

ИЗУЧЕНИЕ ШКАЛ РАССТОЯНИЙ ПО ЦЕФЕИДАМ С ДАННЫМИ ИЗ КАТАЛОГА Gaia EDR3

© 2022 г. В. В. Бобылев¹, А. Т. Байкова¹, *

¹ Главная астрономическая обсерватория РАН, Пулково, Россия

*E-mail: vbobylev@gaoran.ru

Поступила в редакцию 08.03.2022 г.

После доработки 03.04.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Изучена кинематика выборки классических цефеид моложе 120 млн. лет. Для этих звезд имеются оценки расстояний из работы Сковрон и др., основанные на соотношении “период–светимость”, лучевые скорости и собственные движения из каталога Gaia. Имеются также оценки расстояний до них, базирующиеся на тригонометрических параллаксах из каталога Gaia EDR3. Метод, основанный на сравнении первой производной угловой скорости вращения Галактики, показал необходимость удлинения шкалы расстояний Сковрон и др. примерно на 10%. Такой вывод подтвержден путем непосредственного сравнения с расстояниями, основанными на использовании тригонометрических параллаксов. Получены новые оценки параметров вращения Галактики и параметров спиральной волны плотности с учетом этого обстоятельства.

Ключевые слова: цефеиды, кинематика, шкала расстояний, вращение Галактики

DOI: 10.31857/S0004629922080023

1. ВВЕДЕНИЕ

Цефеиды являются звездами, переменность блеска которых определяется их радиальными пульсациями. Благодаря соотношению “период–светимость” [1, 2] удается с высокой точностью оценивать расстояния до этих звезд. В конечном итоге это позволяет установить независимую цефеидную шкалу расстояний и охватить ею значительную область Вселенной. Классическими являются цефеиды с периодами пульсации от 1 до 100 дней. Их возраст не превышает примерно 400 млн. лет. Такие звезды имеют важное значение для изучения свойств тонкого диска Галактики, спиральной структуры, вращения, эволюции Галактики и др.

Например, с использованием около 220 классических цефеид с собственными движениями из каталога Hipparcos [3] были уточнены параметры вращения Галактики [4, 5]. По различным выборкам классических цефеид проводились оценки параметров спиральной структуры Галактики [6–10]. Цефеиды видны с больших расстояний. Поэтому используются такие звезды для определения расстояния от Солнца до центра Галактики [11–13]. Они служат также для изучения искривления галактического диска [14–16], для изучения особенностей в распределении различных химических элементов в диске Галактики [17–19].

В работе Сковрон и др. [20] был опубликован каталог с новыми данными о более 2200 классических цефеидах. Расстояния до этих звезд определены на основе соотношения “период–светимость” с ошибками 5–10%. Около 800 цефеид из этого каталога Мроз и др. [21] снабдили лучевыми скоростями из каталога Gaia DR2 [22] и определили по этим данным параметры вращения Галактики. В работе Бобылева и др. [13] был сделан вывод о том, что расстояния до цефеид, найденные в работе Сковрон и др. [20], необходимо удлинить примерно на 9%. При этом оценки кинематических параметров были сделаны без корректировки шкалы расстояний [20].

При анализе кинематики звезд важно иметь их высокоточные тригонометрические параллаксы и собственные движения. В настоящее время имеется версия каталога Gaia EDR3 [23], в которой по сравнению с предыдущей версией, Gaia DR2, уточнены примерно на 30% значения тригонометрических параллаксов около 1.5 млрд. звезд, а точность собственных движений этих звезд улучшена примерно в два раза. Тригонометрические параллаксы примерно трети звезд в каталоге Gaia EDR3 измерены с ошибками менее 0.2 миллисекунд дуги (мсд). Собственные движения около половины звезд этого каталога измерены с относительной ошибкой менее 10%.

Отметим, что расстояния до звезд, вычисляемые через тригонометрические параллаксы, являются надежными только при небольших ошибках параллаксов (менее 10%). При больших ошибках параллаксов применяют методы улучшения расстояний, сходные с методом Лутца-Келкера [24]. Такое улучшение расстояний до примерно 1.47 млрд. звезд, вычисленными через тригонометрические параллаксы из каталога Gaia EDR3, было проделано в работе Байлера-Джонса и др. [25]. В настоящей работе мы используем расстояния до цефеид из работы [25] в качестве одного из источников расстояний.

Целью настоящей работы является сравнение расстояний до цефеид, полученных на основе соотношении “период–светимость” в работе [20], с расстояниями, опирающимися на тригонометрические параллаксы каталога Gaia. Интересно также переопределить параметры галактического вращения и параметры спиральной волны плотности с использованием уточненной цефеидной шкалы расстояний.

2. МЕТОД

Из наблюдений имеем три следующие составляющие скорости звезды: лучевую скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно. Все три скорости выражены в км/с, 4.74 является коэффициентом размерности, а r – гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r, V_l, V_b вычисляются скорости U, V, W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат:

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

где скорость U направлена от Солнца к центру Галактики, V – в направлении вращения Галактики и W – на северный галактический полюс. Две скорости: V_R , направленную радиально от галактического центра, и ортогональную ей скорость V_{circ} , направленную 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 $\tan \theta = y/(R_0 - x)$, 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 .

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 :

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

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

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

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

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

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

где R – расстояние от звезды до оси вращения Галактики, $R^2 = r^2 \cos^2 b - 2R_0 r \cos b \cos l + R_0^2$. Скорости $(U, V, W)_{\odot}$ являются средней групповой скоростью выборки, 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 $V_0 = R_0\Omega_0$. В настоящей работе значение R_0 принято равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору [26], где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Решая условные уравнения вида (3)–(5) методом наименьших квадратов (МНК), можем найти шесть следующих неизвестных: $(U, V, W)_{\odot}, \Omega_0, \Omega'_0$ и Ω''_0 . При МНК-решении только одного условного уравнения вида (3) можем найти лишь пять неизвестных: $(U, V, W)_{\odot}, \Omega'_0$ и Ω''_0 .

