

ОЦЕНКА РАДИАЛЬНОЙ И ВЕРТИКАЛЬНОЙ ШКАЛ ТОНКОГО ДИСКА ГАЛАКТИКИ ПО ЦЕФЕИДАМ

© 2021 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

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

Поступила в редакцию 22.05.2021 г.

После доработки 22.06.2021 г.; принята к публикации 28.06.2021 г.

Использованы современные данные о 2214 классических цефеидах. Применена модель экспоненциального распределения плотности материи в тонком диске Галактики. Получены новые оценки радиальной шкалы диска h_R , расстояния Солнца от плоскости симметрии z_\odot и вертикальной шкалы диска h_z . По выборке из 1087 цефеид моложе 120 млн лет было найдено $h_R = 2.30 \pm 0.09$ кпк и $h_R = 1.96 \pm 0.12$ кпк по 1127 цефеидам старше 120 млн лет. Оказалось, что по их общему радиальному распределению однозначную оценку h_R получить невозможно. Однако было построено радиальное распределение 806 цефеид разного возраста на момент их рождения, по которому мы нашли $h_R = 2.36 \pm 0.24$ кпк. Показано, что значение h_z сильно зависит от возраста звезд. Так, по 705 цефеидам моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк найдены $z_\odot = -17 \pm 4$ пк и $h_z = 75 \pm 5$ пк. По 393 цефеидам старше 120 млн лет, при $r < 6$ кпк, найдены $z_\odot = -39 \pm 11$ пк и $h_z = 131 \pm 10$ пк.

Ключевые слова: цефеиды, тонкий диск, радиальная шкала диска Галактики, вертикальная шкала диска, структура Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010821070032

ВВЕДЕНИЕ

Пространственная, кинематическая и элементная структуры звездного диска Млечного Пути сложны. Пока не вполне ясно, в какой мере эволюция диска обязана внутренними причинами, а в какой мере спутниковой аккрецией или другим внешним факторам нагрева.

Знание конкретных характеристик распределения материи в галактическом диске важно для построения адекватной модели Галактики. В настоящее время наиболее детализированными являются такие модели Галактики, как Безансонская (Робин, Крезе, 1986; Робин и др., 2003) или TRILEGAL (TRIdimensional model of the GALaxy, Жирарди и др., 2005¹), в которых отражены различные характеристики балджа, тонкого и толстого дисков, межзвездной материи, а также звездного гало и гало темной материи.

Известны различные модельные зависимости для описания распределения плотности в диске Галактики: модель экспоненциального распределения плотности (см., например, Ойха, 2001; Йоши,

2007; Бови и др., 2016), модель самогравитирующего изотермального диска (Конти, Вакка, 1990), гауссова модель (см., например, Маис-Апельянис, 2001; Элиас и др., 2006). Применяются и другие подходы (Рослоу, Кравтер, 2015). Эти зависимости используются для описания распределения материи как в радиальном, так и вертикальном направлениях.

В настоящей работе нас интересуют свойства тонкого диска Галактики. Наиболее просто определяются характеристики вертикального распределения материи, такие как среднее z_\odot и вертикальная шкала h_z . Их значения можно найти непосредственно из анализа гистограммы распределения объектов в зависимости от координаты z , т.е. из анализа гистограммы вида $N - z$ (где N — количество звезд). Для этой цели могут быть использованы объекты из околосолнечной окрестности даже относительно небольшого размера. Так, например, в работе Пискунова и др. (2006) значения этих величин были найдены по данным о рассеянных звездных скоплениях (РЗС), отобранных при условии их полноты из околосолнечной окрестности радиусом 0.85 кпк. Оценкам значений z_\odot и h_z с использованием различных объектов галактического диска посвящены работы Элиаса и

* Электронный адрес: vbobylev@gao.spb.ru

¹ <http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/trilegal/>

др. (2006), Бобылева, Байковой (2016а,б), Сковрон и др. (2019).

Значение радиальной шкалы h_R определить сложнее. Для построения гистограммы распределения объектов в зависимости от галактоцентрического расстояния R требуются их высокоточные (с ошибками менее 10–15%) гелиоцентрические расстояния. Массовых расстояний до звезд требуемой точности до недавнего времени просто не было. Поэтому для оценки значения радиальной шкалы диска h_R использовались фотометрические оценки гелиоцентрических расстояний (с ошибками 20–25%), а также более сложные методы, основанные на извлечении информации из звездных подсчетов в различных от Солнца направлениях. Такие методы применялись в работах Ойха (2001), Рейла, Робин (2001), Жирарди и др. (2005), Бенджамина и др. (2005), Бови и др. (2016).

Однако недавно появилась уникальная работа Сковрон и др. (2019), в которой определены высокоточные (с ошибками около 5%) гелиоцентрические расстояния до 2431 классической цефеиды на основе соотношения период–светимость. Эти цефеиды распределены в широкой области Галактики $3 < R < 25$ кпк. Поэтому в настоящей работе для оценки значения радиальной шкалы h_R мы предполагаем применить к этим объектам прямой метод, основанный на анализе гистограммы вида $N - R$.

Таким образом, целью настоящей работы является переопределение значений радиальной и параметров вертикальной шкалы тонкого диска Галактики. Для этого используются данные о классических цефеидах из работы Сковрон и др. (2019). Применяется модель экспоненциального распределения плотности материи как в радиальном, так и в вертикальном направлениях.

МЕТОДЫ

В случае экспоненциального распределения плотности материи в радиальном направлении (вдоль расстояния звезды от центра Галактики R), наблюдаемая гистограмма распределения объектов описывается выражением следующего вида:

$$N(R) = N_R \exp\left(-\frac{R}{h_R}\right), \quad (1)$$

где N_R — нормировочный коэффициент. В вертикальном направлении (вдоль координатной оси z) аналогичное выражение имеет похожий вид

$$N(z) = N_z \exp\left(-\frac{|z - z_\odot|}{h_z}\right), \quad (2)$$

где среднее значение z_\odot отражает факт возвышения Солнца над плоскостью Галактики, N_z — соответствующий нормировочный коэффициент.

В настоящей работе параметры h_R и N_R , а также h_z , z_\odot и N_z оцениваем методом наименьших квадратов. Для этого удобно прологарифмировать правые и левые части уравнений (1) и (2), тогда уравнения приобретают линейный вид.

В табл. 1 приведены индивидуальные оценки значений радиальной шкалы тонкого и толстого диска Галактики, полученные различными авторами за последние 20 лет с использованием различных звездных каталогов. Довольно большой обзор более ранних оценок этих величин можно найти в работе Ойха (2001). Отметим, что все указанные в таблице значения h_R были получены в предположении об экспоненциальном радиальном падении звездной плотности в соответствии с соотношением (1).

