

ОЦЕНКА РАССТОЯНИЯ ОТ ЦЕНТРА ГАЛАКТИКИ ДО СОЛНЦА ПО ЦЕФЕИДАМ, РАСПОЛОЖЕННЫМ БЛИЗКО К СОЛНЕЧНОМУ КРУГУ

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1*}

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

Поступила в редакцию 21.08.2023 г.

После доработки 21.08.2023 г.; принята к публикации 14.09.2023 г.

По цефеидам, расположенным вблизи солнечного круга, определены значение галактоцентрического расстояния Солнца R_0 и скорость вращения Галактики на околосолнечном расстоянии V_0 . Для анализа использована выборка ~ 200 классических цефеид из каталога Сковрон и др. (2019), где расстояния до них были определены на основе соотношения период–светимость. Для этих звезд собственные движения и лучевые скорости взяты из каталога Gaia DR3. Найденные значения R_0 заключены в интервале 7.8–8.3 кпк в зависимости от гелиоцентрического расстояния звезд выборки, от принятых значений скорости Солнца относительно местного стандарта покоя, а также от того учитываются или нет возмущения, вызванные галактической спиральной волной плотности. Дисперсия оценок R_0 составляет ~ 2 кпк. Аналогично значения V_0 заключены в интервале 240–270 км/с с дисперсией оценок 70–90 км/с. Итоговыми считаем следующие оценки: $R_0 = 8.24 \pm 0.20$ кпк и $V_0 = 268 \pm 8$ км/с, найденные с учетом возмущений от галактической спиральной волны плотности.

Ключевые слова: классические цефеиды, галактоцентрическое расстояние Солнца, скорость вращения Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010823090024, EDN: OGRDUJ

ВВЕДЕНИЕ

Значение галактоцентрического расстояния Солнца R_0 является важным параметром для изучения структуры, кинематики и динамики Галактики. Известны разнообразные методы оценки этой величины. Согласно Риду (1993), такие измерения можно разделить на прямые, вторичные и непрямые. Бланд-Хотторн, Герхард (2016) предлагают делить такие измерения на прямые, модельно-зависимые и вторичные. Никифоров (2004) предложил особую классификацию с разделением измерений на три класса в зависимости от типа измерений, типа оценки R_0 и типа опорных объектов.

В полном смысле прямым является метод определения абсолютного тригонометрического параллакса объекта, находящегося вблизи галактического центра. По РСДБ-наблюдениям нескольких источников мазерного излучения в области Sgr B2 этим методом Ридом и др. (2009) была получена оценка $R_0 = 7.9^{+0.8}_{-0.7}$ кпк. К прямым можно отнести и метод динамического параллакса. В настоящее время анализ орбитального движения звезд

вокруг центральной сверхмассивной черной дыры позволяет оценивать этим методом R_0 с относительной погрешностью около 0.3% (Коллаборация GRAVITY, 2019). Согласно одному из последних определений этой коллаборации, $R_0 = 8275 \pm 9_{\text{stat}} \pm 33_{\text{sys}}$ пк (Коллаборация GRAVITY, 2021).

Для оценки R_0 важны такие переменные звезды, как классические цефеиды, цефеиды типа II и переменные типа RR Лиры. Высокая точность оценок расстояния до этих переменных возможна благодаря соотношениям период–светимость (Левитт, 1908; Левитт, Пикеринг, 1912), а также период–Весенхейт (Мадоре, 1982), которые в настоящее время хорошо откалиброваны с помощью высокоточных тригонометрических параллаксов звезд (Рипепи и др., 2019).

Цефеиды типа II и переменные типа RR Лиры распределены по всей Галактике. Относительно более молодые классические цефеиды распределены по всему галактическому диску. Для оценки R_0 используются как геометрические, так и кинематические их свойства. Например, известны методы оценки R_0 , основанные на предположении о симметричном распределении цефеид в балдже Галактики или симметричном распределении в Галактике

* Электронный адрес: bob-v-vzz@rambler.ru

переменных звезд — членов шаровых скоплений. Довольно часто оценки R_0 получают при анализе кривой вращения Галактики, где R_0 выступает как искомое неизвестное наряду с другими параметрами. Впрочем оценки R_0 при анализе кривой вращения Галактики получают не только по цефеидам, но и по другим объектам галактического диска — мазерным источникам, OB-звездам, рассеянными звездным скоплениям и др.

