai, H. Nakanishi, K. Kurahara, D. Sakai, K. Hachisuka, J.-S. Kim, and O. Kameya), *PASJ* **74**, 209 (2022).
41. Санна и др. (A. Sanna, M.J. Reid, T.M. Dame, K.M. Menten, and A. Brunthaler), *Science* **358**, 227 (2017).
42. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
43. Степанищев А.С., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **39**, 211 (2013) [Stepanishchev A.S., and Bobylev V.V., *Astron. Lett.* **39**, 185 (2013)].
44. 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).
45. Сюй и др. (Y. Xu, S.B. Bian, M.J. Reid, J.J. Li, K.M. Menten, T. M. Dame, B. Zhang, A. Brunthaler, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **253**, 9 (2021).
46. Туласидхаран и др. (L. Thulasidharan, E. D’Onghia, E. Poggio, et al.), arXiv: 2112.08390 (2021).
47. Хирота и др. (VERA collaboration, T. Hirota, T. Nagayama, M. Honma, Y. Adachi, R.A. Burns, J.O. Chibueze, Y.K. Choi, K. Hachisuka, et al.), *PASJ* **70**, 51 (2020).
48. Хонма и др. (M. Honma, T. Nagayama, K. Ando, T. Bushimata, Y.K. Choi, T. Handa, T. Hirota, H. Imai, et al.), *PASJ* **64**, 136 (2012).