# ИЗУЧЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИКИ ПО ДАННЫМ О МАЗЕРАХ И РАДИОЗВЕЗДАХ С РСДБ-ИЗМЕРЕНИЯМИ ИХ ПАРАЛЛАКСОВ

© 2020 г. В. В. Бобылев<sup>1\*</sup>, О. И. Крисанова<sup>2</sup>, А. Т. Байкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Россия <sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия Поступила в редакцию 02.06.2020 г.

После доработки 02.06.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

По литературным данным сформирована выборка из 256 радиоисточников, тригонометрические параллаксы и собственные движения которых измерены РСДБ-методом. Эта выборка содержит галактические мазеры, ассоциируемые с массивными протозвездами и звездами в областях активного звездообразования. В нее также включены молодые маломассивные звезды из области пояса Гулда, радионаблюдения которых осуществлялись в континууме. По этой, наиболее полной на данный момент выборке источников, получены оценки скоростей  $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$  и параметров угловой скорости вращения Галактики  $\Omega_0, \Omega_0^{(1)}, \ldots, \Omega_0^{(4)},$  а также получена новая оценка расстояния от Солнца до центра Галактики  $R_0 = 8.15^{+0.04}_{-0.20}$  кпк. По рядам радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных  $\Delta V_{\rm circ}$  скоростей звезд найдены параметры галактической спиральной волны плотности. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили  $f_R = 7.0 \pm 0.9$  км/с и  $f_{\theta} = 3.8 \pm 1.1$  км/с, длина волны возмущений  $\lambda_R = 2.3 \pm 0.2$  кпк и  $\lambda_{\theta} = 2.0 \pm 0.4$  кпк, фаза Солнца в спиральной волне ( $\chi_{\odot}$ ) $_R = -163^{\circ} \pm 9^{\circ}$  и ( $\chi_{\odot}$ ) $_{\theta} = -137^{\circ} \pm 10^{\circ}$  для принятой четырехрукавной модели спирального узора.

Ключевые слова: мазеры, области звездообразования, спиральная структура, вращение Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010820070037

## ВВЕДЕНИЕ

Использование данных о молодых объектах позволяет получить важную информацию о кинематических свойствах диска Галактики. К таким объектам относятся, например, облака нейтрального водорода в тангенциальных точках, лучевые скорости которых играют важную роль при построении кривой вращения Галактики во внутренней ее области. Важны классические цефеиды, реализующие независимую шкалу расстояний, основанную на использовании зависимости периодсветимость. Интерес также представляют рассеянные звездные скопления и OB-ассоциации.

Современные астрометрические РСДБ-измерения позволили достичь очень высокой точности определения кинематических характеристик источников мазерного излучения. Так, ошибка определения тригонометрических параллаксов мазеров на частоте 22 ГГц в среднем составляет около 0.01 мсд (миллисекунд дуги) и около 0.01 мсд/год (миллисекунд дуги в год) для их собственных движений при периоде наблюдений около двух и более лет Значения параметров вращения Галактики и параметров ее спиральной структуры с использованием данных о мазерах определялись в работах Рида и др. (20146; 2016; 2019), Бобылева, Байковой (2013; 2014а), Расторгуева и др. (2017), Хонмы и др. (2018), Хироты и др. (2020). Больше всего мазерных источников измерено в Местном рукаве, поэтому его параметры определены достаточно надежно (Сюй и др., 2013; Бобылев, Байкова, 2014в). Неплохо также определяются параметры спирального рукава Персея (Сакаи и др., 2015; Рид и др., 2019).

В последнее время при использовании большого количества мазеров достаточно уверенно определяется значение расстояния от Солнца до центра Галактики *R*<sub>0</sub>, близкое к 8 кпк (Рид и др., 2019; Хирота и др., 2020). Значение линейной круговой скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики, определяемой по мазерам, близко к 240 км/с

<sup>(</sup>Рид, Хонма, 2014а). На данный момент такие наземные РСДБ-измерения тригонометрических параллаксов являются более точными по сравнению со спутниковыми измерениями Gaia (Прусти и др., 2016; Браун и др., 2018).

<sup>\*</sup>Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

(Расторгуев и др., 2017; Рид и др., 2019; Хирота и др., 2020). Такая скорость является характерной для самых молодых объектов галактического диска. В работе Рида и др. (2019) данные о мазерах послужили для уточнения параметров ориентации галактической плоскости. В целом с мазерными источниками связаны большие ожидания в уточнении структурных и динамических параметров Галактики. Например, в работе Хонмы и др. (2015) показано, что значения  $R_0$  и  $V_0$  будут определены с ошибками около 1% при использовании выборки из 500 мазеров.

Локальные параметры вращения Галактики известны уже довольно хорошо. Достигнуто это благодаря использованию массовых измерений тригонометрических параллаксов и собственных движений звезд таких каталогов, как Hipparcos (1997) и Gaia. Только мазерные источники позволяют в настоящее время проследить структуру и кинематику галактического диска в очень широком интервале галактоцентрических расстояний *R*. Классические цефеиды могут составить "конкуренцию" мазерам, но это звезды уже более возрастные, и, например, они не так явно связаны со спиральной структурой.