Влияние спиральной волны плотности в радиальных V_R и остаточных тангенциальных скоростях ΔV_{circ} является периодическим с амплитудой около 10 км/с. Согласно линейной теории волн плотности Линя и Шу [27], оно описывается соотношениями следующего вида:

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

$$\chi = m[\cot(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_{\odot} \quad (7)$$

фаза спиральной волны, где m – количество спиральных рукавов, $\cot(i)$ – котангенс i – угла 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.

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

$$2\pi R_0/\lambda = m \cot(|i|). \quad (8)$$

Пусть имеется ряд измеренных скоростей V_{R_n} (это могут быть радиальные V_R , тангенциальные ΔV_{circ} или вертикальные W скорости), $n = 1, \dots, N$, 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 [28]:

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

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

$$\begin{aligned} R'_n &= R_0 \ln(R_n/R_0), \\ V'_n(R'_n) &= V_n(R'_n) \exp(jm\theta_n). \end{aligned} \quad (10)$$

Пиковому значению спектра мощности S_{peak} соответствует искомая длина волны λ . Угол закрутки спиральной волны плотности вычисляется из выражения (8). Амплитуду и фазу возмущений находим в результате подгонки гармоники с найденной длиной волны к измеренным данным.

3. ДАННЫЕ

В настоящей работе используются данные о классических цефеидах из работы Сковрон и др. [20], где для 2431 цефеиды были получены оценки расстояния и возраста. Наблюдались эти цефеиды в рамках четвертого этапа программы OGLE

(Optical Gravitational Lensing Experiment [29]). Расстояния до цефеид были вычислены Сковрон и др. [20] на основе соотношения “период–светимость” по кривым блеска в среднем инфракрасном диапазоне. Согласно этим авторам, случайные ошибки определения расстояний до цефеид в их каталоге лежат в интервале 5–10%. Оценки возраста цефеид в работе [20] были сделаны по методике Андерсона и др. [30] с учетом осевого вращения звезд и их металличности.

Мы использовали звезды из работы Мроза и др. [21], где для ряда цефеид из списка [20] даны лучевые скорости, а также их собственные движения, скопированные из каталога Gaia DR2. Для кинематического анализа мы отобрали цефеиды моложе 120 млн. лет, расположенные не далее 5 кпк от Солнца, и отождествили их с каталогом Gaia EDR3 и со списком Байлера–Джонса и др. [25].

В работе [25] вычислены улучшенные расстояния для примерно 1.47 млрд. звезд из каталога Gaia EDR3 через тригонометрические параллаксы. Учитывалась систематическая поправка к параллаксам Gaia EDR3 с величиной $\Delta\pi = -0.017$ мсд, значение которой определено Линдегренем и др. [31]. Вычислены два варианта расстояний, полученных чисто геометрическим (geom) и фотогеометрическим (phgeom) способом. По мнению этих авторов, более точные расстояния дает фотогеометрический способ. Отметим, что оба эти метода являются модельно зависимыми, так как используют привязку к модели Галактики. Как отмечают сами авторы, такие расстояния полезны в использовании при наличии больших ошибок определения тригонометрических параллаксов звезд из каталога Gaia EDR3.

В итоге имеем 363 цефеиды. Для них имеются расстояния, полученные на основе соотношении “период–светимость”, а также расстояния, опирающиеся на тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3. При этом имеется возможность использовать несколько шкал расстояний. Во-первых, это расстояния, вычисленные непосредственно через параллаксы Gaia EDR3. Во-вторых, это два вида расстояний до цефеид, взятые из работы [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Условные уравнения вида (3)–(5) решались нами тремя способами. Во-первых, совместно с использованием трех скоростей $V_r + V_l + V_b$. Во-вторых, только с использованием лучевых скоростей цефеид V_r . В-третьих, только с использованием скоростей V_l .

В верхней части табл. 1 даны кинематические параметры, полученные с использованием расстояний до цефеид, которые были вычислены на

Таблица 1. Кинематические параметры, найденные по цефеидам с использованием расстояний из работы [20]

Параметры	$V_r + V_l + V_b$	V_r	V_l
U_{\odot} , км/с	8.15 ± 0.63	9.57 ± 1.25	8.08 ± 0.94
V_{\odot} , км/с	12.87 ± 0.80	15.53 ± 1.13	7.47 ± 1.77
W_{\odot} , км/с	7.25 ± 0.61		
Ω_0 , км/с/кпк	29.03 ± 0.25		29.17 ± 0.35
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-4.015 ± 0.066	-4.216 ± 0.101	-3.747 ± 0.123
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.639 ± 0.052	0.700 ± 0.106	0.417 ± 0.087
σ_0 , км/с	11.60	14.12	13.30
U_{\odot} , км/с	9.03 ± 0.65	9.55 ± 1.24	8.77 ± 1.02
V_{\odot} , км/с	11.58 ± 0.81	12.78 ± 1.12	6.89 ± 1.91
W_{\odot} , км/с	8.01 ± 0.62		
Ω_0 , км/с/кпк	28.87 ± 0.23		29.25 ± 0.35
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.894 ± 0.063	-3.893 ± 0.093	-3.887 ± 0.126
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.602 ± 0.044	0.593 ± 0.088	0.519 ± 0.081
σ_0 , км/с	11.89	13.99	14.48

Примечание. Параметры, вычисленные на основе соотношения “период–светимость” (см. [20]) даны в верхней части таблицы. Параметры, полученные с расстояниями до цефеид, увеличенными на 10%, – в нижней части таблицы.

основе соотношения “период–светимость” в работе [20].

Согласно работам [32, 33], отношение значений первой производной угловой скорости вращения Галактики, найденной только с использованием собственных движений к найденной только по лучевым скоростям, дает коэффициент шкалы расстояний $p = (\Omega'_0)_{V_l} / (\Omega'_0)_{V_r}$. Этот коэффициент является поправочным множителем вида $p = r / r_{\text{true}}$, где r – используемые расстояния, а r_{true} – истинные расстояния, т.о., $r_{\text{true}} = r / p$. Ошибка коэффициента p вычислена на основе соотношения $\sigma_p^2 = (\sigma_{\Omega'_{0V_l}} / \Omega'_{0V_r})^2 + (\Omega'_{0V_l} \times \sigma_{\Omega'_{0V_r}} / \Omega'^2_{0V_r})^2$. По данным табл. 1 находим $p = 0.89 \pm 0.04$. Это означает, что расстояния до цефеид, вычисленные на основе соотношения “период–светимость” в работе [20], необходимо удлинить примерно на 10%.

