

ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СПИРАЛЬНОГО УЗОРА ГАЛАКТИКИ ПО КЛАССИЧЕСКИМ ЦЕФЕИДАМ

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

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

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 14.09.2022 г.; принята к публикации 14.09.2022 г.

Изучена выборка классических цефеид Галактики с оценками расстояний до них, взятыми из работы Сковрон и др. (2019), где они определены на основе соотношения период–светимость. В настоящей работе расстояния Сковрон и др. были увеличены на 10% согласно полученным нами ранее результатам кинематического анализа этих цефеид. Уточнены геометрические характеристики двух спиральных рукавов: Киля–Стрельца и Внешнего. Расстояние от Солнца до галактического центра принималось равным 8.1 ± 0.1 кпк. По 257 цефеидам, принадлежащим отрезку рукава Киля–Стрельца, с возрастными в интервале 80–120 млн лет найдено значение угла закрутки спирального узора $i = -12.7 \pm 0.4^\circ$ и положение этого рукава $a_0 = 7.28 \pm 0.05$ кпк. По 352 цефеидам из Внешнего рукава с возрастными в интервале 120–300 млн лет найдены $i = -12.0 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 13.03 \pm 0.06$ кпк. По выборке из 1618 цефеид с возрастными в интервале 80–300 млн лет построена вэйвлет-карта в плоскости “позиционный угол–логарифм расстояния”. Из анализа этой карты для рукава Киля–Стрельца получены следующие оценки: $i = -12.9 \pm 0.4^\circ$ и $a_0 = 7.43 \pm 0.05$ кпк, а для Внешнего рукава $i = -12.5 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 13.33 \pm 0.06$ кпк. Мы нашли, что Солнце находится очень близко к радиусу коротации, который расположен между Солнцем и рукавом Персея. А также получили оценку угловой скорости вращения спирального узора $\Omega_p = 27 \pm 1$ км/с/кпк.

Ключевые слова: классические цефеиды, спиральный узор, структура Галактики.

DOI: 10.31857/S0320010822090029

ВВЕДЕНИЕ

Изучению спиральной структуры Галактики с использованием различных объектов и методов посвящено огромное количество публикаций (см., например, Линь, Шу, 1964; Линь и др., 1969; Крезе, Меннесье, 1973; Мишуоров и др., 1979, 1997; Мишуоров, Зенина, 1999; Лепинэ и др., 2001; Моитиньо и др., 2006; Васкес и др., 2008; Герхард, 2011; Ефремов, 2011; Хоу, Хан, 2014, 2015; Поджио и др., 2021). В качестве индикаторов спиральной структуры используются различные звезды, например, цефеиды (Мишуоров и др., 1979; Мишуоров, Зенина, 1999; Дамбис и др., 2015; Сковрон и др., 2019; Лемасл и др., 2022) или ОВ-звезды (Сюй и др., 2018; 2021), рассеянные звездные скопления (Попова, Локтин, 2005; Диас, Лепинэ, 2005; Хао и др., 2021) и ОВ-ассоциации (Мельник и др., 2001), облака нейтрального (Ливайн и др., 2006) и ионизованного водорода (Паладини и др., 2004), облака межзвездной пыли (Тэйлор, Кордес, 1993), области звездообразования (Жоржелин, Жоржелин, 1976;

Руссейль, 2003), источники мазерного излучения (Бобылев, Байкова, 2014; Рид и др., 2019) и др. Применяются методы, основанные как на анализе пространственного распределения звезд с использованием измеренных расстояний до них, так и на изучении сгущений объектов, распределенных вдоль галактического экватора.

До сих пор не существует общепринятой модели глобальной (grand design) спиральной структуры Галактики. Обсуждаются модели с различным количеством спиральных рукавов, с постоянным или переменным углом закрутки, симметричным или асимметричным характером спирали. Современные данные о распределении облаков нейтрального и ионизованного водорода, а также мазерных источников с измеренными методом РСДБ тригонометрическими параллаксами говорят скорее о четырехрукавной модели с постоянным значением угла закрутки, заключенным в интервале $10\text{--}14^\circ$. Большая доказательная база в пользу именно четырехрукавного глобального узора собрана в обзорах Валле (1995, 2002, 2008, 2017).