Целями настоящей работы являются: a) создание на основе литературных данных базы данных о радиоисточниках, тригонометрические параллаксы и собственные движения которых измерены РСДБ-методом и б) оценка параметров вращения Галактики с использованием этих данных.

## МЕТОД

## Основные уравнения

Из наблюдений известны следующие величины: прямое восхождение и склонение —  $\alpha$  и  $\delta$ , параллакс  $\pi$ , собственные движения по прямому восхождению и склонению —  $\mu_{\alpha} \cos \delta$  и  $\mu_{\delta}$ , лучевая скорость  $V_r$ . От  $\alpha$  и  $\delta$  не сложно перейти к галактическим долготе и широте l и b; параллакс дает гелиоцентрическое расстояние r, так как  $r = 1/\pi$ ; данные собственные движения можно перевести в собственные движения в галактической системе координат —  $\mu_l \cos b$  и  $\mu_b$ . Таким образом, мы знаем 3 составляющие скорости звезды:  $V_r$  и 2 проекции тангенциальной скорости —  $V_l = kr\mu_l \cos b$  и  $V_b =$  $= kr\mu_b$ , где k = 4.74 км/с, и  $V_r$ ,  $V_l$ ,  $V_b$  выражены в км/с (собственные движения даны в мсд/год, а гелиоцентрические расстояния — в кпк).

Рассмотрим кинематическую модель Галактики с предположением, что центроиды движутся по круговым орбитам вокруг оси симметрии Галактики в плоскостях, параллельных ее основной плоскости (т.е. скорость вращения не зависит от высоты объекта *z* над плоскостью диска). В 1924–1925 гг. Ботлингер вывел формулы, описывающие влияние кругового вращения центроидов на наблюдаемые лучевые  $V_r$  и тангенциальные  $\Delta V_{\tau}$  скорости звезд:

$$\Delta V_r = R_0 (\Omega - \Omega_0) \sin l \cos b \tag{1}$$
$$\Delta V_\tau = R_0 (\Omega - \Omega_0) \cos l - \Omega r \cos b,$$

где  $R_0$  — расстояние от Солнца до центра Галактики,  $\Omega(R)$  — угловая скорость вращения Галактики,  $\Omega_0 = \Omega(R_0)$  — угловая скорость вращения Галактики на солнечном круге. Функцию  $\Omega(R)$  можно разложить в ряд Тейлора по степеням  $(R - R_0)$ :

$$\Omega(R) = \Omega(R_0) + \Omega'(R_0)(R - R_0) +$$
  
+  $\Omega''(R_0)(R - R_0)^2/2! + \dots$  (2)

Ограничиваясь *n*-й производной в предыдущем соотношении и учитывая, что в наблюдаемые лучевую и тангенциальную скорости входит пекулярное движение Солнца, можем получить следующую систему уравнений:

$$V_{r} = -U_{\odot} \cos b \cos l - V_{\odot} \cos b \sin l + (3)$$

$$+ R_{0}(R - R_{0}) \sin l \cos b\Omega'_{0} - W_{\odot} \sin b +$$

$$+ R_{0}(R - R_{0})^{2} \sin l \cos b\Omega''_{0}/2 + \dots +$$

$$+ R_{0}(R - R_{0})^{n} \sin l \cos b\Omega_{0}^{(n)}/n!,$$

$$V_{l} = U_{\odot} \sin l - V_{\odot} \cos l - r\Omega_{0} \cos b + (4)$$

$$+ (R - R_{0})(R_{0} \cos l - r \cos b)\Omega'_{0} +$$

$$+ (R - R_{0})^{2}(R_{0} \cos l - r \cos b)\Omega''_{0}/2 + \dots +$$

$$+ (R - R_{0})^{n}(R_{0} \cos l - r \cos b)\Omega''_{0}/n!,$$

$$V_{b} = U_{\odot} \cos l \sin b + V_{\odot} \sin l \sin b - (5)$$

$$-R_0(R - R_0) \sin l \sin b\Omega'_0 - W_\odot \cos b - R_0(R - R_0)^2 \sin l \sin b\Omega''_0/2 - \dots - R_0(R - R_0)^n \sin l \sin b\Omega_0^{(n)}/n!,$$

где  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$  — компоненты пекулярной скорости анализируемой выборки звезд относительно Местного Стандарта Покоя (МСП), где МСП — точка, движущаяся по круговой орбите вокруг центра Галактики, направленные вдоль осей прямоугольной галактической системы координат,  $\Omega_0^{(i)}$  — i-я производная угловой скорости на солнечном круге.

Иногда для простоты скорости  $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$  называют компонентами пекулярной скорости Солнца. Хотя известно, что компонента скорости  $V_{\odot}$  подвержена влиянию такого эффекта, как асимметричный дрейф (эффект отставания центроидов), что выявляется при изучении движений звезд различного возраста. Кроме того, при анализе самых молодых звезд в скоростях  $U_{\odot}$  и  $V_{\odot}$  проявляется влияние галактической спиральной волны плотности (Бобылев, Байкова, 20146).