Кроме первоклассных расстояний до цефеид важно иметь их высокоточные собственные движения и лучевые скорости. С этой точки зрения большой интерес представляет космический эксперимент Gaia (Коллаборация Gaia, 2016), посвященный определению высокоточных тригонометрических параллаксов, собственных движений и ряда фотометрических характеристик более 1.5 млрд звезд. В опубликованной недавно версии Gaia DR3 (Коллаборация Gaia, 2022) существенно улучшены лучевые скорости звезд — уточнены ранее измеренные значения и определены новые для большого количества звезд. При этом значения тригонометрических параллаксов и собственных движений звезд скопированы из более ранней версии каталога Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Коллаборация Gaia, 2021).

Различными авторами регулярно выполняют обзоры индивидуальных оценок значений R_0 с выводом среднего значения. Например, по 65 оригинальным измерениям, полученным с 1974 по 2004 г., Никифоров (2004) нашел $R_0 = 7.9 \pm 0.2$ кпк, из анализа 53 индивидуальных оценок, полученных с 1992 по 2011 г., Малкин (2013) вычислил среднее $R_0 = 8.0 \pm 0.25$ кпк, по 56 измерениям, полученным с 2011 по 2021 г., Бобылев, Байкова (2021) нашли $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк.

Целью настоящей работы является оценка R_0 и круговой скорости вращения Галактики на околосолнечном расстоянии V_0 с использованием большой выборки классических цефеид, расположенных вблизи солнечного круга. Для этой цели используются цефеиды из каталога Сковрон и др. (2019), где расстояния до них были определены на основе соотношения период—светимость со средней ошибкой около 5%. Собственные движения и лучевые скорости этих цефеид взяты нами из каталога Gaia DR3. Применен специфический метод оценки R_0 и V_0 , основанный на анализе близких к солнечному кругу объектов. Метод интересен тем, что даже по одной звезде, расположенной на солнечном круге, можно оценить значения R_0 и V_0 .

МЕТОД

Для оценки галактоцентрического расстояния Солнца R_0 и круговой скорости вращения Галакти-

ки на околосолнечном расстоянии V_0 с использованием объектов, расположенных вблизи солнечного круга, известен способ (см., например, Шехтер и др. 1992), который будем называть классическим:

$$R_0 = \frac{r}{2 \cos l}, \quad V_0 = -\frac{V_l}{2 \cos l}, \quad (1)$$

где r — гелиоцентрическое расстояние звезды, V_l — скорость, направленная вдоль галактической долготы ($V_l = 4.74r\mu_l \cos b$). Здесь предполагается, что лучевая скорость V_r каждой звезды, лежащей на солнечном круге, равна нулю.

В работе Софуэ и др. (2011) предложена следующая модификация классического способа:

$$R_0 = \frac{r}{2 \cos l} \left(1 - \frac{d}{r} \right), \quad (2)$$

$$V_0 = -\frac{V_l}{2 \cos l} \left(1 - \frac{d}{r} \right) + V_r \operatorname{ctg} l, \quad (3)$$

где d — расстояние по лучу зрения звезды от солнечного круга

$$d = -\frac{V_r}{A \sin 2l}, \quad (4)$$

A — постоянная Оорта, значение которой в настоящей работе принимается равным $A = 15$ км/с/кпк. Скорости V_r и V_l должны быть даны относительно местного стандарта покоя. Для приведения наблюдаемых гелиоцентрических скоростей звезд к местному стандарту покоя используем два набора скоростей. В первом случае берем скорости из работы Шонриха и др. (2010):

$$(U, V, W)_\odot = (11.10, 12.24, 7.25) \text{ км/с}, \quad (5)$$

а во втором случае используем скорости, найденные по большой выборке классических цефеид в работе Бобылева, Байковой (2023):

$$(U, V, W)_\odot = (9.39, 15.96, 6.88) \text{ км/с}. \quad (6)$$

Скорости (6) близки к значениям соответствующих скоростей так называемого стандартного апекса Солнца $(U, V, W)_\odot = (10.3, 15.3, 7.7)$ км/с, которые были использованы Софуэ и др. (2011) при анализе мазеров Onsalá 1 и Onsalá 2N. При повторении нами их вычислений обнаружилось, что оценка R_0 довольно сильно зависит от принятой скорости Солнца относительно местного стандарта покоя. Поэтому в настоящей работе используем два набора таких скоростей.

Ошибки определения R_0 и V_0 оцениваются в соответствии со следующими формулами:

$$\delta R_0 = \frac{1}{2 \cos l} \left[\delta r^2 + \left(\frac{\delta V_r}{A \sin 2l} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

$$\delta V_0 = \frac{1}{2 \cos l} \times \quad (8)$$

$$\times \left[\delta V_l^2 + V_l^2 \delta V_r^2 \left(\frac{1}{Ar \sin 2l} - \frac{2 \cos^2 l}{V_l \sin l} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Согласно подходу Софуэ и др. (2011), факт принадлежности звезды к области солнечного круга должен быть согласован с ее наблюдаемыми скоростями и параметрами кривой вращения Галактики.