В нижней части табл. 1 даны кинематические параметры, полученные уже с удлиненными на 10% расстояниями. Результаты сравнения различных шкал расстояний до цефеид даны на рис. 1 и 2, где расстояния из работы [20] даны в зависимости от вычисленных через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 ($r = 1/\pi$), геометрических и фотогеометрических из работы [25], а также в зависимости от вычисленных через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 с учетом поправки $\Delta\pi = -0.017$ мсд ($r = 1/(\pi + 0.017)$).

Из рис. 1 видно, что шкала расстояний до цефеид, полученная через тригонометрические па-

раллаксы каталога Gaia EDR3 существенно длиннее шкалы Сковрон и др. [20]. Причем даже при небольших расстояниях согласие между этими шкалами не вполне хорошее.

Из сравнения расстояний до цефеид, показанных на рис. 2, можем заключить следующее: 1) в целом имеется хорошее согласие между увеличенными на 10% расстояниями из работы [20] и шкалами, основанными на тригонометрических параллаксах из каталога Gaia EDR3; 2) наихудшее согласие имеется на панели (а) этого рисунка, что заметнее всего проявляется при расстояниях более 4 кпк от Солнца; 3) практически полное согласие имеется между расстояниями, указанными на панелях (b), (c) и (d); 4) сделанные корректировки шкал расстояний, показанных на рис. 2d, приводят к их хорошему согласию, что особенно важно для шкалы Сковрон и др. [20], с которой в настоящей работе получены оценки кинематических параметров.

На рис. 3 дано распределение цефеид моложе 120 млн. лет в проекции на галактическую плоскость XY . Использована система координат, в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Здесь и далее расстояния до цефеид из работы [20] были увеличены на 10%.

На рис. 4 даны круговые скорости вращения V_{circ} цефеид в зависимости от расстояния R . Дана кривая вращения Галактики, которая построена с параметрами, указанными во втором столбце нижней части табл. 1. Эта кривая вращения Галактики была использована для вычисления

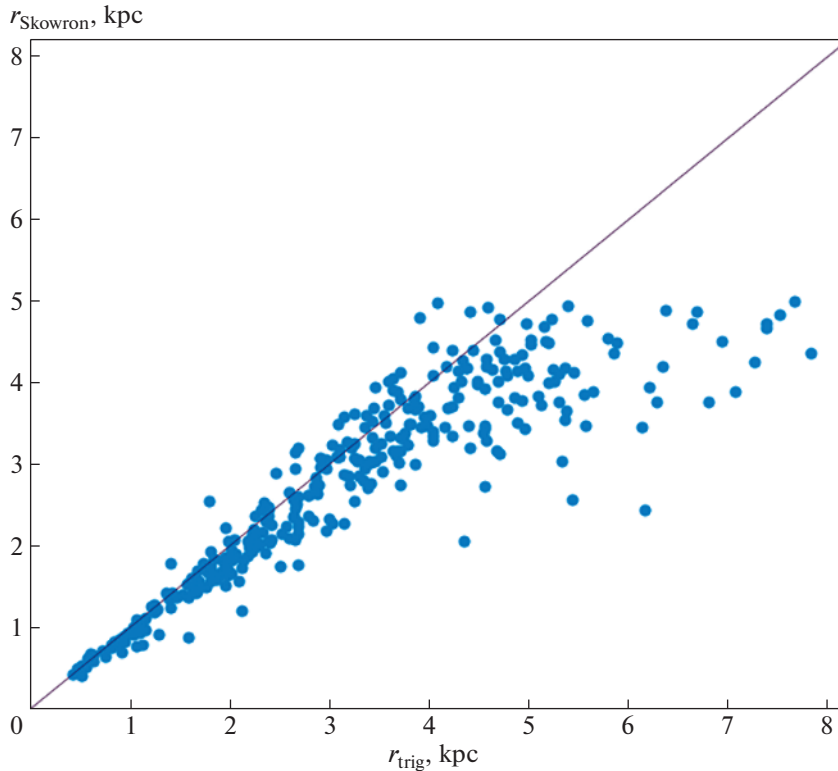


Рис. 1. Расстояния до цефеид из работы [20] в зависимости от вычисленных через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 без учета поправки $\Delta\pi$, дана диагональная линия совпадения.

остаточных круговых скоростей вращения цефеид ΔV_{circ} .

Найденные в настоящей работе значения параметров вращения Галактики находятся в хорошем согласии с результатами их определения по другим галактическим источникам. Например, в работе [33] по данным о 130 галактических мазерах с измеренными 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.

Отметим, что в каталоге [20] имеются как цефеиды, пульсирующие в фундаментальной моде, так и в первом обортоне. Для каждой из двух мод пульсаций были использованы слегка отличающиеся калибровки, что может сказаться на шкалах расстояний.

Среди 363 отобранных нами цефеид сильно доминируют цефеиды с фундаментальной модой пульсаций — их 308, а пульсирующих в первом обортоне всего 55. В табл. 2 даны кинематические параметры, полученные по 308 цефеидам с фун-

даментальной модой пульсаций. Значения кинематических параметров из табл. 2 необходимо сравнивать с теми, что даны в нижней части табл. 1. Отметим, что такое сравнение не обнаруживает существенных отличий между всеми параметрами. Наиболее важным является то, что согласно данным табл. 2 значение масштабного фактора p составляет 1.01 ± 0.04 . Это говорит о том, что эти цефеиды отлично согласуются с предложенной корректировкой шкалы Сковрон и др. [20]. Таким образом, не имеется различий между результатами, полученными по наиболее однородной в смысле моды пульсаций и смешанной выборками цефеид.