Уравнения (3)—(5) решаются совместно или по отдельности относительно параметров ( $U_{\odot}$ ,  $V_{\odot}$ ,  $W_{\odot}$ ,  $\Omega_0$ ,  $\Omega'_0$ , ...,  $\Omega_0^{(n)}$ ) при фиксированном значении порядка разложения n и параметра  $R_0$ . Угловая скорость на солнечном радиусе и ее производные в сочетании с  $R_0$  определяют характер кривой вращения в солнечной окрестности, так как:

$$V_{\text{circ}} = R \cdot \Omega(R) = R[\Omega_0 + (R - R_0)\Omega'_0 + (6) + (R - R_0)^2 \Omega''_0 / 2! + \ldots].$$

Также нужно ввести круговую скорость вращения на солнечном радиусе  $V_0$  и две постоянные Оорта A и B:

$$V_0 = \Omega_0 R_0, \tag{7}$$
$$A = -0.5 \Omega'_0 R_0,$$
$$B = -\Omega_0 + A.$$

Прямоугольные компоненты пространственных скоростей звезд вычисляются по формулам:

$$U = V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \quad (8)$$
$$V = V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b,$$
$$W = V_r \sin b + V_b \cos b.$$

С использованием U и V круговая скорость  $V_{\text{сirc}}$ , направленная вдоль вращения Галактики, выражается как:

$$V_{\rm circ} = U\sin\theta + (V_0 + V)\cos\theta, \qquad (9)$$

где угол  $\theta$  удовлетворяет соотношению  $\tan \theta = -Y/X$ , где X и Y — галактоцентрические прямоугольные координаты звезды.

#### Метод наименьших квадратов

Для определения параметров кривой вращения уравнения (3)–(5) решаются совместно или по отдельности взвешенным методом наименьших квадратов (МНК) с весами вида:

$$w_{r} = S_{0} / \sqrt{S_{0}^{2} + \sigma_{V_{r}}^{2}}, \qquad (10)$$
$$w_{l} = S_{0} / \sqrt{S_{0}^{2} + \sigma_{V_{l}}^{2}},$$
$$w_{b} = S_{0} / \sqrt{S_{0}^{2} + \sigma_{V_{b}}^{2}},$$

где  $\sigma_{V_r}$ ,  $\sigma_{V_l}$ ,  $\sigma_{V_b}$  — дисперсии ошибок соответствующих наблюдаемых скоростей,  $S_0$  — "космическая" дисперсия. Значение  $S_0$  сопоставимо со среднеквадратической невязкой  $\sigma_0$  (ошибкой единицы веса), получаемой при решении условных уравнений вида (3)—(5), и в данной работе принимается равным 12 км/с.

Однако при данном подходе необходимо зафиксировать значение нелинейного параметра  $R_0$ . К настоящему моменту имеется ряд исследований, в которых среднее значение расстояния от Солнца до центра Галактики выводится на основе индивидуальных определений этой величины, полученных в последнее десятилетие независимыми методами. Например,  $R_0 = 8.0 \pm 0.2$  кпк (Валле, 2017а),  $R_0 =$  $= 8.3 \pm 0.2$  (стат.)  $\pm 0.4$  (сист.) кпк (де Грийс, Боно, 2017) или  $R_0 = 8.0 \pm 0.3$  кпк ( $2\sigma$ ) (Камарильо и др., 2018).

Также стоит отметить высокоточные измерения R<sub>0</sub>, полученные в последнее время. Например, Абутер и др. (2019) получили  $R_0 = 8.178 \pm$  $\pm\,0.013\,$ (стат.)  $\pm\,0.022\,$ (сист.) кпк из анализа шестнадцатилетнего ряда наблюдений движения звезды S2 вокруг массивной черной дыры  $SgrA^*$  в центре Галактики. На основе независимого анализа орбиты звезды S2 Ду и др. (2019) нашли  $R_0 = 7.946 \pm$  $\pm 0.050$  (стат.)  $\pm 0.032$  (сист.) кпк. Принимая во внимание перечисленные исследования, при решении условных уравнений взвешенным линейным МНК в данной работе расстояние от Солнца до центра Галактики принимается равным  $R_0 = 8.0 \pm$ ± 0.15 кпк. Для исключения грубой погрешности решение уравнений проводится минимум двумя итерациями с исключением крупных невязок по критерию  $3\sigma$ .

Рассмотрим систему условных уравнений в общем виде:

$$y = f(X, \mathbf{a}),\tag{11}$$

где X — известные величины, y — измерения с весами w, a — вектор искомых значений, f — заданная функция. Пусть M — число искомых параметров, а N — число уравнений в системе и N > M. Тогда размерность векторов y и w будет равна N.

Один из методов решения такой системы состоит в численном поиске минимума суммы квадратов невязок:

$$\sigma^{2}(\mathbf{a}) = \frac{1}{N_{\text{free}}} \sum_{j=1}^{N} w_{j} (y_{j} - f(x_{j}, \mathbf{a}))^{2}, \qquad (12)$$

где  $N_{\text{free}} = N - M$ .