Ошибки (7) и (8) вычисляются для каждой звезды, в дальнейшем они могут служить весами при вычислении среднего взвешенного, как это сделано в работе Софуэ и др. (2011). В настоящей работе мы предпочитаем вычислять средние значения R_0 и V_0 , стандартные отклонения σ_{R_0} и σ_{V_0} , а также ошибки среднего ε_{R_0} и ε_{V_0} с использованием известных соотношений.

Выражения (2)–(3) получены Софуэ и др. (2011) в предположении о чисто круговых движениях звезд вокруг галактического центра. В работе Бобылева (2013) была предложена модификация метода с исключением систематических некруговых движений звезд, связанных с влиянием галактической спиральной волны плотности. Для учета указанных эффектов служат следующие формулы:

$$V_r = -u_{\odot} \cos b \cos l - v_{\odot} \cos b \sin l - \quad (9)$$

$$- w_{\odot} \sin b + f_r(GR) +$$

$$+ \tilde{v}_{\theta} \sin(l + \theta) \cos b -$$

$$- \tilde{v}_R \cos(l + \theta) \cos b + V',$$

$$V_l = u_{\odot} \sin l - v_{\odot} \cos l + f_p(GR) + \quad (10)$$

$$+ \tilde{v}_{\theta} \cos(l + \theta) + \tilde{v}_R \sin(l + \theta) + V',$$

где $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot})$ — групповая скорость рассматриваемых звезд, вызванная пекулярным движением Солнца, через $f_r(GR)$ и $f_p(GR)$ обозначены функции, описывающие дифференциальное галактическое вращение, конкретный вид которых в нашем случае не существен, через V' обозначено влияние остаточных эффектов.

Для учета влияния спиральной волны плотности использована кинематическая модель, основанная на линейной теории волн плотности Линя и Шу (1964), в которой возмущение потенциала имеет вид бегущей волны, тогда

$$\tilde{v}_R = f_R \cos \chi, \quad \tilde{v}_{\theta} = f_{\theta} \sin \chi, \quad (11)$$

где f_R и f_{θ} — амплитуды возмущений радиальной (возмущение направлено к центру Галактики в спиральном рукаве) и тангенциальной (направленной вдоль галактического вращения) скоростей; фаза волны

$$\chi = m[\text{ctg}(i) \ln(R/R_0) - \theta] + \chi_{\odot}, \quad (12)$$

i — угол закрутки спиралей ($i < 0$ для закручивающихся спиралей); m — число спиральных рукавов; θ — позиционный угол звезды: $\text{tg } \theta = y/(R_0 - x)$, где x, y — гелиоцентрические галактические прямоугольные координаты звезды, причем ось x направлена от Солнца к галактическому центру, а направление оси y совпадает с направлением галактического вращения; χ_{\odot} — фазовый угол Солнца. Длина спиральной волны λ — расстояние (по галактоцентрическому радиальному направлению) между соседними отрезками спиральных рукавов в околосолнечной окрестности, вычисляется на основе соотношения $\text{tg } |i| = \lambda m / (2\pi R_0)$. Поэтому при моделировании можем задавать либо угол закрутки, либо длину волны.

ДАННЫЕ

Основой для изучения нам послужила работа Сковрон и др. (2019), где для 2431 классической цефеиды дано расстояние, возраст, период пульсации и фотометрические данные. Наблюдения этих переменных звезд были выполнены в рамках программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Удальский и др., 2015). Расстояния до цефеид были вычислены на основе калибровочных соотношений период–светимость, найденных Вангом и др. (2018) по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне для восьми полос. Это четыре полосы каталога космического телескопа WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Чен и др., 2018), W1–W4: [3.35], [4.60], [11.56] и [22.09] мкм и четыре полосы обзора GLIMPSE (Spitzer Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire, Бенджамин и др., 2003): [3.6], [4.5], [5.8] и [8.0] мкм. Для каждой звезды в каталоге Сковрон и др. (2019) вычислено значение поглощения A_{K_s} по картам поглощения. Согласно этим авторам, ошибка определения расстояния до цефеид в их каталоге составляет ~5%. Оценки возраста Сковрон и др. (2019) получили по методике Андерсона и др. (2016) с учетом периода осевого вращения звезд и индекса металличности.

В работе Бобылева и др. (2021) при изучении кинематики большой выборки классических цефеид было показано, что шкалу Сковрон и др. (2019) необходимо слегка удлинить. Поэтому в настоящей работе расстояния до цефеид из этого каталога были увеличены на 10%. Для анализа отбираем цефеиды из интервала R : 7–9 кпк, вычислив для них галактоцентрическое расстояние R с использованием предварительного значения $R_0 = 8.0$ кпк.