Некоторые авторы предпочитают анализировать не глобальную структуру, а близкие к Солнцу

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

отдельные сегменты спиральных рукавов с индивидуальными углами наклона (Никифоров, Веселова, 2018; Веселова, Никифоров, 2020). Оценки углов закрутки, найденные по индивидуальным отрезкам спиральных рукавов, заключены в интервале 9–18° (Грив и др., 2017; Рид и др., 2019; Хао и др., 2021). Обсуждение современной наблюдаемой картины, связанной со спиральной структурой Галактики, можно найти, например, в обзорах Хоу, Хана (2014), Валле (2017), Сюя и др. (2018) или Хоу (2021).

Известно, что классические цефеиды трассируют спиральный узор. Хотя такие звезды не являются представителями самой молодой популяции, тем не менее, они представляют большую ценность для изучения спиральной структуры Галактики. Это возможно благодаря высокой точности оценивания расстояния до них с использованием зависимости период–светимость (с ошибками 5–10%) и их распределению в очень широкой области Галактики.

В работе Бобылева (2022) параметры галактического спирального узора были найдены по большой выборке классических цефеид. Расстояния до этих цефеид были вычислены на основе соотношения период–светимость в работе Скворон и др. (2019) с использованием фотометрии в среднем инфракрасном диапазоне. Однако в работе Бобылева, Байковой (2022а) на основе кинематического анализа цефеид, а также непосредственного сравнения различных шкал расстояний, была показана необходимость удлинения шкалы расстояний Скворон и др. (2019) примерно на 10%.

В настоящей работе мы фактически повторяем анализ Бобылева (2022) с учетом того, что используем расстояния до цефеид из работы Скворон и др. (2019), увеличенные на 10%. Таким образом, целью настоящей работы является переопределение параметров спирального узора Галактики по выборке классических цефеид с удлиненными на 10% расстояниями.

МЕТОДЫ

Положение звезды в логарифмической спиральной волне можно описать уравнением

$$R = R_0 e^{(\theta - \theta_0) \operatorname{tg} i}, \quad (1)$$

где R — расстояние от центра Галактики до звезды; R_0 — расстояние от центра Галактики до Солнца; θ — позиционный угол звезды: $\operatorname{tg} \theta = y / (R_0 - x)$, 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; θ_0 — некоторый произвольно выбранный начальный угол; i — угол закрутки спирального узора ($i < 0$ для закручивающейся спирали). В настоящей работе значение R_0 принимаем равным 8.1 ± 0.1 кпк согласно обзору Бобылева, Байковой (2021), где оно было выведено как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок.

Так как θ_0 — константа, а приближенное значение $\operatorname{tg} i$ нам известно из предыдущих исследований, то в первом приближении можно принять $\theta_0 \operatorname{tg} i = \operatorname{const}$. Теперь уравнение (1) можно переписать следующим образом:

$$\ln(R/R_0) = \theta \operatorname{tg} i + \operatorname{const}, \quad (2)$$

или в более удобном виде

$$\ln(R/R_0) = a\theta + b. \quad (3)$$

Как можно видеть, соотношение (3) является уравнением прямой линии на плоскости “позиционный угол–логарифм расстояния”. Решая методом наименьших квадратов (МНК) систему условных уравнений отдельно для каждого отрезка спирального рукава, можем найти две величины: a и b . Очевидно, что $a = \operatorname{tg} i$. Теперь предположим, что $\theta = 0$, тогда находим величину $a_0 = R_0 e^b$ — место пересечения центром рассматриваемого спирального рукава оси X , направленной из центра Галактики и проходящей через Солнце. Таким образом, параметр a_0 задает радиальное положение центра спирального рукава на оси X . Отметим, наконец, что в этом методе оценка угла закрутки i не зависит от количества спиральных рукавов m .