Для нашей системы уравнений (3)–(5) вектор искомых параметров представляется в виде

$$\mathbf{a} = (R_0, U_0, V_0, W_0, \Omega_0, \Omega'_0, \dots, \Omega_0^{(n)}).$$
(13)

M = n + 5, где n — порядок разложения по  $\Omega_0$ . N будет равно числу объектов, умноженному на количество компонент наблюдаемых скоростей, участвующих в решаемой системе (например, при получении параметров только по компонентам  $V_l$  и  $V_b$  — уравнения (4), (5) — общее число уравнений в системе составит 2\* число объектов), f описывается одним из уравнений (3)—(5), веса  $w_i$  имеют вид (9).

В нашем случае единственным нелинейным параметром является  $R_0 \equiv a_1$ . Поэтому мы можем

исключить данный параметр путем его фиксации. Введем обозначения:  $(a_1)_0 \equiv \min \sigma^2(a_1), \sigma_0^2 =$  $= \sigma^2((a_1)_0)$ . При фиксации  $a_1$  система становится линейной, и мы можем применить линейный МНК. По зависимости  $\sigma^2(a_1)$  находится минимум  $(a_1)_0$ , и решение МНК с ним даст нам точечную оценку остальных параметров:  $(a_2)_0, \ldots, (a_M)_0$ .

Ошибки (доверительные интервалы) параметров могут быть определены с использованием статистики

$$\chi(\mathbf{a}) = \sum_{j=1}^{N} \left( \frac{y_j - f_j(\mathbf{a})}{\sigma_j} \right)^2, \qquad (14)$$

где  $\sigma_j$  — истинные ошибки измерений  $y_j$ , которые считаются известными. Введем обозначения:

$$\chi_0^2 \equiv \min \chi^2(\mathbf{a}) = \chi^2(\mathbf{a}_0), \tag{15}$$

$$\mathbf{a}_0 = [(a_1)_0, \dots, (a_M)_0], \tag{16}$$

$$\chi_1^2(a_m) \equiv \min_{a_m = \text{const}} \chi^2(\mathbf{a}).$$
(17)

При уровне значимости 1 границы доверительного интервала определяются из уравнения

$$\chi_1^2(a_m) = \chi_0^2 + 1. \tag{18}$$

Тогда итоговые оценки параметров представимы в виде  $a_m = (a_m)_{0}^{+\sigma_m^+}$ , где  $\sigma_m^-, \sigma_m^+$  — корни (17).

В действительности  $\sigma_j$  не известны, а известны веса  $w_j$ . Их масштаб можно исправить при помощи  $\sigma_0$  — средней ошибки единицы веса:

$$w_j = \tilde{\sigma}_j^{-2}; \quad \sigma_j = \sigma_0 \tilde{\sigma}_j = \frac{\sigma_0}{w_j},$$
 (19)

где  $\sigma_0^2 \equiv \min \sigma^2(\mathbf{a}) = \sigma^2(\mathbf{a}_0)$ . С  $\sigma_j$ , вычисляемой по формуле (18), уравнение (17) может быть переписано:

$$\sigma_1^2(a_m) = \sigma_0^2 \left( 1 + \frac{1}{N_{\text{free}}} \right), \qquad (20)$$

$$\sigma_1^2(a_m) = \min_{a_m = \text{const}} \sigma^2(\mathbf{a}).$$
(21)

Уравнение (20) решается для всех параметров  $a_m$ .

## Спектральный анализ

Влияние спиральной волны плотности в радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных скоростях  $\Delta V_{\rm circ}$  является периодическим с амплитудой около 10 км/с. Согласно линейной теории волн плотности (Линь, Шу, 1964), оно описывается соотношениями следующего вида

$$V_R = -f_R \cos \chi, \tag{22}$$

ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 46 № 7 2020

$$\chi = m[\operatorname{ctg}(i)\ln(R/R_0) - \theta] + \chi_{\odot} \qquad (23)$$

— фаза спиральной волны (m — количество спиральных рукавов, i — угол закрутки спирального узора,  $\chi_{\odot}$  — радиальная фаза Солнца в спиральной волне);  $f_R$  и  $f_{\theta}$  — амплитуды возмущений радиальных и тангенциальных скоростей, которые считаются положительными.

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

Для изучения периодичностей в скоростях  $V_R$  и  $\Delta V_{\rm circ}$  применяем спектральный (периодограммный) анализ. Длина волны  $\lambda$  (расстояние между соседними отрезками спиральных рукавов, отсчитываемое вдоль радиального направления) вычисляется на основе соотношения

$$2\pi R_0 / \lambda = m \operatorname{ctg}(i). \tag{24}$$

Пусть имеется ряд измеренных скоростей  $V_{R_n}$  (это могут быть радиальные  $V_R$  или тангенциальные  $\Delta V_{\rm circ}$  скорости),  $n = 1, 2, \ldots, N$ , где N — число объектов. Задачей спектрального анализа является выделение периодичности из ряда данных в соответствии с принятой моделью, описывающей спиральную волну плотности с параметрами f,  $\lambda$  (или i) и  $\chi_{\odot}$ .

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

$$\bar{V}_{\lambda_k} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} V'_n(R'_n) \exp\left(-j\frac{2\pi R'_n}{\lambda_k}\right), \qquad (25)$$

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

$$R'_n = R_0 \ln(R_n/R_0), \qquad (26)$$
$$V'_n(R'_n) = V_n(R'_n) \times \exp(jm\theta_n).$$

Пиковому значению спектра мощности  $S_{\text{peak}}$  соответствует искомая длина волны  $\lambda$ . Угол закрутки спиральной волны плотности находится из выражения (23). Амплитуду и фазу возмущений мы находим в результате подгонки гармоники с найденной длиной волны к измеренным данным.