В методе Софуэ и др. (2011) с использованием соотношений (2)–(8) требуется, чтобы звезды лежали в первом и четвертом галактических квадрантах, т.е. в достаточно узком интервале долгот

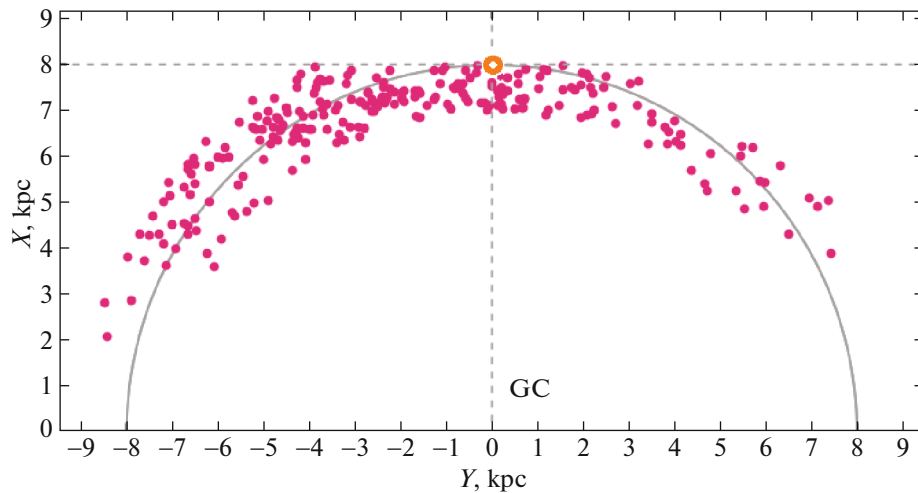


Рис. 1. Распределение отобранных для анализа цефеид в проекции на галактическую плоскость XY , дан круг радиусом 8 кпк, положение Солнца отмечено желтым кружком, GC — центр Галактики.

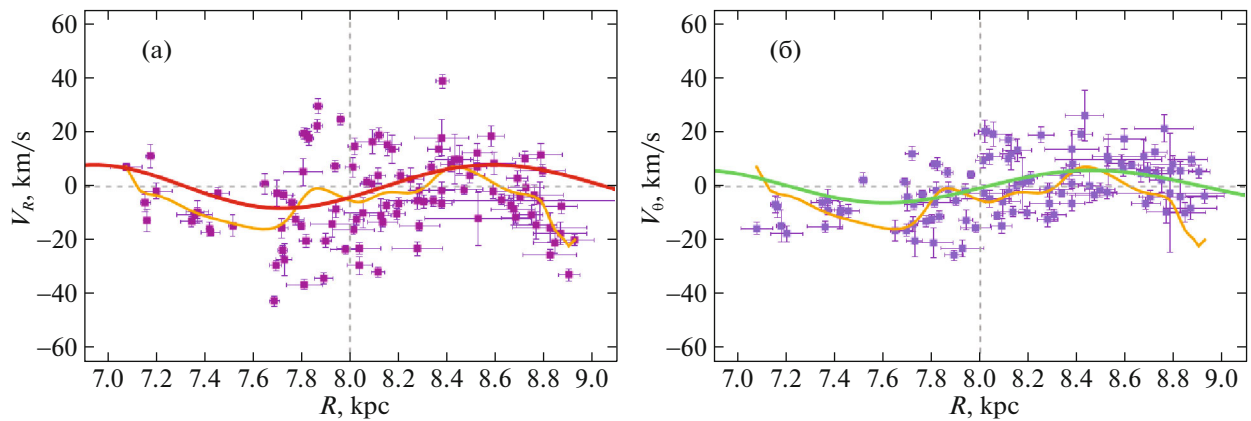


Рис. 2. Радиальные скорости цефеид V_R (а) и их тангенциальные скорости V_θ (б) в зависимости от расстояния R .

$|l| < 80^\circ$, а также необходимо иметь $d \ll r$. Поэтому применяем ограничение на координату x , а вычисления выполняем при различных ограничениях на расстояние r . Для того чтобы улучшить однородность выборки, берем цефеиды моложе 120 млн лет. Наконец, не должно быть больших значений лучевых скоростей. В итоге используем следующие ограничения:

$$\begin{aligned} 7 < R < 9 \text{ кпк}, \quad x > 0 \text{ кпк}, \\ \text{AGE} < 120 \text{ млн лет}, \quad |V_r| < 20 \text{ км/с}. \end{aligned} \quad (13)$$

При таких условиях отбора получилась выборка из примерно 200 цефеид со средним возрастом 87 млн лет. На рис. 1 дано распределение отобранных цефеид в проекции на галактическую плоскость XY , где ось X направлена из центра Галактики в сторону Солнца, а ось Y направлена по вращению Галактики.