Чем больше значение параметра h в выражениях (1) и (2), тем медленнее спадает плотность вещества — тем протяженнее структура. Значения h_R , собранные в табл. 1, соответствуют так называемой короткой шкале диска, длинной шкале соответствуют значения, превышающие 4 кпк. Примерами служат значения $h_R = 4.1 \pm 0.4$ кпк, найденная де Жонгом и др. (2010) для толстого диска, или значение $h_R = 5.5 \pm 1$ кпк, найденная Круитом (1986).

Обычно галактический диск разделяют на тонкий и толстый. Предполагается, что они имеют различные кинематические и эволюционные свойства, хотя такое разделение часто является достаточно формальным. Некоторые авторы и вовсе оспаривают необходимость разделения диска на тонкий и толстый, считая, что диск гораздо сложнее и состоит из смеси нескольких субпопуляций МАР (Моно Abundance Population), однородных по химсоставу (Бови и др., 2012, 2016; Рикс, Бови, 2013). Тем не менее во втором столбце табл. 1 указан вид диска, к которому цитируемые авторы сами относят свою оценку h_R .

Так, Ойха (2001) нашел значения h_R с использованием данных о звездах из инфракрасного обзора 2MASS (Two Micron All Sky Survey, Скрутски и др., 2006). Звездные подсчеты выполнялись на семи площадках, расположенных в различных частях неба. Объектами подсчетов были в основном звезды спектральных классов G, K и M. Проводилось разделение звезд на члены тонкого и толстого дисков по показателю цвета $J - K_s$.

Женг и др. (2001) использовали данные о 1400 карликах спектрального класса M, которые наблюдались на телескопе им. Хаббла более чем на 300 площадках неба. Для выполнения звездных подсчетов Рейл, Робин (2001) использовали данные из различных каталогов. В работе Робин и др. (2003) описаны результаты определения h_R , полученные из анализа данных инфракрасного обзора DENIS (The DEep Near-Infrared southern sky

Таблица 1. Результаты определения радиальной шкалы диска Галактики h_R

$h_R \pm \varepsilon_{h_R}$, кпк	Диск	Комментарии	Ссылки
2.8 ± 0.3	тонкий	зв. подсчеты по данным 2MASS	[1]
$3.7^{+0.8}_{-0.5}$	толстый	зв. подсчеты по данным 2MASS	[1]
2.75 ± 0.16	тонкий	1400 М-карликов	[2]
2.50 ± 0.50	толстый	зв. подсчеты	[3]
2.80 ± 0.25	тонкий	диск в модели TRILEGAL	[4]
2.53 ± 0.11		диск в центре Галактики	[5]
3.9 ± 0.6		зв. подсчеты по данным GLIMPSE	[6]
2.2 ± 0.2		зв. подсчеты по данным APOGEE	[7]
2.67 ± 0.09	толстый	зв. подсчеты по данным DES	[8]
2.30 ± 0.09	тонкий	1087 цефеид, $\bar{t} \sim 82$ млн лет	настоящая работа
1.96 ± 0.12	тонкий	1127 цефеид, $\bar{t} \sim 200$ млн лет	настоящая работа

Примечание. [1] — Ойха (2001), [2] — Женг и др. (2001), [3] — Рейл, Робин (2001), [4] — Гроеневерген и др. (2002), [5] — Робин и др. (2003), [6] — Бенджамин и др. (2005), [7] — Бови и др. (2016), [8] — Перес и др. (2020).

Survey, Эпштейн и др., 1997), которые они относят к центральной части Галактики. Для оценки радиальной шкалы тонкого диска Гроеневерген и др. (2002) отобрали из обзора ESO (ESO Imaging Survey, Гроеневерген и др., 2002) звезды при следующих ограничениях: $1.3^m < B - V < 2^m$, $20^m < < B < 22^m$, $1.8^m < V - I < 4^m$ и $18^m < I < 20^m$.

В работе Бенджамин и др. (2005) использовались данные из каталога GLIMPSE (Galactic Legacy Mid-Plane Survey Extraordinaire, Бенджамин и др., 2003) для оценки параметров центрального галактического бара и радиальной шкалы диска. Наблюдения выполнены с борта космического телескопа SPITZER (Вернер и др., 2004) в четырех фотометрических полосах 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 мкм. По мнению этих авторов, большинство отобранных звезд являются гигантами спектрального класса М и К. В работе Бови и др. (2016) были использованы гиганты красного сгущения из инфракрасного спектроскопического обзора APOGEE (Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, Эйзенштейн и др., 2011).

Перес и др. (2020) использовали данные из широкопольного фотометрического обзора DES (Dark Energy Survey, Абботт и др., 2005; 2018) в полосах *griz*. Модель Галактики TRILEGAL была взята за образец. Основной целью этих авторов было определение параметров толстого диска и звездного гало, поэтому h_R , z_\odot и h_z , относящиеся к тонкому диску, были зафиксированы с принятыми в TRILEGAL значениями.

В табл. 2 приведены индивидуальные оценки параметров вертикального экспоненциального распределения z_\odot и h_z , найденные различными авторами по молодым объектам тонкого диска.

В работе Бобылева, Байковой (2016а) получены оценки z_\odot и h_z с использованием данных о зонах НИ, ОВ-ассоциациях, звездах Вольфа–Райе, классических цефеидах и мазерных источниках с измеренными тригонометрическими параллаксами. Было показано, что распределение мазеров сильно искажено влиянием Местного рукава.

В работе Бобылева, Байковой (2016б) был проведен анализ зон НИ, гигантских молекулярных облаков и метанольных мазеров, которые распределены по всей Галактике. Расстояния до этих объектов были определены кинематическим методом. Исключались объекты, принадлежащие Местному рукаву.

В работе Олаузена, Каспи (2014) было использовано всего 19 магнитаров. Распределены эти магнитары по всей Галактике. Найденное по магнитарам значение h_z близко к тем, что были найдены по самым молодым галактическим объектам — мазерам и ОВ-звездам.