В первом методе мы в точности повторяем подход, реализованный в работе Бобылева (2022), где показано, что по цефеидам из работы Скворон и др. (2019) уверенно определяются геометрические характеристики двух спиральных рукавов — Киля–Стрельца и Внешнего. Показано также, что к отрезку рукава Киля–Стрельца принадлежат главным образом относительно молодые цефеиды с возрастными в интервале 80–120 млн лет, а к отрезку Внешнего рукава принадлежат более старые цефеиды с возрастными в интервале 120–300 млн лет. При этом подходе отбор необходимых для анализа цефеид, принадлежащих отрезкам спиральных рукавов Киля–Стрельца и Внешнего, осуществляется с использованием зон предварительного отбора.

В другом методе мы не используем заранее заданные зоны предварительного отбора, а применяем вэйвлет-преобразование к общему распределению цефеид. Для того чтобы выделить статистически значимые сигналы основных неоднородностей в рассматриваемом распределении ($\theta, \ln(R/R_0)$), используем вэйвлет-преобразование, которое известно как мощный инструмент для фильтрации

пространственно локализованных сигналов (Чу, 1997; Витязев, 2001).

Вэйвлет-преобразование двумерного распределения $f(X, Y)$ заключается в его разложении по анализирующим вэйвлет-функциям $\psi(X/c, Y/c)$, где c — коэффициент, позволяющий выделить из всего семейства функций, характеризующихся одной и той же формой ψ , функцию определенного масштаба. Вэйвлет-преобразование $\omega(\xi, \eta)$ определяется как корреляционная функция таким образом, что в любой данной точке (ξ, η) на (X, Y) -плоскости мы имеем одно вещественное значение следующего интеграла:

$$\omega(\xi, \eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(X, Y) \times \quad (4)$$

$$\times \psi\left(\frac{X - \xi}{c}, \frac{Y - \eta}{c}\right) dX dY,$$

которое получило название вэйвлет-коэффициента в точке (ξ, η) . Очевидно, в случае конечных дискретных карт, которыми мы оперируем, их число конечно и равно числу бинов на карте.

В качестве анализирующей функции мы используем традиционную вэйвлет-функцию, получившую название мексиканской шляпы — Mexican HAT (МНАТ). Двумерная функция МНАТ описывается выражением

$$\psi(d/c) = \left(2 - \frac{d^2}{c^2}\right) \exp^{-d^2/2c^2}, \quad (5)$$

где $d^2 = X^2 + Y^2$.

Вэйвлет (5) получается в результате двукратно-го дифференцирования функции Гаусса. Основным свойством функции ψ является то, что ее интеграл по X и Y равен нулю, что позволяет детектировать любые неравномерности в исследуемом распределении. Если анализируемое распределение является равномерным, то все коэффициенты вэйвлет-преобразования будут равны нулю. Поскольку спиральная волна плотности может рассматриваться как распределение неоднородностей в плоскости Галактики, то применение вэйвлет-анализа для определения ее характеристик представляется оправданным и очень интересным.

ДАННЫЕ

Основным источником данных о классических цефеидах в настоящей работе является каталог Сковрон и др. (2019). Наблюдались эти цефеиды в рамках четвертого этапа программы OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment, Удальский и др., 2015). В этом каталоге содержатся

оценки расстояния, возраста, периода пульсации и фотометрические характеристики цефеид.

Гелиоцентрические расстояния до 2214 цефеид были вычислены Сковрон и др. (2019) на основе соотношения период—светимость. Причем конкретное соотношение было взято ими из работы Ванга и др. (2018), где оно было уточнено по кривым блеска цефеид в среднем инфракрасном диапазоне. Оценки возраста Сковрон и др. (2019) получили по методике Андерсона и др. (2016) с учетом периода осевого вращения звезд и индекса металличности.