На рис. 2 даны радиальные V_R и тангенциальные скорости V_θ цефеид в зависимости от расстоя-

ния R . Здесь цефеиды были взяты при условии $r > 3$ кпк. Хорошо видно наличие периодичности как в радиальных, так и в тангенциальных скоростях цефеид. Желтыми линиями на рисунке показаны усредненные скорости (усредняет программа GNU PLOT), а жирной красной и зеленой периодической кривой показано подобранное нами влияние спиральной волны плотности. Для этого была использована четырехрукавную модель спирального узора Галактики $m = 4$ с длиной волны $\lambda = 1.7$ кпк, амплитудами скоростей возмущения f_R и f_θ , равными 7 и 4 км/с соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1–3 даны значения R_0 и V_0 , полученные тремя способами как без учета, так и с учетом влияния спиральной волны плотности. Данные в этих таблицах были вычислены с использованием параметров движения Солнца относительно местного стандарта покоя (5).

Таблица 1. Оценки R_0 и V_0 , полученные классическим способом (1)

Параметры	$r > 2$ кпк	$r > 2.5$ кпк	$r > 3.0$ кпк	$r > 3.5$ кпк	$r > 4$ кпк
N_*	117	104	94	84	75
$R_0 \pm \varepsilon_{R_0}$, кпк	7.68 ± 0.22	7.98 ± 0.22	8.24 ± 0.21	8.32 ± 0.18	8.41 ± 0.19
σ_{R_0} , кпк	2.39	2.20	2.02	1.69	1.61
$V_0 \pm \varepsilon_{V_0}$, км/с	248 ± 8	259 ± 8	265 ± 8	270 ± 8	271 ± 8
σ_{V_0} , км/с	87	82	79	71	67

Таблица 2. Оценки R_0 и V_0 , полученные способом Софуэ и др. (2011) с использованием соотношений (2)–(8)

Параметры	$r > 2$ кпк	$r > 2.5$ кпк	$r > 3.0$ кпк	$r > 3.5$ кпк	$r > 4$ кпк
N_*	119	105	94	86	78
$R_0 \pm \varepsilon_{R_0}$, кпк	7.44 ± 0.21	7.73 ± 0.21	7.83 ± 0.21	7.89 ± 0.22	7.97 ± 0.23
σ_{R_0} , кпк	2.28	2.15	2.08	2.06	2.07
$V_0 \pm \varepsilon_{V_0}$, км/с	239 ± 8	249 ± 8	249 ± 8	252 ± 8	252 ± 8
σ_{V_0} , км/с	82	79	76	74	74

Таблица 3. Оценки R_0 и V_0 , полученные способом Софуэ и др. (2011) с дополнительным учетом влияния спиральной волны плотности со следующими значениями параметров волны: $m = 4$, $\lambda = 1.7$ кпк, $\chi_{\odot} = -60^\circ$, $f_R = 7$ км/с и $f_{\theta} = 4$ км/с

Параметры	$r > 2$ кпк	$r > 2.5$ кпк	$r > 3.0$ кпк	$r > 3.5$ кпк	$r > 4$ кпк
N_*	122	109	97	89	80
$R_0 \pm \varepsilon_{R_0}$, кпк	7.38 ± 0.21	7.67 ± 0.20	7.78 ± 0.21	7.78 ± 0.22	7.96 ± 0.22
σ_{R_0} , кпк	2.32	2.14	2.06	2.06	1.99
$V_0 \pm \varepsilon_{V_0}$, км/с	244 ± 8	253 ± 8	252 ± 8	254 ± 8	257 ± 9
σ_{V_0} , км/с	87	82	77	78	77

В табл. 4 и 5 даны значения R_0 и V_0 , полученные двумя способами как без учета, так и с учетом влияния спиральной волны плотности (также как в табл. 2 и 3), с параметрами движения Солнца относительно местного стандарта покоя вида (6).

Как видно из табл. 1, классическим методом найдены значения R_0 и V_0 , которые неплохо согласуются с известными, например, отмеченными во Введении. Однако классический метод обладает важным недостатком — лучевые скорости всех рассматриваемых цефеид отличны от нуля. Поэтому результаты, представленные в табл. 2–5, являются более интересными, так как они получены свободным от такого недостатка методом.