Элиас и др. (2006) разработали метод трехмерной пространственной классификации для оценки структуры пояса Гулда и галактического диска. Этот метод был применен к выборке ОВ-звезд, расположенных в сфере радиусом 1 кпк вокруг Солнца. В результате получены оценки z_\odot и h_z ,

Таблица 2. Параметры экспоненциального распределения в вертикальном направлении z_{\odot} и h_z , найденные различными авторами

$z_{\odot} \pm \varepsilon_{z_{\odot}}$, пк	$h_z \pm \varepsilon_{h_z}$, кпк	N_{\star}	Объекты	Ссылки
-5.7 ± 0.5	26.5 ± 0.7	639	мазеры, $R < R_0$ кпк	[1]
-13.5 ± 2.6	30.7 ± 5.9	19	магнитары	[2]
-16 ± 5	34.0 ± 2.0	553	ОВ-зв. из каталога Hipparcos	[3]
-10 ± 4	51.3 ± 3.7	148	зв. Вольфа-Райе, $r < 4.5$ кпк	[4]
-22 ± 4	56.0 ± 3.0	259	РЗС, $r < 0.85$ кпк	[5]
-23 ± 2	70.2 ± 2.4	246	цефеиды, $\bar{t} \sim 75$ млн лет	[4]
-14.5 ± 3.0	73.5 ± 3.2	619	цефеиды, $\bar{t} \sim 94$ млн лет	[6]
-24 ± 2	83.8 ± 2.4	250	цефеиды, $\bar{t} \sim 138$ млн лет	[4]
-17 ± 4	75 ± 5	705	цефеиды, $\bar{t} \sim 83$ млн лет	настоящая работа
-39 ± 11	131 ± 10	393	цефеиды, $\bar{t} \sim 182$ млн лет	настоящая работа

Примечание. [1] — Бобылев, Байкова (2016б), [2] — Олаузен, Каспи (2014), [3] — Элиас и др. (2006), [4] — Бобылев, Байкова (2016а), [5] — Пискунов и др. (2006), [6] — Сковрон и др. (2019).

относящиеся как к структуре пояса Гулда (мы их не приводим), так и к тонкому диску Галактики.

В работе Пискунова и др. (2006) оценки z_{\odot} и h_z были получены по выборке РЗС из каталога ASCC-2.5. Были взяты объекты из околосолнечной окрестности радиусом 850 пк, где каталог полон.

Для оценки z_{\odot} и h_z по классическим цефеидам Сковрон и др. (2019) не разделяли выборку в зависимости от возраста звезд, но использовали следующие ограничения на широту b и расстояние R : $|b| \leq 4^\circ$ и $R < R_0$. Кроме того, ими был произведен учет искривления диска Галактики.

ДАННЫЕ

В настоящей работе используются данные о классических цефеидах из работ Сковрон и др. (2019) и Мроза и др. (2019). В каталоге Сковрон и др. (2019) для 2431 цефеиды содержатся оценки расстояния, возраста, периода пульсации и фотометрические данные. Наблюдались эти цефеиды в рамках четвертого этапа программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Удальский и др., 2015). Их видимые звездные величины лежат в диапазоне от $I = 11^m$ до $I = 18^m$. Поэтому здесь наблюдается дефицит ярких и хорошо изученных цефеид, известных по более ранним наблюдениям.

Расстояния до звезд, r , были вычислены Сковрон и др. (2019) на основе соотношения период—светимость, найденного Вангом и др. (2018) по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне, где межзвездное поглощение существенно меньше, чем в оптическом. Отметим, что гелиоцентрические расстояния в каталоге Сковрон и др. (2019) оценены для 2214 цефеид.

Оценки возраста цефеид в работе Сковрон и др. (2019) сделаны по методике, разработанной Андерсоном и др. (2016). Учитывались такие характеристики, как периоды осевого вращения звезды и индексы металличности.

Каталог Мроза и др. (2019) интересен тем, что для 832 классических цефеид из списка Сковрон и др. (2019) даны кинематические характеристики. К ним относятся компоненты собственного движения, скопированные из каталога Gaia DR2 (Линдегрэн и др., 2018), а также лучевые скорости, имеющиеся для всех 832 звезд. С использованием этих данных Мроз и др. (2019) построили кривую галактического вращения в интервале расстояний R : 4–20 кпк. В работе Аблимита и др. (2020) данные об этих цефеидах были включены в общую выборку из 3500 классических цефеид, с использованием которой были уточнены параметры гравитационного потенциала Галактики и получена новая вириальная оценка массы Галактики. С использованием данных Мроза и др. (2019) и Сковрон и др. (2019) Бобылевым и др. (2021) было показано, что даже старые цефеиды сохраняют кинематическую память о месте своего рождения.