В итоге наш подход состоит из двух этапов: а) построение гладкой кривой вращения Галактики и б) спектральный анализ радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных  $\Delta V_{\rm circ}$  скоростей.



Рис. 1. Распределение относительных ошибок параллаксов в исходной выборке мазеров.



**Рис.** 2. Распределение мазеров в проекции на плоскость *xy*, оранжевая точка соответствует положению Солнца, а красный кружок и обозначение GC — центру Галактики.

## ДАННЫЕ

Источниками мазерного излучения являются звезды с обширными оболочками, в которых возникает эффект накачки. Это могут быть как молодые звезды и протозвезды различной массы, так и старые звезды, например, мириды. В настоящей работе отобраны только молодые объекты, тесно связанные с областями активного звездообразования.

Наш список данных о мазерных источниках с измеренными тригонометрическими параллаксами объединяет две крупные компилляции, а именно, Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020) с привлечением нескольких результатов, опубликованных различными авторами в 2020 г. Ридом и др. (2019) собрана информация о 199 мазерах, которые наблюдались на различных частотах в рамках проекта BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey<sup>1</sup>). В работе Хироты и др. (2020) представлен каталог из 99 источнков, которые наблюдались на частоте 22 ГГц в рамках японской программы VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry<sup>2</sup>). Причем между выборками Рида и др. (2019) и Хироты и др. (2020) имеется большой процент общих измерений. Нами также добавлены несколько новых определений параллаксов ряда мазерных источников во внешнем спиральном рукаве (Сакаи

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://bessel.vlbi-astrometry.org

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>http://veraserver.mtk.nao.ac.jp

Параметры	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
$R_0$ , кпк	$9.38^{+0.27}_{-0.14}$	$8.15\substack{+0.10 \\ -0.09}$	$8.15\substack{+0.04 \\ -0.20}$	$8.15\substack{+0.04\\-0.20}$
$U_{\odot}$ , км/с	$4.33^{+1.53}_{-1.55}$	$7.64^{+1.24}_{-1.25}$	$7.79^{+1.23}_{-1.27}$	$7.79^{+1.23}_{-1.26}$
$V_{\odot}$ , км/с	$6.99^{+1.54}_{-1.58}$	$13.64^{+1.23}_{-1.26}$	$15.04^{+1.24}_{-1.25}$	$15.09^{+1.22}_{-1.27}$
$W_{\odot}$ , км/с	$8.57^{+1.48}_{-1.49}$	$8.57^{+1.18}_{-1.23}$	$8.57^{+1.18}_{-1.23}$	$8.57^{+1.18}_{-1.23}$
$\Omega_0$ , км/с/кпк	$28.94_{-0.42}^{+0.41}$	$29.16\substack{+0.33 \\ -0.34}$	$29.01\substack{+0.33 \\ -0.34}$	$29.00^{+0.33}_{-0.34}$
$\Omega_0', \mathrm{кm/c/кп k^2}$	$-2.804\substack{+0.075\\-0.075}$	$-4.086^{+0.068}_{-0.069}$	$-3.901\substack{+0.068\\-0.069}$	$-3.927^{+0.068}_{-0.069}$
$\Omega_0''$ , км/с/кпк $^3$	—	$0.717^{+0.032}_{-0.032}$	$0.831^{+0.032}_{-0.032}$	$0.848^{+0.031}_{-0.032}$
$\Omega_0^{\prime\prime\prime}$ , км/с/кпк $^4$	—	—	$-0.104\substack{+0.018\\-0.019}$	$-0.084^{+0.018}_{-0.019}$
$\Omega_0^{(4)}$ , км/с/кпк $^5$	—	—	—	$-0.017^{+0.013}_{-0.014}$
$\sigma_0$ , км/с	15.84	12.87	12.82	12.83

Таблица 1. Найденные кинематические параметры

и др., 2019) и уточненные параметры источника V838 Mon (Ортиз-Леон и др., 2020).

Помимо источников мазерного излучения, в районе пояса Гулда выполнены высокоточные РСДБ-измерения тригонометрических параллаксов и собственных движений ряда маломассивных звезд (типа Т Тельца) при наблюдении в континууме. Такие наблюдения осуществлены в рамках программы GOBELINS (Gould's Belt Distances Survey). Мы использовали данные об около 30 таких звездах из работ Кункель и др. (2017), Галли и др. (2018) и Ортиз-Леон и др. (2018). Все эти звезды расположены не далее 500 пк от Солнца.

Итоговая наша выборка содержит 256 радиоисточников с известными положениями и пространственными скоростями. На рис. 1 представлена гистограмма распределения относительных ошибок параллаксов в этой выборке. Для получения кинематических параметров были исключены все мазеры, имеющие галактоосевое расстояние *R* менее 4 кпк, где имеется ощутимое влияние галактического бара. Полученная после этого итоговая выборка содержит 239 объектов.