Учет возмущений от спиральной волны плотности благоприятно сказывается на оценках R_0 и V_0 . Значения R_0 и V_0 принципиально не изменяются, но уменьшаются, хотя и немного, дисперсии σ_{R_0} и ошибки ε_{R_0} . Поэтому мы отдаем предпочтение параметрам, которые указаны в табл. 3 и 5. Ориентируемся на значения, полученные при ограничении $r > 3.0$ кпк, так как здесь и звезд еще достаточно много, и ошибки малы.

Отметим, что главный интерес в настоящей работе связан с определением R_0 . Скорость же вращения Галактики на околосолнечном расстоянии V_0 более надежно определяется из анализа кинематики больших звездных выборок. Напри-

Таблица 4. Оценки R_0 и V_0 , полученные способом Софуэ и др. (2011), с использованием соотношений (2)–(8) и параметрами движения Солнца относительно местного стандарта покоя вида (6)

Параметры	$r > 2$ кпк	$r > 2.5$ кпк	$r > 3.0$ кпк	$r > 3.5$ кпк	$r > 4$ кпк
N_*	107	96	89	82	75
$R_0 \pm \varepsilon_{R_0}$, кпк	8.07 ± 0.22	8.30 ± 0.22	8.30 ± 0.22	8.23 ± 0.22	8.31 ± 0.22
σ_{R_0} , кпк	2.31	2.19	2.03	1.97	1.93
$V_0 \pm \varepsilon_{V_0}$, км/с	263 ± 8	269 ± 8	265 ± 8	265 ± 8	265 ± 8
σ_{V_0} , км/с	87	84	77	75	73

Таблица 5. Оценки R_0 и V_0 , полученные способом Софуэ и др. (2011) с параметрами движения Солнца относительно местного стандарта покоя вида (6) с дополнительным учетом влияния спиральной волны плотности со следующими значениями параметров волны: $m = 4$, $\lambda = 1.7$ кпк, $\chi_{\odot} = -60^\circ$, $f_R = 7$ км/с и $f_{\theta} = 4$ км/с

Параметры	$r > 2$ кпк	$r > 2.5$ кпк	$r > 3.0$ кпк	$r > 3.5$ кпк	$r > 4$ кпк
N_*	114	102	93	84	76
$R_0 \pm \varepsilon_{R_0}$, кпк	7.80 ± 0.21	8.14 ± 0.20	8.24 ± 0.20	8.27 ± 0.20	8.35 ± 0.21
σ_{R_0} , кпк	2.21	2.04	1.91	1.84	1.82
$V_0 \pm \varepsilon_{V_0}$, км/с	258 ± 8	268 ± 8	268 ± 8	269 ± 8	269 ± 9
σ_{V_0} , км/с	89	85	80	78	78

мер, по кинематике 773 классических цефеид с собственными движениями и лучевыми скоростями из каталога Gaia DR2 (Коллаборация Gaia, 2018) Мроз и др. (2021) нашли $V_0 = 233.6 \pm 2.8$ км/с; по кинематике около 800 классических цефеид с собственными движениями и лучевыми скоростями из каталога Gaia DR2 в работе Бобылева и др. (2021) была получена оценка $V_0 = 240 \pm 3$ км/с; по выборке из $\sim 23\,000$ красных гигантов Эйлерс и др. (2021) нашли $V_0 = 229.0 \pm 0.2$ км/с.

Как видно из сравнения данных табл. 2–4 и табл. 3–5, полученные результаты сильно зависят от принимаемой скорости Солнца относительно местного стандарта покоя.

В работе Бобылева (2013) по 18 цефеидам с собственными движениями из каталогов Hipparcos (1997) и UCAC4 (Захариас и др., 2012) были получены следующие оценки: $R_0 = 7.64 \pm 0.32$ кпк и $V_0 = 217 \pm 11$ км/с. При этом были использованы параметры Шонриха и др. (2010) для скорости Солнца (5) и выполнен учет влияния спиральной волны плотности. Таким образом, этот результат необходимо сравнивать с данными, указанными в табл. 3. В итоге имеем хорошее согласие оценок, но в настоящей работе использовано большее ко-

личество цефеид, поэтому получены существенно меньшие ошибки ε_{R_0} и ε_{V_0} .

История определения скорости Солнца относительно местного стандарта покоя весьма драматична. Так, по данным каталога Hipparcos, Денен, Бинни (1998) нашли $(U, V, W)_{\odot} = 10.00, 5.25, 7.17$ км/с. Если с этими скоростями повторить подход табл. 4 для случая $r > 3.0$ кпк, то получим довольно маленькие значения $R_0 = 7.64 \pm 0.21$ кпк и $V_0 = 240 \pm 8$ км/с. Параметры (5), найденные в работе Шонриха и др. (2010), более сбалансированные. В настоящее время они широко используются при кинематических исследованиях.