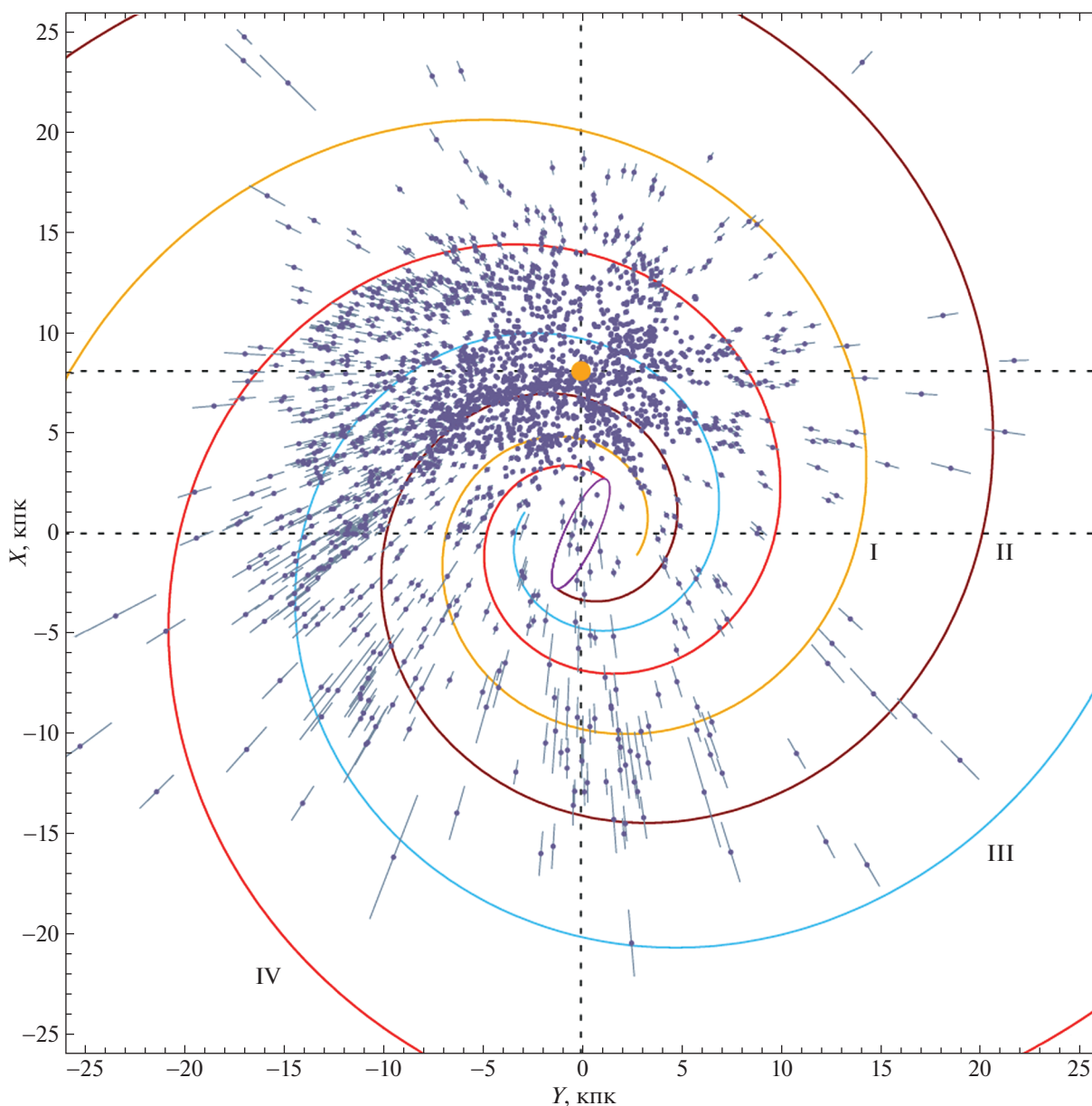


Рис. 1. Положения 2214 цефеид в проекции на галактическую плоскость XU , Солнце отмечено оранжевым кружком (детали см. текст).

Выборку цефеид из каталога Мроза и др. (2019) в настоящей работе мы называем кинематической. Для каждой звезды из этой выборки в работе Бобылева и др. (2021) были прослежены галактические орбиты, построенные в прошлом в соответствии с индивидуальным возрастом цефеиды. Для этого был использован осесимметричный трехкомпонентный (балдж, диск и гало) гравитационный потенциал Галактики. Кинематическая выборка содержит 806 цефеид. Из них 297 звезд с возрастом более 120 млн лет. Средний возраст выборки составляет 115 млн лет.

Вопросы полноты выборки имеют важное зна-

чение для получения несмещенных оценок анализируемого распределения.

На рис. 1 дано распределение галактической плоскости XU всех цефеид из каталога Сковрон и др. (2019), для которых имеются оценки расстояний. Всего таких звезд оказалось 2214. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки -13° (Бобылев, Байкова, 2014). Римскими цифрами на рисунке пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля—Стрельца, III — Персея и IV — Внешний рукав, схематично показан центральный галактический бар.

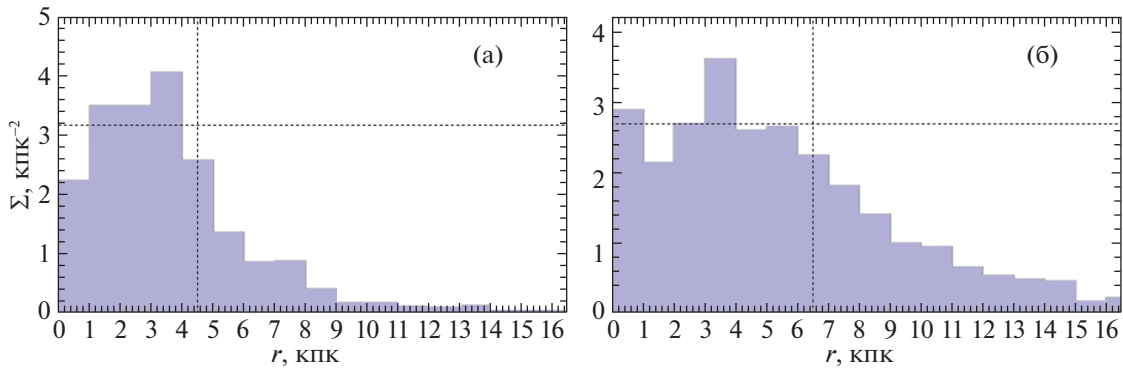


Рис. 2. Поверхностная плотность выборки самых молодых цефеид (а) и самых старых цефеид (б), указаны средние значения плотности и границы полноты.

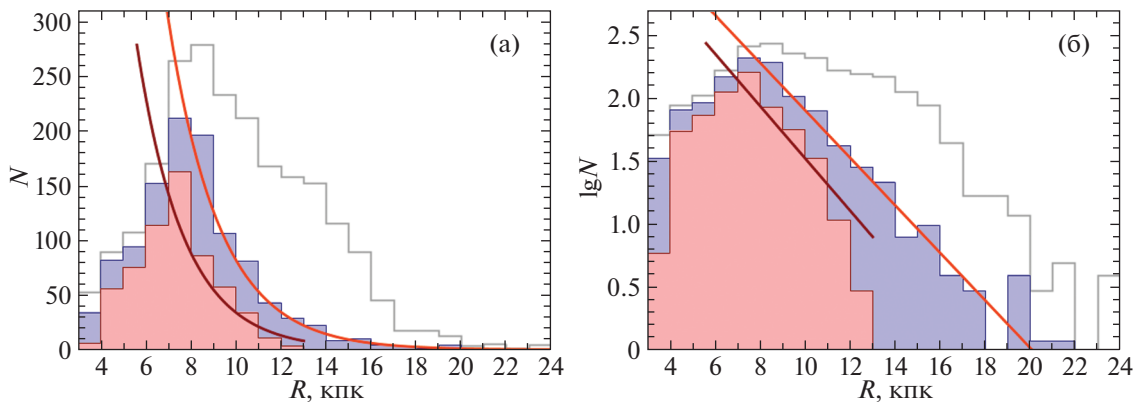


Рис. 3. Гистограммы радиального распределения цефеид в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах, серым контуром дана гистограмма, построенная по всем 2214 цефеидам, синей заливкой — по цефеидам моложе 120 млн лет, красной заливкой — по цефеидам моложе 120 млн лет, отобранных в области радиусом 5 кпк от Солнца (детали см. текст).

Как можно видеть из рисунка, часть цефеид имеют сильную концентрацию к отрезку спирального рукава Киля—Стрельца. Главным образом это цефеиды с возрастом от 80 до 130 млн лет. Таких звезд в нашей выборке 753.