Распределение мазеров в проекции на галактическую плоскость xy дано на рис. 2. Синими точками отмечены мазеры, оставшиеся в итоговой выборке, красными треугольниками — исключенные из рассмотрения. Оранжевая точка соответствует положению Солнца, а красный кружок — центру Галактики. Также на графике изображены ошибки расстояний мазеров. Благодаря тому, что основные наблюдения выполнены пока только из северного полушария Земли, практически заполнена лишь половина галактической плоскости.

# РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Параметры галактического вращения

На рис. З представлены профили функции  $\sigma^2(R_0)$  для рассматриваемых порядков разложения  $\Omega_0$ :  $n = \{1, 2, 3, 4\}$ .

В табл. 1 представлены оценки искомых параметров с их доверительными интервалами. На рис. 4 даны кривые вращения для трех вариантов разложения  $\Omega_0: n = \{2, 3, 4\}$ . Как можно видеть из рис. 4, увеличение определяемых неизвестных ведет к расширению доверительной области, особенно заметному при больших R. Из трех представленных на рисунке случаев лучше выбирать вариант, при котором кривая вращения наиболее близка к плоской. Так, на рис. 4а кривая слишком



**Рис. 3.** Профиль  $\sigma^2$  в зависимости от  $R_0$  для разных порядков разложения по  $\Omega_0$ .



**Рис. 4.** Скорости вращения мазеров  $V_{\text{сirc}}$  в зависимости от R, даны кривые вращения при порядке разложения угловой скорости n = 2 (a), n = 3 (б) и n = 4 (в), указаны доверительные области, соответствующие уровню  $1\sigma$ , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

рано (при  $R \sim 13$  кпк) уходит вверх. Кривая на рис. 4в излишне отличается от плоской на больших R. Например, для получения остаточных скоростей цефеид  $\Delta V_{\rm circ}$  с целью их спектрального анализа лучше подходит вариант с тремя (n = 3) производными угловой скорости (рис. 46). Как видно из таблицы, для этого варианта ошибка единицы веса имеет минимальное значение,  $\sigma_0 = 12.82$  км/с.

Для варианта n = 3 можем оценить, считая ошибки симметричными, следующие величины:  $V_0 = 236.4 \pm 4.4$  км/с для  $R_0 = 8.15 \pm 0.12$  кпк,  $\Omega_{\odot} = 30.51 \pm 0.34$  км/с/кпк, где  $\Omega_{\odot} = \Omega_0 + V_{\odot}/R$ , а значение скорости  $V_{\odot} = 12.24$  км/с берем из работы Шонриха и др. (2010). Здесь  $\Omega_{\odot}$  угловая скорость вращения Солнца вокруг центра Галактики.

Расторгуевым и др. (2017) по данным о 130 галактических мазерах с измеренными тригонометрическими параллаксами были найдены компоненты скорости Солнца ( $U_{\odot}, V_{\odot}$ ) = (11.40, 17.23) ± ± (1.33, 1.09) км/с, и следующие значения параметров кривой вращения Галактики:  $\Omega_0 = 28.93 \pm \pm 0.53$  км/с/кпк,  $\Omega'_0 = -3.96 \pm 0.07$  км/с/кпк<sup>2</sup> и

 $\Omega_0''=0.87\pm0.03~$ км/с/кпк $^3,~V_0=243\pm10~$ км/с для найденного значения  $R_0=8.40\pm0.12$ кпк.

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

На основе аналогичного подхода Хирота и др. (2020) из анализа 99 мазеров, которые наблюдались по программе VERA, получили следующие оценки:  $R_0 = 7.92 \pm 0.16$  (стат.)  $\pm 0.3$  (сист.) кпк и  $\Omega_{\odot} = 30.17 \pm 0.27$  (стат.)  $\pm 0.3$  (сист.) км/с/кпк, где  $\Omega_{\odot} = \Omega_0 + V_{\odot}/R$ , а значение скорости  $V_{\odot} = 12.24$  км/с также было взято из работы Шонриха и др. (2010).

Интересно также отметить работу Аблимита и др. (2020), в которой для построения кривой вращения Галактики были использованы около 3500 классических цефеид с собственными движениями



**Рис. 5.** Радиальные скорости мазеров в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечены положение Солнца (а) и спектр мощности радиальных скоростей (б).



Рис. 6. Остаточные тангенциальные скорости мазеров в зависимости от галактоцентрического расстояния, вертикальной пунктирной линией отмечены положение Солнца (а) и спектр мощности остаточных тангенциальных скоростей (б).

из каталога Gaia DR2. По цефеидам этой выборки кривая вращения Галактики была построена на интервале расстояний R: 4-19 кпк. Круговая скорость вращения околосолнечной окрестности была найдена с очень высокой точностью, ее значение составило  $V_0 = 232.5 \pm 0.9$  км/с.

#### Параметры спиральной волны плотности

Для спектрального анализа использовались 239 звезд, расположенных в интервале расстояний R от 4 до 15 кпк. Для дальнейшего анализа остаточных тангенциальных скоростей была выбрана кривая вращения с тремя производными (n = 3 из табл. 1). По отклонению от нее были вычислены остаточные круговые скорости  $\Delta V_{\rm circ}$ . Все вычисления здесь проведены со значением  $R_0 = 8.15$  кпк.