По скоростям V_R , ΔV_{circ} и W был проведен спектральный анализ. Результаты отражены на рис. 5, где даны скорости V_R , ΔV_{circ} и W в зависимости от расстояния R , а также соответствующие спектры мощности. По скоростям V_R и ΔV_{circ} получены следующие оценки: $f_R = 5.5 \pm 2.0$ км/с, $f_{\theta} = 7.1 \pm 2.0$ км/с, $\lambda_R = 1.9 \pm 0.5$ кпк ($i_R = -8.3 \pm 2.5^\circ$ для $m = 4$) и $\lambda_{\theta} = 2.6 \pm 0.5$ кпк ($i_{\theta} = -11.4 \pm 2.8^\circ$ для $m = 4$), $(\chi_{\odot})_R = -208 \pm 16^\circ$ и $(\chi_{\odot})_{\theta} = -185 \pm 18^\circ$. Вертикальные скорости (рис. 5e и 5f) также демонстрируют периодичность, хотя и с меньшей амплитудой, $f_W = 3.9 \pm 2.0$ км/с,

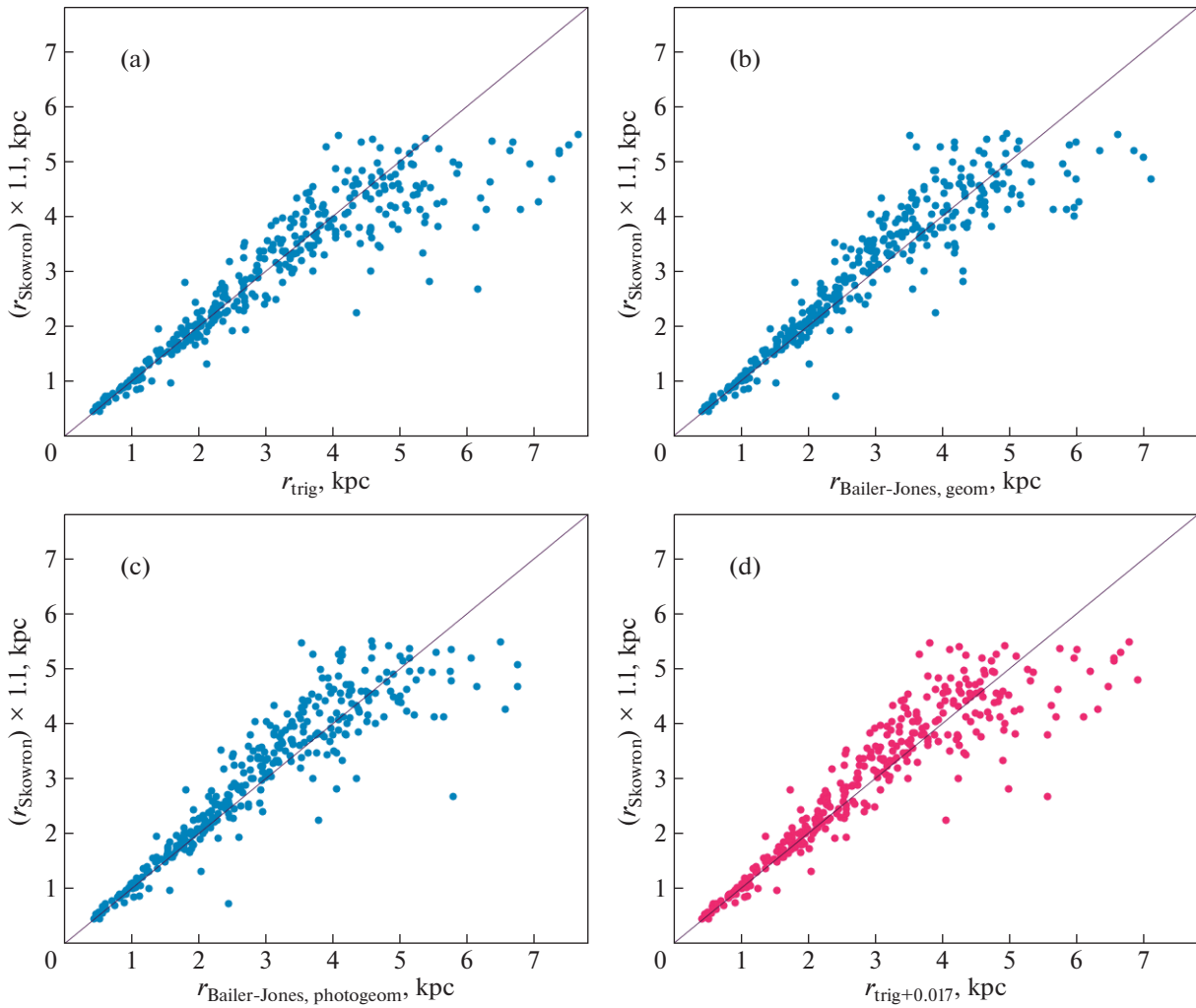


Рис. 2. Расстояния до цефеид из работы [20], удлинённые на 10%, в зависимости от расстояний, вычисленных через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 (a), в зависимости от геометрических расстояний из работы [25] (b), в зависимости от фотогеометрических расстояний из работы [25] (c), и в зависимости от расстояний, вычисленных через тригонометрические параллаксы каталога Gaia EDR3 с учетом поправки $\Delta\pi = -0.017$ мсд (d). На каждой панели дана диагональная линия совпадения.

$\lambda_W = 2.4 \pm 0.5$ кпк ($i_W = -10.7 \pm 2.7^\circ$ для $m = 4$) и $(\chi_c)_W = -138 \pm 18^\circ$. Отметим, что значения длины волны λ , найденные по скоростям V_R и ΔV_{circ} , довольно сильно различаются.

Мы также провели совместный спектральный анализ скоростей V_R и ΔV_{circ} . Здесь предполагается, что имеется одно значение длины волны и фазы Солнца в волне плотности для обоих видов скоростей. Результаты отражены на рис. 6. При этом подходе были получены следующие оценки: $f_R = 2.7 \pm 1.7$ км/с, $f_\theta = 4.4 \pm 1.7$ км/с и $\lambda_R = 2.6 \pm 0.5$ кпк.