На рис. 2 дано распределение поверхностной плотности двух выборок цефеид — самых молодых и самых старых. Наиболее равномерно распределены 983 цефеиды с возрастом более 130 млн лет (со средним значением возраста 211 млн лет). Их поверхностная плотность Σ в зависимости от расстояния r дана на рис. 2б. Граница полноты для выборки цефеид старше 130 млн лет составила 6.5 кпк. Аналогичный рисунок для цефеид среднего возраста (от 80 до 130 млн лет) мы не приводим, так как практически все они сконцентрированы к отрезку спирального рукава Киля—Стрельца, их плотность быстро падает в зависимости от r .

Самые молодые цефеиды имеют концентрацию к рукаву Щита, тем не менее их распределение на плоскости XU достаточно равномерное. Поведение их поверхностной плотности Σ в зависимости

от r дано на рис. 2а, где граница полноты составила 4.5 кпк.

В целом можем заключить, что в пределах 5–6 кпк выборки цефеид различного возраста обладают полнотой. Это позволяет на таком характерном интервале оценивать характеристики цефеид как в околосолнечной окрестности, например определять параметры вертикального распределения, так и в радиальном от центра Галактики направлении, т.е. изучать параметры радиального распределения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 дано распределение в радиальном направлении двух выборок цефеид. Первая выборка — это все 2214 цефеид различного возраста, для которых определены гелиоцентрические расстояния. Гистограмма этой выборки дана на рисунке серым контуром без заливки. Видно, что на интервале R : 8–22 кпк имеется непонятный на первый взгляд горб. Вписывание зависимостей вида (1)

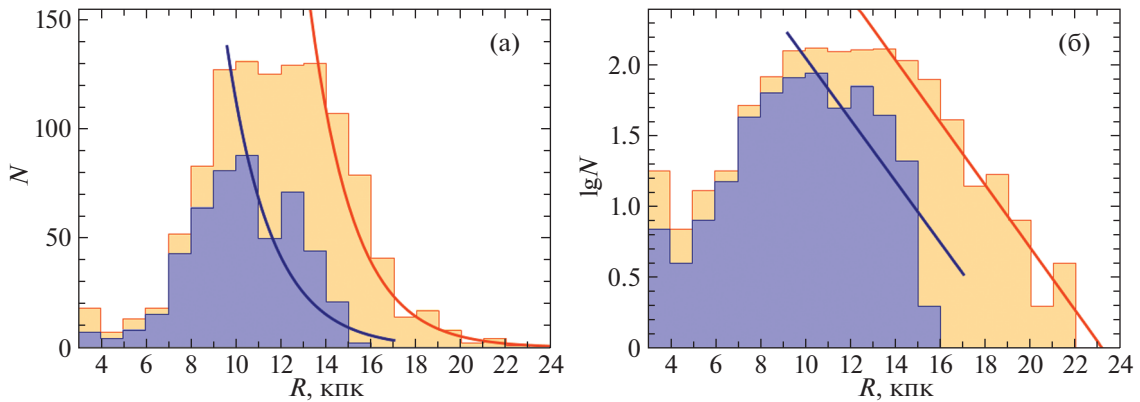


Рис. 4. Оранжевой заливкой показана гистограмма радиального распределения выборки цефеид старше 120 млн лет в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах, синей заливкой дана гистограмма радиального распределения выборки цефеид старше 120, отобранных в области радиусом 7 кпк от Солнца (детали см. текст).

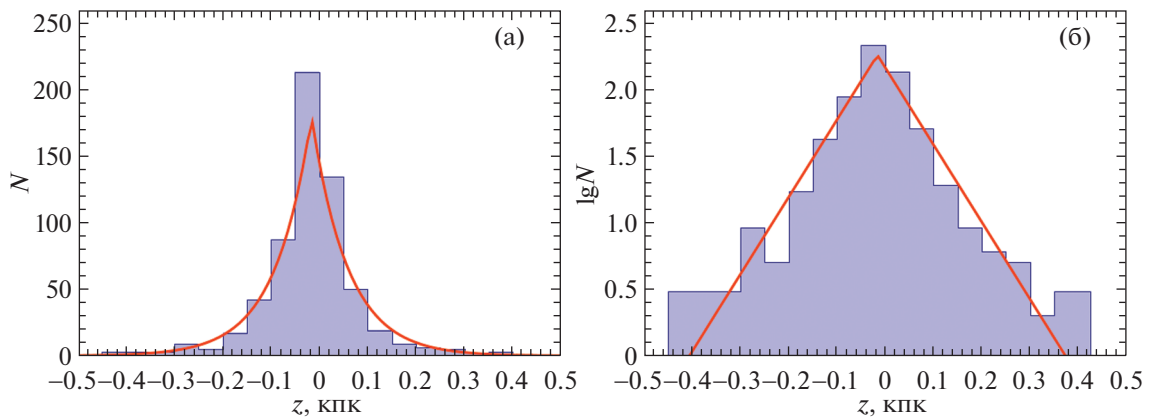


Рис. 5. Гистограмма вертикального распределения выборки из 705 цефеид моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах (детали см. текст).

дает значения h_R в очень широком интервале, от 3.3 (на интервале расстояний $R : 8-22$ кпк) до 5.5 кпк (на интервале расстояний $R : 8-15$ кпк, очень пологая зависимость на рис. 3б). Эти значения плохо согласуются как между собой, так и с известными для тонкого диска оценками.

Еще в работе Бобылева и др. (2021) было замечено (см. рис. 7 там), что молодые и старые цефеиды из каталога Мроза и др. (2019) имеют сильно различающееся наблюдаемое радиальное распределение. А именно, самые молодые сосредоточены внутри солнечного круга, а самые старые — далеко вне солнечного круга. Поэтому мы решили разделить цефеиды примерно поровну на две выборки в зависимости от возраста.

Вторая выборка на рис. 3 — это 1087 цефеид моложе 120 млн лет. Их средний возраст составляет $\bar{t} \sim 82$ млн лет. Гистограмма этой выборки на рис. 3 дана с заливкой синего цвета. Для этой выборки цефеид вписана экспонента вида (1) со значением радиальной шкалы $h_R = 2.30 \pm 0.09$ кпк,

которое было найдено методом наименьших квадратов.

Наконец, третья гистограмма на рис. 3 построена по цефеидам моложе 120 млн лет, которые отобраны из околосолнечной области радиусом 5 кпк. Эта выборка звезд удовлетворяет свойству полноты, содержит 605 цефеид со средним возрастом 83 млн лет. Вписанная для этой гистограммы экспонента вида (1) имеет значение радиальной шкалы $h_R = 2.09 \pm 0.20$ кпк.