По рядам радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных  $\Delta V_{\text{circ}}$  скоростей для принятой четырехрукавной модели спирального узора (m = 4) были найдены следующие значения параметров: амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили  $f_R = 7.0 \pm 0.9$  км/с и  $f_{\theta} = 3.8 \pm 1.1$  км/с, длина волны возмущений  $\lambda_R =$  $= 2.3 \pm 0.2$  кпк и  $\lambda_{\theta} = 2.0 \pm 0.4$  кпк, а значения фазы Солнца в спиральной волне  $(\chi_{\odot})_R = -163^\circ \pm 9^\circ$ и  $(\chi_{\odot})_{\theta} = -137^\circ \pm 10^\circ$ .

Для четырехрукавного спирального узора для значения  $\lambda_R = 2.3 \pm 0.2$  кпк по формуле (23) можем вычислить угол закрутки  $i = 10.2 \pm 1.0^{\circ}$ . Такое значение находится в согласии с оценками других авторов, которые заключены в интервале 9° – 16° (Валле, 20176; Никифоров, Веселова, 2018; Рид и др., 2019).

На рис. 5 даны радиальные скорости мазеров в зависимости от галактоцентрического расстояния, а также спектр мощности радиальных скоростей. На рис. 6 даны остаточные тангенциальные скорости мазеров и их спектр мощности.

Анализ современных данных показывает, что в широкой окрестности  $R_0$  скорости  $f_R$  и  $f_\theta$  обычно составляют 4–9 км/с, а значение длины волны  $\lambda$  заключено в интервале 2–3 кпк. Особый интерес представляют результаты определения этих параметров отдельно по радиальным и тангенциальным скоростям звезд.

Из анализа около 200 цефеид из каталога НІРРАRCOS (1997) Бобылев, Байкова (2012) нашли  $f_R = 6.8 \pm 0.7$  км/с и  $f_{\theta} = 3.3 \pm 0.5$  км/с,  $\lambda = 2.0 \pm 0.1$  кпк,  $\chi_{\odot} = -193^{\circ} \pm 5^{\circ}$ . 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.

По 130 мазерным источникам с измеренными тригонометрическими параллаксами в работе Расторгуева и др. (2017) найдено  $f_R = 6.9 \pm 1.4$  км/с и  $f_{\theta} = 2.8 \pm 1.0$  км/с, фаза Солнца  $\chi_{\odot} = -125^{\circ} \pm \pm 10^{\circ}$ . По около 500 ОВ-звездам из каталога Gaia DR2 Бобылевым, Байковой (2018) найдено  $f_R = 7.1 \pm 0.3$  км/с и  $f_{\theta} = 6.5 \pm 0.4$  км/с,  $\lambda_R = 3.3 \pm \pm 0.1$  кпк и  $\lambda_{\theta} = 2.3 \pm 0.2$  кпк,  $(\chi_{\odot})_R = -135^{\circ} \pm 5^{\circ}$  и  $(\chi_{\odot})_{\theta} = -123^{\circ} \pm 8^{\circ}$ . Отметим также новые значения  $f_R = 4.6 \pm 0.7$  км/с и  $f_{\theta} = 1.1 \pm 0.4$  км/с, полученные в недавней работе Локтина, Поповой (2019) из анализа современных данных о рассеянных звездных скоплениях.

Таким образом, полученные в настоящей работе значения скоростей возмущений  $f_R$  и  $f_{\theta}$ , длины волны  $\lambda_R$  и  $\lambda_{\theta}$ , а также фазы Солнца в спиральной волне плотности  $(\chi_{\odot})_R$  и  $(\chi_{\odot})_{\theta}$  находятся в хорошем согласии с результатами определения этих параметров, полученными другими авторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По литературным данным сформирована выборка из 256 радиоисточников, тригонометрические параллаксы и собственные движения которых измерены РСДБ-методом. Подавляющее большинство выборки составляют галактические источники мазерного излучения, ассоциируемые с массивными протозвездами и звездами, расположенными в областях активного звездообразования. В нашу выборку также были включены РСДБизмерения ряда молодых маломассивных звезд из области пояса Гулда, наблюдаемых в континууме.

В области R < 4 кпк очень сильно влияние галактического бара на пространственные скорости звезд. Это приводит к большой дисперсии круговых скоростей в этой зоне. Поэтому для кинематического анализа были взяты объекты, лежащие в интервале расстояний R: 4-15 кпк. По этой выборке из 239 источников получены оценки скоростей  $U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}$  и параметров угловой скорости вращения Галактики  $\Omega_0, \Omega_0^{(i)}, i = 1, \ldots, 4$  а также получена новая оценка  $R_0 = 8.15^{+0.04}_{-0.20}$  кпк. Для дальнейшего анализа остаточных тангенциальных  $\Delta V_{\rm circ}$  скоростей была выбрана кривая вращения с тремя производными (n = 3).