Мы склоняемся к тому, что результаты отдельных решений более надежные, в особенности результаты отдельного решения радиальных скоростей. Так, значимость пика на спектре мощ-

ности в случае совместного решения (рис. 6) составляет 0.986. Значимость пика на спектре мощности при отдельном анализе тангенциальных скоростей (рис. 5d) составляет 0.985, а при отдельном анализе радиальных скоростей (рис. 5b) составляет 0.990. К слову сказать, значимость пика на спектре мощности при отдельном анализе вертикальных скоростей (рис. 5f) составляет 0.616. Это с формальной точки зрения.

С другой стороны, из рис. 5 и 6 видно сильное отличие фазы Солнца в волне. Наиболее приближенной к ожидаемой является волна в радиальных скоростях, найденная при отдельном анализе (рис. 5a). Действительно, из рис. 3 можем видеть сильную концентрацию цефеид к отрезку спирального рукава Киля-Стрельца на расстоянии $R \sim 7$ кпк. Согласно модели Линя, Шу [27],

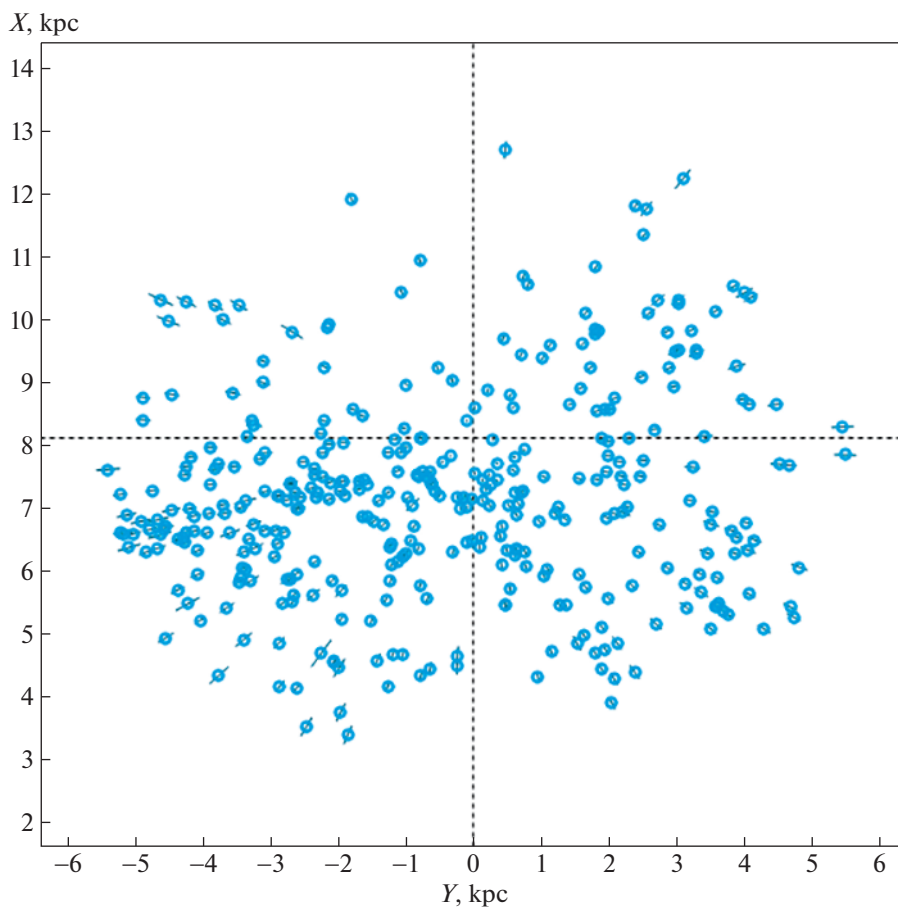


Рис. 3. Распределение анализируемой выборки цефеид в проекции на галактическую плоскость XY .

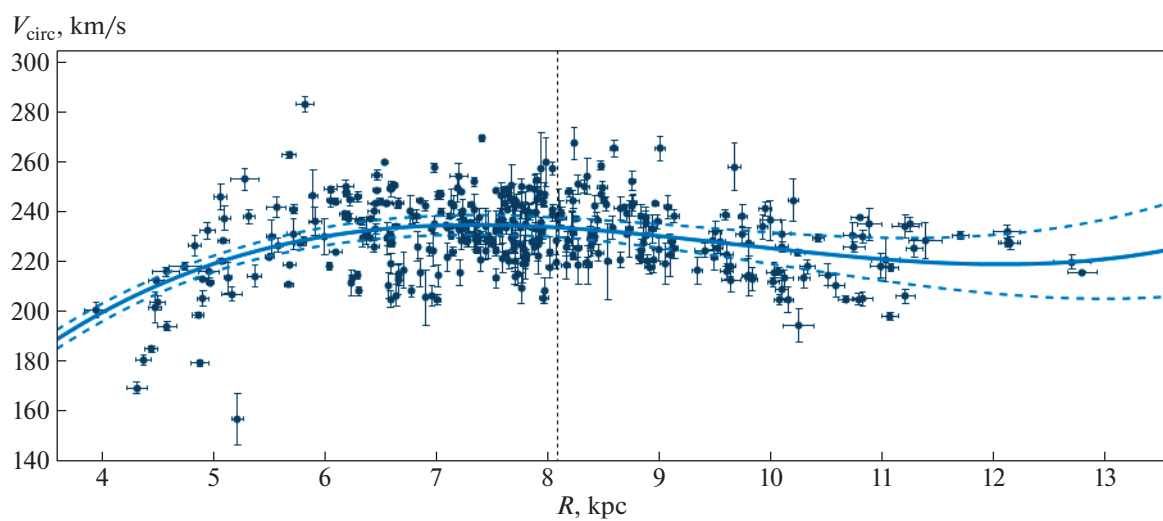


Рис. 4. Круговые скорости вращения V_{circ} цефеид в зависимости от расстояния R . Дана кривая вращения Галактики с границами доверительных областей, соответствующих уровню 1σ , вертикальной линией отмечено положение Солнца.