На рис. 4 дано радиальное распределение выборки цефеид старше 120 млн лет. Выборка состоит из 1127 цефеид со средним возрастом $\bar{t} \sim 200$ млн лет. Для этой выборки цефеид вписана экспонента вида (1) со значением радиальной шкалы $h_R = 1.96 \pm 0.12$ кпк.

Вторая гистограмма на рис. 4, показанная синей заливкой, построена по цефеидам старше 120 млн лет, которые отобраны из околосолнечной области радиусом 7 кпк. Эта выборка звезд

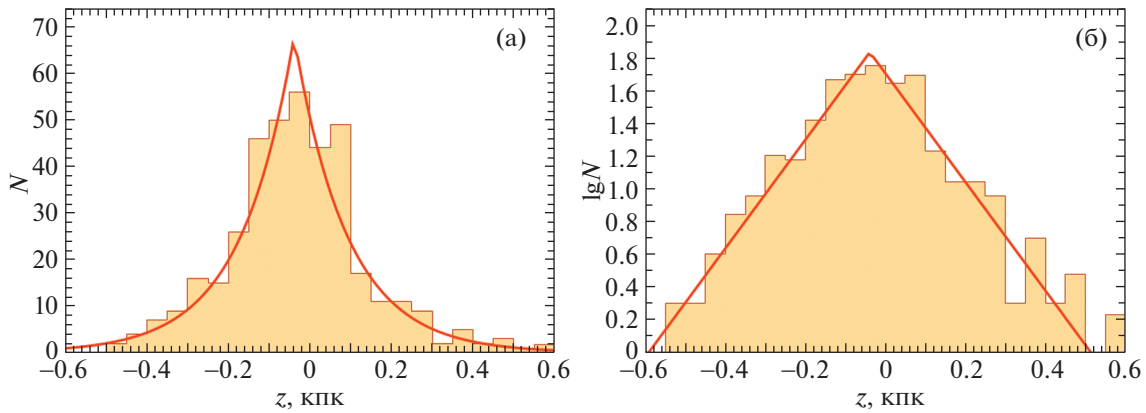


Рис. 6. Гистограмма вертикального распределения выборки из 393 цефеид старше 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах (детали см. текст).

удовлетворяет свойству полноты, содержит 496 цефеид со средним возрастом 186 млн лет. Вписанная для этой гистограммы экспонента вида (1) имеет значение радиальной шкалы $h_R = 1.99 \pm 0.29$ кпк. Старые цефеиды сильно смещены в сторону галактического антицентра, потому гистограмма второй выборки обладает существенно бóльшей дисперсией, h_R определяется со значительно бóльшей ошибкой. Однако сами значения h_R , полученные по двум выборкам относительно старых цефеид, получились близкими. И как можно видеть из рис. 4б, линии на графике идут практически параллельно друг другу.

Из рис. 3 и 4 можно видеть, что по отдельности распределения выборок относительно молодых и относительно старых цефеид неплохо удовлетворяют модели экспоненциального падения радиальной плотности. Но распределение всей выборки (серый контур на рис. 3) лучше не использовать для определения радиальной шкалы, так как оно складывается из двух сильно отличающихся распределений.

На рис. 5 дано распределение в вертикальном направлении выборки из 705 цефеид моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк и средним возрастом $\bar{t} \sim 83$ млн лет. Вписана экспонента вида (2) со значениями $z_\odot = -17 \pm 4$ пк и $h_z = 75 \pm 5$ пк. В работе Бобылева, Байковой (2016а) из анализа нескольких индивидуальных результатов определения z_\odot было вычислено среднее $z_\odot = -16 \pm 2$ пк. Таким образом, имеем хорошее согласие найденного по молодым цефеидам значения z_\odot с оценками других авторов (см. табл. 2).

На рис. 6 дано распределение в вертикальном направлении выборки из 393 цефеид старше 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк со средним возрастом $\bar{t} \sim 182$ млн лет.

Вписана экспонента вида (2) со значениями $z_\odot = -39 \pm 11$ пк и $h_z = 131 \pm 10$ пк. Видим, что цефеиды этой выборки больше “прогреты” по сравнению с молодыми цефеидами. В то же время найденное по ним значение вертикальной шкалы позволяет отнести эти цефеиды к тонкому диску Галактики, так как для толстого диска характерным является существенно большее значение $h_z \sim 900$ кпк (например, Перес и др., 2020).

Известно, что имеется тесная связь пространственного распределения цефеид и их кинематики с крупномасштабным искривлением галактического диска (Бердников, 1987; Бобылев, 2013). По-видимому, удвоение значения h_z цефеид за примерно 100 млн лет связано с влиянием искривления диска. Искривление диска, скорее всего, вызвано Большим Магеллановым Облаком. Поэтому можно говорить о том, что прогрев цефеид обусловлен внешним фактором.

На рис. 7 даны положения кинематической выборки из 806 цефеид в проекции на галактическую плоскость XU . Солнце здесь имеет координаты $(X, Y) = (8.3, 0)$ кпк. Стрелка в нижнем левом углу на рис. 7а показывает направление вращения Галактики. Из рис. 3, 4 и 7 можем сделать вывод о том, что значительное количество относительно старых цефеид из списка Сковрон и др. (2019) по каким-то причинам оказалось сосредоточено в области антицентра. Но в момент своего рождения эти звезды, да и вообще все исследуемые здесь цефеиды, были довольно равномерно распределены по большой области Галактики.