Параметры стандартного апекса Солнца $U, V, W_{\odot} = 10.3, 15.3, 7.7$ км/с определены по небольшой выборке ярких звезд, зафиксированы как движение Солнца со скоростью 20 км/с в направлении $\alpha, \delta = 18^{\text{h}}, 30^\circ$. Однако эти параметры широко используются радиоастрономами для сохранения преемственности результатов, полученных ими, начиная с 50-х гг. XX в.

В работе Бобылева, Байковой (2014) показано, что имеется влияние галактической спиральной волны плотности на значения скорости Солнца

относительно местного стандарта покоя, определяемые по молодым звездам диска. Поэтому, по нашему мнению, параметры (6) более строго учитывают скорость Солнца относительно местного стандарта покоя в точке $R = R_0$, т.е. они учитывают скорость Солнца, возмущенную спиральной волной в этой точке. Поэтому параметры, указанные в табл. 4 и 5, являются более интересными по сравнению с данными табл. 2 и 3.

Во Введении были указаны оценки R_0 , полученные как среднее из анализа многочисленных индивидуальных определений. Здесь отметим ряд последних индивидуальных оценок. В работе Люнга и др. (2023) получена оценка $R_0 = 8.23 \pm 0.12$ кпк по кинематике звезд в центральном баре Галактики с использованием данных каталогов APOGEE DR17 (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, Блантон и др., 2017) и Gaia EDR3, дополненных спектрофотометрическими расстояниями. Хей и др. (2023) нашли $R_0 = 8108 \pm 106_{\text{stat}} \pm 93_{\text{sys}}$ пк с использованием около 190 000 полуправильных переменных в балдже Галактики.

Интересно отметить работу Гордона и др. (2023), где представлены новые абсолютные РСДБ-измерения радиисточника Sgr A* в рамках реализации третьей международной небесной системы отсчета (ICRF 3). Наблюдения были проведены в 52 эпохи на решетке VLBA в диапазоне 24 ГГц в период 2006–2022 гг. На основе измеренного собственного движения Sgr A* по галактической долготе эти авторы оценили $V_0 = 248.0 \pm 2.8$ км/с (при заданном значении $R_0 = 8.178 \pm 0.022$ кпк).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые оценки галактоцентрического расстояния Солнца R_0 и скорости вращения Галактики на солнечном расстоянии V_0 . Они найдены специфическим методом, основанным на анализе объектов, расположенных вблизи солнечного круга. Использован как метод в модификации Софуэ и др. (2011), так и расширенный метод с дополнительным учетом влияния спиральной волны плотности. Расширенный метод был предложен ранее Бобылевым (2013) при анализе небольших выборок классических цефеид и областей звездообразования.

В настоящей работе использована выборка классических цефеид из каталога Сковрон и др. (2019), где расстояния до них были определены на основе соотношения период–светимость со средней случайной ошибкой около 5%. Собственные движения и лучевые скорости цефеид были взяты из каталога Gaia DR3. Ранее нами было показано (Бобылев и др. 2021), что цефеидную шкалу

Сковрон и др. (2019) необходимо слегка удлинить. Поэтому в настоящей работе расстояния до цефеид из этого каталога были увеличены на 10%. Для анализа были отобраны около 200 цефеид со средним возрастом 87 млн лет, расположенных в интервале расстояний $7 < R < 9$ кпк.

Найденные значения R_0 заключены в интервале 7.8–8.3 кпк в зависимости от гелиоцентрического расстояния звезд выборки, от принятых значений скорости Солнца относительно местного стандарта покоя, а также от того, учитываются или нет возмущения, вызванные галактической спиральной волной плотности. Дисперсия оценок R_0 составляет около 2 кпк, а ошибка среднего 0.2 кпк. Аналогично значения V_0 заключены в интервале 240–270 км/с, где дисперсия оценок V_0 составляет 70–90 км/с, а ошибка среднего 8 км/с.