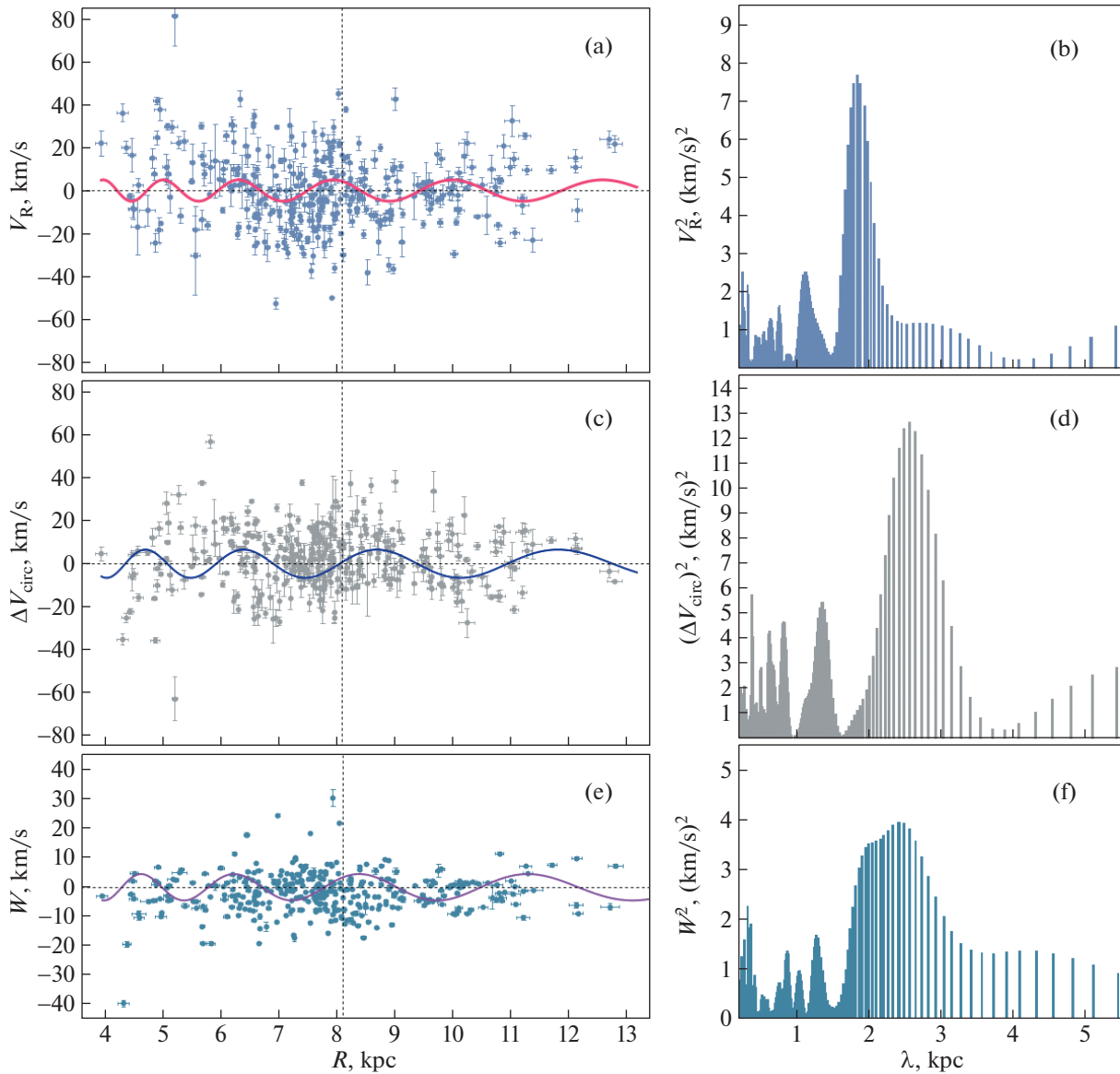


Рис. 5. Радиальные скорости V_R в зависимости от расстояния R анализируемой выборки цефеид (a), спектр мощности этой выборки (b), остаточные скорости вращения ΔV_{circ} цефеид (c) и их спектр мощности (d), вертикальные скорости W цефеид (e) и их спектр мощности (f).

скорость возмущения f_R в центре спирального рукава (при $R \sim 7$ кпк) должна быть направлена к центру Галактики (т.е. должна иметь отрицательное значение на графике), что можем наблюдать на рис. 5а, но не на рис. 6а. Отметим, что радиальные скорости представляют в этой задаче наибольший интерес, так как они не зависят от учета кривой вращения.

Найденные в настоящей работе параметры можем сравнить с оценками, полученными в работе [13], по выборке цефеид моложе 90 млн. лет (так же с расстояниями Сковрон и др. [20], но с соб-

ственными движениями из каталога Gaia DR2): $f_R = 12.0 \pm 2.6$ км/с, $f_\theta = 8.9 \pm 2.5$ км/с, $\lambda_R = 2.5 \pm 0.3$ кпк ($i_R = -10.8 \pm 3.1^\circ$ для $m = 4$) и $\lambda_\theta = 2.7 \pm 0.5$ кпк ($i_\theta = -11.8 \pm 3.1^\circ$ для $m = 4$). Это сравнение показывает, что отличное согласие оценок в тангенциальном направлении f_θ , λ_θ , i_θ и меньшее согласие оценок в радиальном направлении. Различие обусловлено характером выборок. В нашем случае имеем ограничение выборки по расстоянию с доминированием цефеид, принадлежащим отрезку спирального рукава Кили-Стрельца (рис. 3).