На рис. 8 дана гистограмма радиального распределения кинематической выборки цефеид. Положения каждой из этих звезд в Галактике (рис. 7) вычислены на момент их рождения. В отличие от общей гистограммы, построенной по цефеидам различных возрастов (серый контур на рис. 3), на этом рисунке нет горба в области $R \sim 14$ кпк,

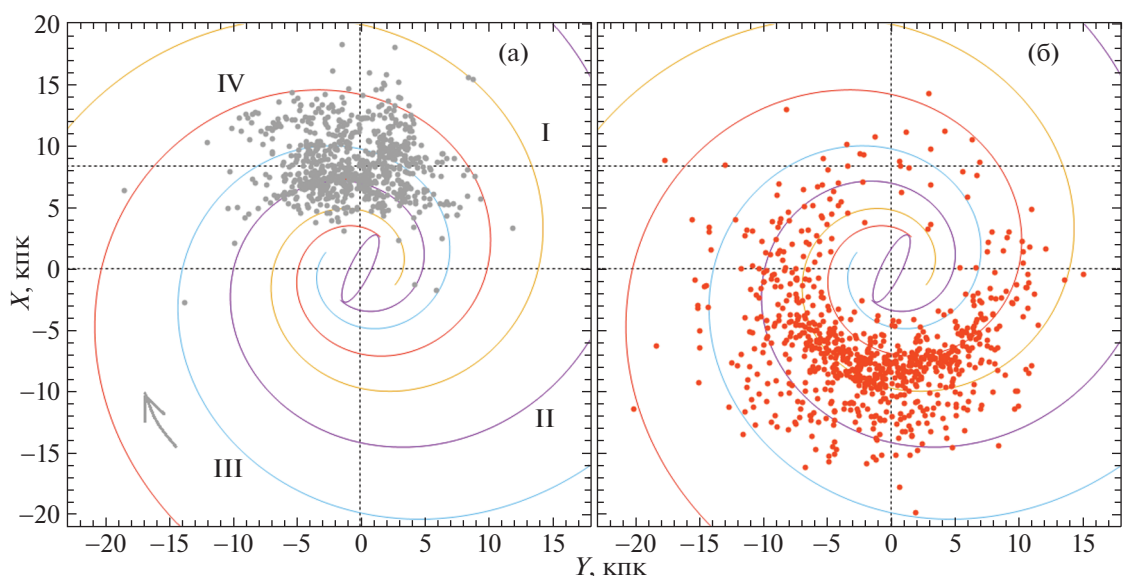


Рис. 7. Современные положения кинематической выборки из 806 цефеид на галактической плоскости XY (а) и их положения в прошлом, вычисленные на момент их рождения (б) (детали см. текст).

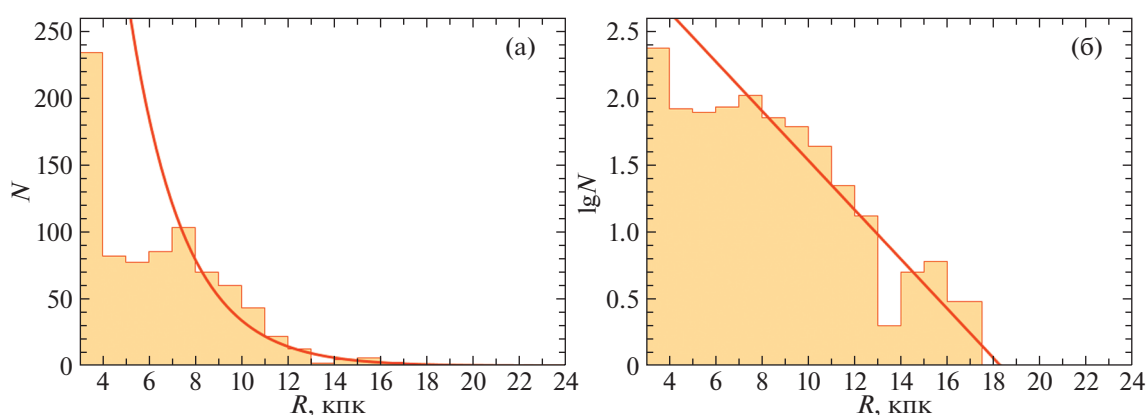


Рис. 8. Гистограмма радиального распределения кинематической выборки из 806 цефеид, положения которых вычислены на момент их рождения, в обычном (а) и логарифмическом (б) масштабах (детали см. текст).

наличие которого не позволяло ранее однозначно оценить h_R . Найденное по этой выборке значение радиальной шкалы $h_R = 2.36 \pm 0.24$ кпк находится в очень хорошем согласии с результатами отдельного анализа современных положений цефеид (см. табл. 1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для оценки значений радиальной h_R и вертикальной h_z шкал тонкого диска Галактики использована огромная выборка классических цефеид из работы Сковрон и др. (2019). Еще недавно астрономы располагали измеренными характеристиками около 600 классических цефеид. Каталог Сковрон и др. (2019) содержит оценки расстояния, возраста, периода пульсации и фотометрические данные для

2431 цефеиды. В настоящей работе были использованы 2214 цефеид из этого каталога, у которых определены расстояния.

Оценки h_R и h_z получены в предположении об экспоненциальном распределении плотности звезд как в радиальном, так и в вертикальном направлении.

По выборке из 1087 цефеид моложе 120 млн лет было найдено значение радиальной шкалы $h_R = 2.30 \pm 0.09$ кпк. По 1127 цефеидам старше 120 млн лет найдено значение $h_R = 1.96 \pm 0.12$ кпк. Проведен анализ цефеид на предмет полноты выборки. Показано, что распределение более молодых цефеид удовлетворяет свойству полноты в околосолнечной области радиусом около 5 кпк. По такой выборке, содержащей 605 цефеид со средним возрастом 83 млн лет, найдено значение

радиальной шкалы $h_R = 2.09 \pm 0.20$ кпк. Граница полноты для выборки более возрастных цефеид составила 6.5 кпк. Для выборки таких цефеид (496 со средним возрастом 186 млн лет) найдено значение радиальной шкалы $h_R = 1.99 \pm 0.29$ кпк.

Можем заключить, что имеется хорошее согласие с результатами, которые получены по выборкам цефеид без применения ограничений на радиус выборки. Поэтому предпочитаем пользоваться оценками h_R , полученными с меньшими ошибками.

Показано, что по общей выборке этих цефеид однозначную оценку получить невозможно. С другой стороны, было интересно проанализировать радиальное распределение всех этих цефеид в момент их рождения. Для выполнения этой задачи мы использовали выборку из 806 цефеид, для которых имеется возможность построения их галактических орбит. Оказалось, что из анализа их радиального распределения в прошлом, построенном на момент рождения каждой звезды, уверенно определяется значение $h_R = 2.36 \pm 0.24$ кпк. Видим, что в пределах ошибок все три найденные оценки h_R совпадают. Таким образом, на интервале ~ 100 млн лет не наблюдается эволюция данного параметра. Этого нельзя сказать о h_z , значение которого примерно удваивается на таком временном интервале (налицо эффект прогрева диска).