По рядам радиальных  $V_R$  и остаточных тангенциальных  $\Delta V_{\text{сігс}}$  скоростей звезд с применением периодограммного анализа найдены параметры галактической спиральной волны плотности. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений составили  $f_R = 7.0 \pm 0.9$  км/с и  $f_{\theta} =$  $= 3.8 \pm 1.1$  км/с, длина волны возмущений  $\lambda_R =$  $= 2.3 \pm 0.2$  кпк и  $\lambda_{\theta} = 2.0 \pm 0.4$  кпк для принятой четырехрукавной модели спирального узора (m == 4). Фаза Солнца в спиральной волне составила ( $\chi_{\odot}$ )<sub>R</sub> =  $-163^{\circ} \pm 9^{\circ}$  и ( $\chi_{\odot}$ )<sub> $\theta$ </sub> =  $-137^{\circ} \pm 10^{\circ}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аблимит и др. (I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S.A. Bird), Astrophys. J. Lett. **895**, 12 (2020).
- Абутер и др. (Gravity Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, N. Bauböck, J.P. Berger, H. Bonnet, W. Brandner, Y. Clénet, V. Coudé du Foresto, et al.), Astron. Astrophys. 625, L10 (2019).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 38, 715 (2012) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 38, 638 (2012)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **39**, 899 (2013) [V.V. Bobylev et al., Astron. Lett. **39**, 809 (2013)].
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS 473, 1549 (2014а).
- 6. Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), MNRAS **441**, 142 (20146).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 40, 840 (2014в) [V.V. Bobylev et al., Astron. Lett. 40, 783 (2014в)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. 44, 739 (2018) [V.V. Bobylev, et al., Astron. Lett. 44, 675 (2018)].
- Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. 616, 1 (2018).
- Валле (J.P. Vallée), Astrophys. Space Science 362, 79 (2017а).
- 11. Валле (J.P. Vallée), New Astron. Rev. 79, 49 (2017б).
- Галли 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).
- Де Грийс, Боно (R. de Grijs and G. Bono), Astrophys. J. Suppl. Ser. 232, 22 (2017).

- Дамбис А.К., Бердников Л.Н., Ефремов Ю.Н., Князев А.Ю., Расторгуев А.С., Глушкова и др., Письма в Астрон. журн. 41, 533 (2015) [А.К. Dambis, et al., Astron. Lett. 41, 489 (2015)].
- 15. Ду и др. (Т. Do, A. Hees, A. Ghez, G.D. Martinez, D.S. Chu, S. Jia, S. Sakai, J.R. Lu, et al.), Science **365**, 664 (2019).
- 16. Камарильо и др. (Т. Camarillo, M. Varun, M. Tyler, and R. Bharat), PASP **130**, 4101 (2018).
- 17. Кункель и др. (M. Kounkel, L. Hartmann, L. Loinard, G.N. Ortiz-León, A.J. Mioduszewski, L.F. Rodriguez, S.A. Dzib, R.M. Torres, et al.), Astrophys. J. 834, 142 (2017).
- 18. Линь, Шу (С.С. Lin and F.H. Shu), Astrophys. J. **140**, 646 (1964).
- Локтин А.В., Попова М.Э., Астрофиз. Бюлл. 74, 289 (2019) [A.V. Loktin, et al., Astrophys. Bull. 74, 270 (2019)].
- 20. Никифоров И.И., Веселова А.В., Письма в Астрон. журн. 44, 102 (2018) [I.I. Nikiforov et al., Astron. Lett. 44, 81 (2018)].
- 21. Ортиз-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).
- 22. Ортиз-Леон и др. (G.N. Ortiz-León, K.M. Menten, T. Kaminski, A. Brunthaler, M.J. Reid, and R. Tylenda), Astron. Astrophys. **638**, 17 (2020).
- Прусти и др. (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, A. Vallenari, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, U. Bastian, M. Biermann, et al.), Astron. Astrophys. 595, A1 (2016).
- 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)].

- 25. Рид, Хонма (M.J. Reid and M. Honma), Ann. Rev. Astron. Astrophys. **52**, 339 (2014a).
- 26. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, Y. Wu, B. Zhang, et al.), Astrophys. J. **783**, 130 (20146).
- 27. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, and A. Brunthaler), Astrophys. J. **823**, 77 (2016).
- 28. 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).
- 29. Сакаи и др. (N. Sakai, H. Nakanishi, M. Matsuo, N. Koide, D. Tezuka, T. Kurayama, K.M. Shibata, Y. Ueno, and M. Honma), PASJ **67**, 69 (2015).
- 30. Сакаи и др. (N. Sakai, T. Nagayama, H. Nakanishi, N. Koide, T. Kurayama, N. Izumi, T. Hirota, T. Yoshida, et al.), arXiv:1910.08146 (2019).
- 31. Сюйидр. (Y. Xu, J.J. Li, M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, L. Moscadelli, T.M. Dame, and B. Zhang), Astrophys. J. **769**, 15 (2013).
- 32. Хонма и др. (М. Honma, Т. Nagayama, and N. Sakai), PASJ **67**, 70 (2015).
- Хонма и др. (М. Honma, T. Nagayama, T. Hirota, N. Sakai, T. Oyama, A. Yamauchi, I. Toshiaki, T. Handa, et al.), *Maser Astrometry and Galactic Structure Study with VLBI*. Proc. IAU Symp. 336, 162 (2018).
- 34. 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.), arXiv:2002.03089 (2020).
- 35. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), MNRAS **403**, 1829 (2010).
- 36. The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).