Для решения поставленной в настоящей работе задачи необходима выборка звезд, расстояния до которых определены с использованием одной калибровки по однородным данным. Поэтому мы не добавляем к цефеидам из списка Сковрон и др. (2019) данные о других известных цефеидах, расстояния до которых определены другими авторами.

В настоящей работе мы используем расстояния до цефеид из работы Сковрон и др. (2019), увеличенные на 10%. Вывод о необходимости такого удлинения шкалы расстояний Сковрон и др. был сделан в Бобылевым, Байковой (2022а) при кинематическом анализе выборки из 363 цефеид моложе 120 млн лет.

Отметим некоторые свойства нашей выборки. Всего в списке Сковрон и др. (2019) содержатся данные о 2214 цефеидах. Однако для 217 из них оценки расстояния не даны. Для каждой цефеиды имеется указание на пульсацию либо в основной моде, либо в первом обортоне. Причем в основной моде пульсируют примерно 70% цефеид из всего списка, соответственно 30% цефеид пульсируют в первом обортоне. Оценки возраста даны для всех цефеид.

Интересно отметить недавнюю работу Лемасл и др. (2022). Для изучения искривления диска и спиральной структуры Галактики эти авторы составили наиболее полный на сегодняшний день каталог галактических цефеид. Цефеиды из списка Сковрон и др. (2019) были включены в выборку. Общий список с данными фотометрии содержит более 3000 цефеид. В их рабочий каталог вошли 2684 цефеиды, которые пульсируют либо в основной моде, либо в первом обортоне. Расстояния до этих цефеид были определены с использованием инфракрасных полос W1 и W2 из каталога WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer, Чен и др., 2018) на основе соотношения “период—Весенхейт”.

Эти авторы получили новые оценки параметров искривления диска Галактики. Они идентифицировали группировки цефеид на плоскости “позиционный угол—логарифм расстояния” с учетом небольших поправок их галактоцентрических расстояний