Для оценки вертикальной шкалы из-за влияния различных факторов требуется использование ограничений на возраст, размер и местоположение анализируемой области. Поэтому здесь при анализе участвовали не все цефеиды. Кроме того, значение вертикальной шкалы сильно зависит от возраста звезд выборки. Поэтому выборка была разделена на две части по возрасту с границей 120 млн лет. По 705 цефеидам моложе 120 млн лет с гелиоцентрическими расстояниями $r < 6$ кпк найдены $z_{\odot} = -17 \pm 4$ пк и $h_z = 75 \pm 5$ пк, а по выборке из 393 цефеид старше 120 млн и $r < 6$ кпк найдены $z_{\odot} = -39 \pm 11$ пк и $h_z = 131 \pm 10$ пк.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон и др. (R.I. Anderson, H. Saio, S. Ekström, C. Georgy, and G. Meynet), *Astron. Astrophys.* **591**, A8 (2016).
- Аблимит и др. (I. Ablimit, G. Zhao, C. Flynn, and S.A. Bird), *Astrophys. J.* **895**, L12 (2020).
- Абботт и др. (DES Collaboration, T. Abbott, G. Aldering, J. Annis, M. Barlow, C. Bebek, B. Bigelow, C. Beldica, R. Bernstein, et al.), arXiv: astro-ph/0510346 (2005).
- Абботт и др. (DES Collaboration, T. Abbott, F.B. Abdalla, S. Allam, A. Amara, J. Annis, J. Asorey, S. Avila, O. Ballester, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **239**, 18 (2018).
- 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).
- Бенджамин и др. (R.A. Benjamin, E. Churchwell, B.L. Babler, R. Indebetouw, M.R. Meade, B.A. Whitney, C. Watson, M.G. Wolfire, et al.), *Astrophys. J.* **630**, L149 (2005).
- Бердников Л.Н., Письма в Астрон. журн. **13**, 110 (1987) [L.N. Berdnikov, *Astron. Lett.* **13**, 45 (1987)].
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **39**, 909 (2013) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **39**, 819 (2013)].
- Бобылев, Байкова (V.V. Bobylev and A.T. Bajkova), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016a) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016a)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 210 (2016b) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **42**, 182 (2016b)].
- Бобылев и др. (V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, A.S. Rastorguev, and M.V. Zabolotskikh), *MNRAS* **502**, 4377 (2021).
- Бови и др. (J. Bovy, H.-W. Rix, C. Liu, D.W. Hogg, T.C. Beers, and Y.S. Lee, et al.), *Astrophys. J.* **753**, 148 (2012).
- Бови и др. (J. Bovy, H.-W. Rix, E.F. Schlafly, D.L. Nidever, J.A. Holtzman, M. Shetrone, and T.C. Beers, et al.), *Astrophys. J.* **823**, 30 (2016).
- Ванг и др. (S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, et al.), *Astrophys. J.* **852**, 78 (2018).
- Вернер и др. (M.W. Werner, T.L. Roellig, F.J. Low, G.H. Rieke, M. Rieke, W.F. Hoffmann, E. Young, J.R. Houck, et al.), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **154**, 1 (2004).
- Гроеневеген и др. (M.A.T. Groenewegen, L. Girardi, E. Hatziminaoglou, C. Benoist, L.F. Olsen, L. da Costa, S. Arnouts, R. Majaess, et al.), *Astron. Astrophys.* **392**, 741 (2002).
- Женг и др. (Z. Zheng, C. Flynn, A. Gould, J.N. Bahcall, and S. Salim), *Astrophys. J.* **555**, 393 (2001).
- Жирарди и др. (L. Girardi, M.A.T. Groenewegen, E. Hatziminaoglou, and L. da Costa), *Astron. Astrophys.* **436**, 895, (2005).
- де Жонг и др. (J.T.A. de Jong, B. Yanny, H.-W. Rix, A.E. Dolphin, N.F. Martin I, and T.C. Beers), *Astrophys. J.* **714**, 663 (2010).
- Йоши (Y.C. Joshi), *MNRAS* **378**, 768 (2007).
- Конти, Вакка (P.S. Conti and W.D. Vacca), *Astron. J.* **100**, 431 (1990).
- Круит (P.C. van der Kruit), *Astron. Astrophys.* **157**, 230 (1986).
- Линдегрэн и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, J. Hernandez, A. Bombrun, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 2 (2018).

25. Маис-Апельянис (J. Maiz-Apellániz), *Astron. J.* **121**, 2737 (2001).
26. Мроз и др. (P. Mróz, A. Udalski, D.M. Skowron, et al.), *Astrophys. J.* **870**, L10 (2019).
27. Ойха (D.K. Ojha), *MNRAS* **322**, 426 (2001).
28. Олаузен, Каспи (S.A. Olausen and V.M. Kaspi), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **212**, 6 (2014).
29. Перес и др. (A. Pieres, L. Girardi, E. Balbinot, B. Santiago, L.N. da Costa, A. Carnero Rosell, A.B. Pace, K. Bechtol, et al.), *MNRAS* **497**, 154 (2020).
30. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, N.V. Kharchenko, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **445**, 545 (2006).
31. Рейл, Робин (C. Reylé and A.C. Robin), *Astron. Astrophys.* **373**, 886 (2001).
32. Рикс, Бови (H.-W. Rix and J. Bovy), *Astron. and Astrophys.* **21**, 61 (2013).
33. Робин, Крезе (A.C. Robin and M. Crézé), *Astron. Astrophys.* **157**, 71 (1986).
34. Робин и др. (A.C. Robin, C. Reylé, S. Derrière, and S. Picaud), *Astron. Astrophys.* **409**, 523 (2003).
35. Рослоу, Кравтер (C.K. Rosslowe and P.A. Crowther), *MNRAS* **447**, 2322 (2015).
36. Скворон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
37. Скрутски и др. (M.F. Skrutskie, R.M. Cutri, R. Stiening, M.D. Weinberg, S. Schneider, J.M. Carpenter, C. Beichman, R. Capps, et al.), *Astron. J.* **131**, 1163 (2006).
38. Удальский и др. (A. Udalski, M.K. Szymański, and G. Szymański), *Acta Astron.* **65**, 1 (2015).
39. Эйзенштейн и др. (D.J. Eisenstein, D.H. Weinberg, E. Agol, H. Aihara, C.A. Prieto, S.F. Anderson, J.A. Arns, E. Aubourg, et al.), *Astron. J.* **142**, 72 (2011).
40. Элиас и др. (F. Elias, J. Cabrero-Caño, and E.J. Alfaro), *Astron. J.* **131**, 2700 (2006).
41. Эпштейн и др. (N. Epchtein, B. de Batz, L. Caproni, L. Chevallier, E. Copet, P. Fouqué, P. Lacombe, T. Le Bertre, et al.), *Messenger* **87**, 27 (1997).