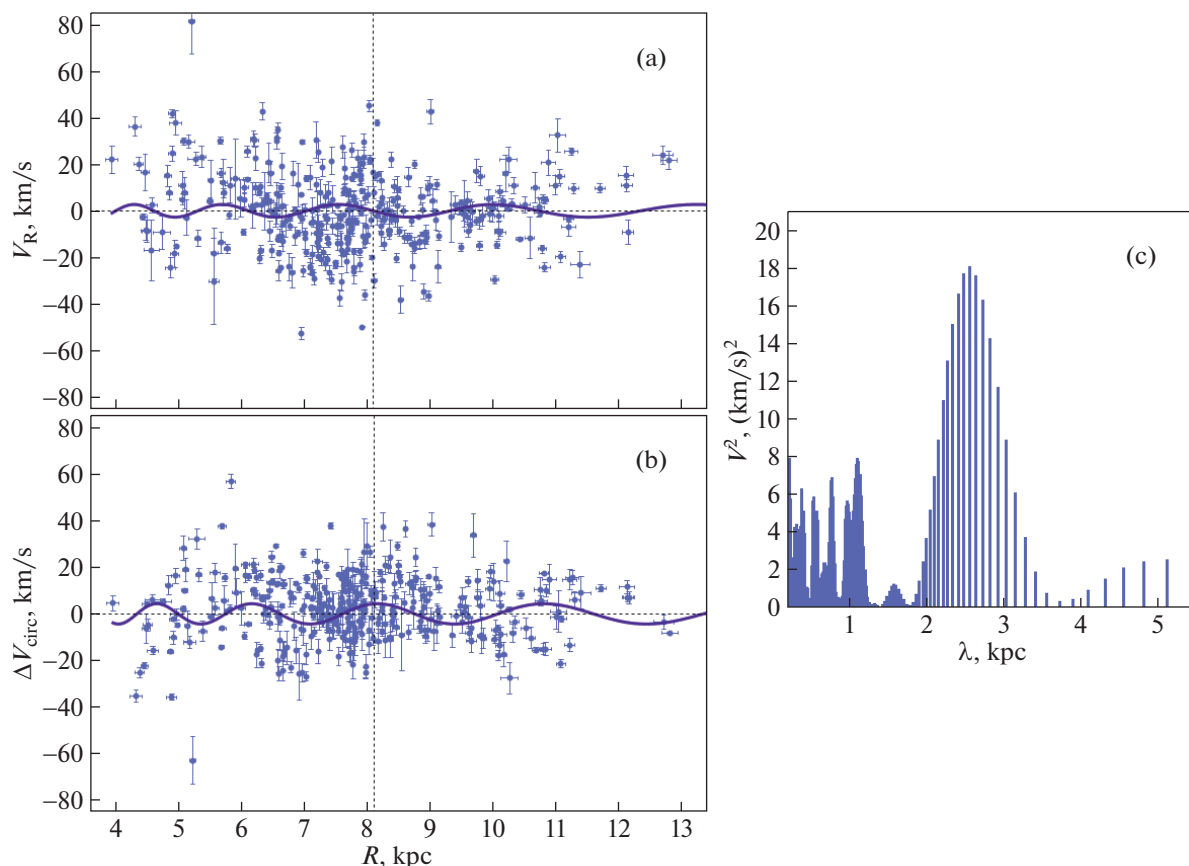


Рис. 6. Радиальные скорости V_R (a) и остаточные скорости вращения ΔV_{circ} цефеид (b) в зависимости от расстояния R , спектр мощности, полученный в результате совместного подхода (c).

Интересно также отметить работу Локтина, Поповой [34], в которой проанализирована кинематика около 1000 рассеянных звездных скоплений (РЗС) различного возраста с собственными движениями звезд из каталога Gaia DR2 и получены следующие оценки: $f_R = 4.6 \pm 0.7$ км/с и $f_\theta = 1.1 \pm 0.4$ км/с.

В работе [35] спектральный анализ был применен к пространственным скоростям 233 молодых

РЗС с собственными движениями и параллаксами из каталога Gaia EDR3. Было показано принципиальное согласие в значениях длины волны и скорости возмущений, найденных независимо по каждому виду скоростей, и получены следующие оценки: $\lambda_R = 3.3 \pm 0.5$ кпк и $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.6$ кпк, где $i_R = -14.5 \pm 2.1^\circ$ и $i_\theta = -11.4 \pm 2.6^\circ$ для $m = 4$ и принятому $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк. Амплитуды радиальных и тангенциальных скоростей возмущений

Таблица 2. Кинематические параметры, найденные по 308 цефеидам с фундаментальной модой пульсаций

Параметры	$V_r + V_l + V_b$	V_r	V_l
U_\odot , км/с	8.77 ± 0.69	9.54 ± 1.34	8.34 ± 1.08
V_\odot , км/с	12.68 ± 0.88	13.81 ± 1.23	7.98 ± 2.01
W_\odot , км/с	8.27 ± 0.79		
Ω_0 , км/с/кпк	28.52 ± 0.25		28.99 ± 0.37
Ω'_0 , км/с/кпк ²	-3.877 ± 0.068	-3.870 ± 0.099	-3.911 ± 0.136
Ω''_0 , км/с/кпк ³	0.641 ± 0.047	0.619 ± 0.093	0.575 ± 0.085
σ_0 , км/с	11.84	14.00	14.27

Примечание. Расстояния из работы [20] были увеличены на 10%.

составили $f_R = 9.1 \pm 0.8$ км/с и $f_\theta = 4.6 \pm 1.2$ км/с соответственно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнение расстояний до цефеид, полученных на основе соотношения “период–светимость”, с расстояниями, опирающимися на тригонометрические параллаксы каталога Gaia. Для этого использована выборка молодых цефеид из работы [20]. Это 363 цефеиды моложе 120 млн. лет, которые расположены не далее 5 кпк от Солнца. Показано, что шкалу Сковрон и др. [20] необходимо удлинить примерно на 10%.

Показано, что скорректированная шкала Сковрон и др. [20] находится в хорошем согласии со шкалой, основанной на тригонометрических параллаксах каталога Gaia EDR3, в которой учтена систематическая поправка $\Delta\pi$. Скорректированная шкала Сковрон и др. [20] также находится в хорошем согласии со шкалами из работы Байлера-Джонса и др. [25].

С использованием скорректированной шкалой расстояний Сковрон и др. [20] получены новые оценки групповой скорости Солнца и параметров вращения Галактики. Проведен также спектральный анализ скоростей V_R и ΔV_{circ} с целью оценки параметров галактической спиральной волны плотности.