Наилучшими мы считаем оценки $R_0 = 8.24 \pm 0.20$ кпк и $V_0 = 268 \pm 8$ км/с, которые были получены по выборке из 93 цефеид с учетом возмущений от галактической спиральной волной плотности. Причем расположены эти цефеиды от Солнца далее 3 кпк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон и др. (R.I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, C. Georgy, and G. Meynet), *Astron. Astrophys.* **591**, A8 (2016).
- Бенджамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler, T.M. Bania, D.P. Clemens, M. Cohen, J.M. Dickey, R. Indebetouw, et al.), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **115**, 953 (2003).
- Бланд-Хотторн, Герхард (J. Bland-Hawthorn and O. Gerhard), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **54**, 529 (2016).
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **39**, 115 (2013) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **39**, 95 (2013)].
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **441**, 142 (2014).
- Бобылев и др. (V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, A.S. Rastorguev, and M.V. Zabolotskikh), *MNRAS* **502**, 4377 (2021).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрон. журн.* **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021)].
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *Res. Astron. Astrophys.* **23**, 045001 (2023).
- Блантон и др. (M.R. Blanton, M.A. Bershady, B. Abolfathi, F.D. Albareti, C. Allende Prieto, A. Almeida, J. Alonso-Garcia, F. Anders, et al.), *Astron. J.* **154**, 28 (2017).
- Ванг и др. (S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng), *Astrophys. J.* **852**, 78 (2018).
- Гордон и др. (D. Gordon, A. de Witt, and C.S. Jacobs), *Astron. J.* **165**, 49 (2023).
- Денен, Бинни (W. Dehnen and J.J. Binney), *MNRAS* **298**, 387 (1998).

13. Захариас и др. (N. Zacharias, C.T. Finch, T.M. Girard, et al.), каталог I/322 в страсбургской базе данных (2012).
14. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, 1 (2016).
15. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
16. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, 1 (2021).
17. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al.), arXiv: 2208.0021 (2022).
18. Коллаборация GRAVITY (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **625**, L10 (2019).
19. Коллаборация GRAVITY (GRAVITY Collaboration, R. Abuter, A. Amorim, M. Bauböck, et al.), *Astron. Astrophys.* **647**, A59 (2021).
20. Левитт (H.S. Leavitt), *Annals of Harvard College Observatory* **60**, 87 (1908).
21. Левитт, Пикеринг (H.S. Leavitt and E.C. Pickering), *Harvard College Observatory Circular* **173**, 1 (1912).
22. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
23. Люнг и др. (H.W. Leung, J. Bovy, and J.T. Mackereth), *MNRAS* **519**, 948 (2023).
24. Мадоре (B.F. Madore), *Astrophys. J.* **253**, 575 (1982).
25. Малкин (Z. Malkin), *Advancing the Physics of Cosmic Distances*, Proc. IAU Symp. No. 289, 2012, Ed. R. de Grijs and G. Bono (2013).
26. Мроз и др. (P. Mróz, A. Udalski, D.M. Skowron, J. Skowron, I. Soszynski, P. Pietrukowicz, M.K. Szymanski, R. Poleski, S. Kozłowski, and K. Ulaczyk), *Astrophys. J.* **870**, L10 (2019).
27. Никифоров (I.I. Nikiforov), *Order and Chaos in Stellar and Planetary Systems*, Proc. Conf. 17–24 August, 2003 at St. Petersburg State University, Russia. Eds G.G. Byrd, K.V. Kholshchevnikov, A.A. Myllari, I.I. Nikiforov and V.V. Orlov. ASP Conf. Proc., V. **316**. San Francisco: Astron. Soc. Pacific, 199 (2004).
28. Рид (M.J. Reid), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **31**, 345 (1993).
29. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, X.W. Zheng, A. Brunthaler, and Y. Xu), *Astrophys. J.* **705**, 1548 (2009).
30. Рипепи и др. (V. Ripepi, R. Molinaro, I. Musella, M. Marconi, S. Leccia and L. Eyer), *Astron. Astrophys.* **625**, 14 (2019).
31. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszynski, M. Szymanski, R. Poleski, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
32. Софуэ и др. (Y. Sofue, T. Nagayama, M. Matsui, and A. Nakagawa), *Publ. Astron. Soc. Japan* **63**, 867 (2011).
33. Удальский и др. (A. Udalski, M.K. Szymański, and G. Szymański), *Acta Astron.* **65**, 1 (2015).
34. Хей и др. (D.R. Hey, D. Huber, B.J. Shappee, J. Bland-Hawthorn, Th. Tepper-Garcia, R. Sanderson, S. Chakrabarti, N. Saunders, et al.), arXiv: 2305.19319 (2023).
35. Чен и др. (X. Chen, S. Wang, L. Deng, R. de Grijs, and M. Yang), *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **237**, 28 (2018).
36. Шехтер и др. (P.L. Schechter, I.M. Avruch, J.A.R. Caldwell, and M.J. Keane), *Astron. J.* **104**, 1930 (1992).
37. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney, and W. Dehnen), *MNRAS* **403**, 1829 (2010).
38. Эйлерс и др. (A.-C. Eilers, D.W. Hogg, H.-W. Rix, and M.K. Ness), *Astrophys. J.* **871**, 120 (2021).
39. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP–1200 (1997).