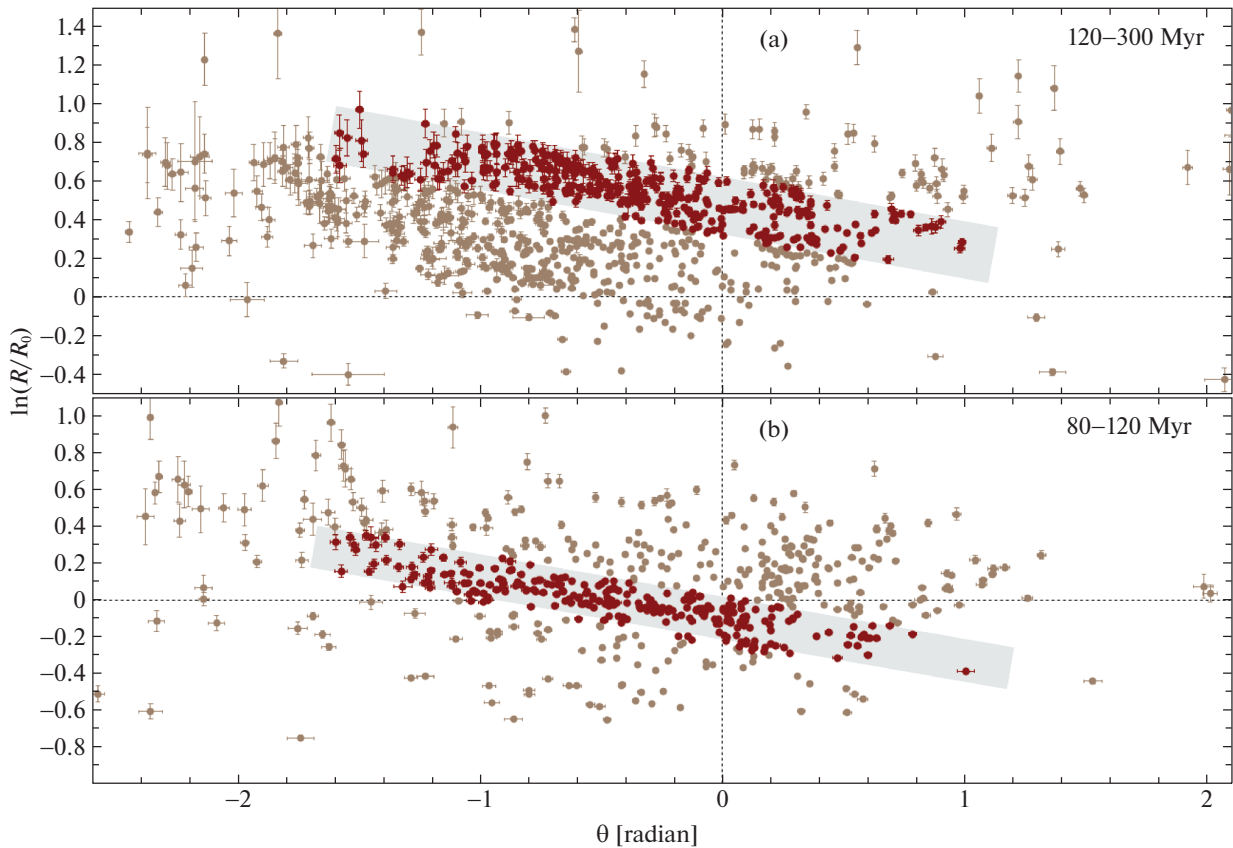


Рис. 1. Диаграмма “позиционный угол—логарифм расстояния” для цефеид с возрастaми в интервале 120–300 млн лет (а) и в интервале 80–120 млн лет (б), заливкой на каждом графике показана область предварительного отбора звезд.

от найденных эффектов искривления диска. Были выделены довольно многочисленные группировки цефеид, различающиеся возрастом, химическим составом и принадлежностью к различным сегментам спиральных рукавов.

Лемасл и др. (2022) еще раз показали, что цефеиды трассируют спиральные рукава. Как видно из рис. 5 работы этих авторов, в распределении всех цефеид выборки в проекции на плоскость XU отчетливо просматривается принадлежность цефеид к отрезкам рукавов Киля–Стрельца, Местного, Персея и Внешнего. Эти авторы отметили согласие такого распределения с данными высокоточного анализа более молодых индикаторов спиральной структуры – источников мазерного излучения с измеренными тригонометрическими параллаксами (Рид и др., 2019). Однако никаких численных оценок параметров спиральной структуры Лемасл и др. (2022) не делали.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Использование зон предварительного отбора

На рис. 1 даны диаграммы “позиционный угол—логарифм расстояния” для двух выборок цефеид. Показаны границы для предварительного отбора

цефеид с возрастaми в интервале 80–120 млн лет, где средний возраст составляет примерно 100 млн лет, и в интервале 120–300 млн лет со средним возрастом около 200 млн лет.

Отбор необходимых для анализа цефеид осуществляем с использованием тех же ограничений, что и в работе Бобылева (2022). Так, для звезд в отрезке рукава Киля–Стрельца были использованы следующие ограничения: $-1.7 < \theta < 1.1$ рад., а $\ln(R/R_0)$ ограничен двумя линиями сверху и снизу $\theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.02 < \ln(R/R_0) < \theta \operatorname{tg}(-13^\circ) - 0.25$. Таким образом, здесь полная ширина зоны отбора (от внутреннего до внешнего краев рукава вдоль оси X) составляет 2.51 кпк.

Для отбора цефеид, принадлежащих отрезку Внешнего рукава, угол θ был взят из интервала $-1.6 < \theta < 1.1$ рад., и использованы следующие ограничения для $\ln(R/R_0)$: $\theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.6208 < \ln(R/R_0) < \theta \operatorname{tg}(-13^\circ) + 0.3120$. Здесь полная ширина зоны отбора составляет 2.93 кпк. Значение угла закрутки $i = -13^\circ$ взято согласно работе Бобылева, Байковой (2014), где оно было оценено по выборке мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами методом РСДБ.