При совместном решении кинематических уравнений получены следующие оценки: $(U_\odot, V_\odot, W_\odot) = (9.03, 11.58, 8.01) \pm (0.65, 0.81, 0.62)$ км/с, а также: $\Omega_0 = 28.87 \pm 0.23$ км/с/кпк, $\Omega'_0 = -3.894 \pm \pm 0.063$ км/с/кпк² и $\Omega''_0 = 0.602 \pm 0.044$ км/с/кпк³, где ошибка единицы веса составила $\sigma_0 = 11.89$ км/с и $V_0 = 233.9 \pm 3.4$ км/с (для принятого расстояния $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк). Здесь были использованы расстояния до цефеид из работы [20], умноженные на коэффициент 1.1. Используемая выборка на 85% состоит из цефеид с фундаментальной модой пульсаций. Показано, что не имеется существенных различий между оценками кинематических параметров, найденных по однородной в смысле моды пульсаций и смешанной выборками цефеид.

На основе отдельного спектрального анализа – радиальных V_R , остаточных тангенциальных ΔV_{circ} и вертикальных скоростей получены следующие оценки: $f_R = 5.5 \pm 2.0$ км/с, $f_\theta = 7.1 \pm \pm 2.0$ км/с, $f_W = 3.9 \pm 2.0$ км/с, $\lambda_R = 1.9 \pm 0.5$ кпк ($i_R = -8.3 \pm 2.5^\circ$ для $m = 4$), $\lambda_\theta = 2.6 \pm 0.5$ кпк ($i_\theta = -11.4 \pm 2.8^\circ$ для $m = 4$), $\lambda_W = 2.4 \pm 0.5$ кпк ($i_W = -10.7 \pm 2.7^\circ$ для $m = 4$), $(\chi_\odot)_R = -208 \pm 16^\circ$, $(\chi_\odot)_\theta = -185 \pm 18^\circ$ и $(\chi_\odot)_W = -138 \pm 18^\circ$. При этом анализе также расстояния до цефеид из работы [20] были умножены на коэффициент 1.1.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны рецензенту за полезные замечания, которые способствовали улучшению статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. S. Leavitt, Ann. Harvard College Observ. **60**, 87 (1908).
2. H. S. Leavitt and E. C. Pickering, Harvard College Observ. Circ. **173**, 1 (1912).
3. *The HIPPARCOS and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200 (1997).
4. M. Feast and P. Whitelock, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **291**, 683 (1997).
5. A. M. Mel'nik, P. Rautiainen, L. N. Berdnikov, A. K. Dambis, and A. S. Rastorguev, Astron. Nachricht. **336**, 70 (2015).
6. A. M. Mel'nik, A. K. Dambis, and A. S. Rastorguev, Astron. Letters **25**, 518 (1999).
7. V. V. Bobylev and A. T. Bajkova, Astron. Letters **38**, 638 (2012).
8. A. K. Dambis, L. N. Berdnikov, Yu. N. Efremov, A. Yu. Kniazev, et al., Astron. Letters **41**, 489 (2015).
9. I. I. Nikiforov and A. V. Veselova, Astron. Letters **44**, 81 (2018).
10. A. V. Veselova and I. I. Nikiforov, Res. Astron. and Astrophys. **20**, 209 (2020).
11. X. Chen, S. Wang, L. Deng and R. de Grijs, Astrophys. J. **859**, id. 137 (2018).
12. D. Kawata, J. Bovy, N. Matsunaga and J. Baba, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **482**, 40 (2019).
13. V. V. Bobylev, A. T. Bajkova, A. S. Rastorguev, and M. V. Zabolotskikh, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **502**, 4377 (2021).
14. J. D. Fernie, Astron. J. **73**, 995 (1968).
15. L. N. Berdnikov, Astron. Letters **13**, 45 (1987).
16. V. V. Bobylev, Astron. Letters **39**, 753 (2013).
17. S. M. Andrievsky, J. R. D. Lépine, S. A. Korotín, R. E. Luck, V. V. Kovtyukh, and W. J. Maciel, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **428**, 3252 (2013).
18. V. A. Marsakov, V. V. Koval', V. V. Kovtyukh, and T. V. Mishenina, Astron. Astrophys. Trans. **28**, 367 (2014).
19. V. V. Kovtyukh, S. M. Andrievsky, R. P. Martin, S. A. Korotín, et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **489**, 2254 (2019).
20. D. M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, et al., Science **365**, 478 (2019).
21. P. Mróz, A. Udalski, D. M. Skowron, J. Skowron, et al., Astrophys. J. **870**, id. L10 (2019).
22. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. **616**, id. 1 (2018).
23. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. **649**, id. 1 (2021).
24. T. E. Lutz and D. H. Kelker, Publ. Astron. Soc. Pacific **85**, 573 (1973).

25. *C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, and R. Andrae*, *Astron. J.* **161**, id. 147 (2021).
26. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021).
27. *C. C. Lin and F. H. Shu*, *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
28. *A. T. Bajkova and V. V. Bobylev*, *Astron. Letters* **38**, 549 (2012).
29. *A. Udalski, M. K. Szymański, and G. Szymański*, *Acta Astronomica* **65**, 1 (2015).
30. *R. I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, C. Georgy, and G. Meynet*, *Astron. and Astrophys.* **591**, id. A8 (2016).
31. *L. Lindgren, S. A. Klioner, J. Hernández, A. Bombrun, et al.*, *Astron. and Astrophys.* **649**, id. A2 (2021).
32. *M. V. Zabolotskikh, A. S. Rastorguev, and A. K. Dambis*, *Astron. Letters* **28**, 454 (2002).
33. *A. S. Rastorguev, N. D. Utkin, M. V. Zabolotskikh, A. K. Dambis, A. T. Bajkova, and V. V. Bobylev*, *Astrophys. Bull.* **72**, 122 (2017).
34. *A. V. Loktin and M. E. Popova*, *Astrophys. Bull.* **74**, 270. (2019).
35. *V. V. Bobylev and A. T. Bajkova*, *Astron. Letters* **48**, 9 (2022).