Из анализа распределения мазеров с измеренными РСДБ-методом тригонометрическими

Таблица 1. Параметры спирали, найденные при поиске МНК-решения системы условных уравнений вида (3)

Рукав	n_*	a	b	i , град	a_0 , кпк
II (Киля–Стрельца)	257	-0.222 ± 0.008	-0.105 ± 0.005	-12.51 ± 0.45	7.29 ± 0.05
IV (Внешний)	352	-0.218 ± 0.008	$+0.474 \pm 0.005$	-12.31 ± 0.48	13.01 ± 0.06
II (Киля–Стрельца)	257	-0.225 ± 0.008	-0.106 ± 0.005	-12.67 ± 0.44	7.28 ± 0.05
IV (Внешний)	352	-0.212 ± 0.008	$+0.483 \pm 0.006$	-11.96 ± 0.46	13.03 ± 0.06

Примечание. В верхней части таблицы — с единичными весами, а в нижней — с весами вида $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$, n_* — количество использованных цефеид.

Таблица 2. Параметры спирали, найденные при поиске МНК-решения системы условных уравнений вида (3) по вэйвлет-карте на рис. 2

Рукав	a	b	i , град.	a_0 , кпк
II (Киля–Стрельца)	-0.229 ± 0.008	-0.086 ± 0.005	-12.88 ± 0.44	7.43 ± 0.05
IV (Внешний)	-0.222 ± 0.008	$+0.498 \pm 0.005$	-12.54 ± 0.50	13.33 ± 0.06

параллаксами Ридом и др. (2019) получена оценка параметра ширины рукава Киля–Стрельца $1\sigma = 0.27 \pm 0.05$ кпк, а Внешнего рукава — $1\sigma = 0.65 \pm 0.16$ кпк, где этот параметр вычислен как дисперсия по отклонению от зависимости типа (3). Таким образом, согласно Риду и др. (2019), полная ширина (от внутреннего до внешнего края рукава вдоль оси X с охватом 98% принадлежащих рукаву звезд) рукава Киля–Стрельца составит $6\sigma = 1.62$ кпк, а Внешнего — $6\sigma = 3.90$ кпк. Видно, что в нашем случае ширина зоны отбора в случае рукава Киля–Стрельца взята с большим запасом, а в случае Внешнего рукава она меньше оценки, предложенной Ридом и др. (2019). Очевидно, что значение 6σ не должно превышать длину волны спирального узора λ (чтобы избежать перекрытия рукавов). Например, в области Солнца $\lambda \sim 3$ кпк, в логарифмической волне это значение возрастает с ростом галактоцентрического расстояния, поэтому в области Внешнего рукава $\lambda \sim 4$ кпк.

В табл. 1 даны параметры a и b , найденные в результате МНК-решения системы условных уравнений (3). Поиск решения проводился как с единичными весами, так и с весовыми коэффициентами $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$, где $i = 1, \dots, n_*$, а n_* — количество используемых в решении звезд.

Для сравнения в работе Бобылева (2022) по 269 цефеидам, принадлежащим отрезку рукава Киля–Стрельца с применением единичных весов, были получены следующие оценки: $i = -12.0 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 7.29 \pm 0.05$ кпк. Аналогично, по 343 цефеидам из Внешнего рукава $i = -11.7 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 12.81 \pm 0.06$ кпк. Вычисления, выполненные с весами вида $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$, позволили найти для

рукава Киля–Стрельца: $i = -11.9 \pm 0.2^\circ$ и $a_0 = 7.32 \pm 0.05$ кпк, а для Внешнего рукава $i = -11.5 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 12.89 \pm 0.06$ кпк. Видно, что удлинение шкалы расстояний цефеид на 10% изменили значения искоемых параметров i и a_0 примерно на величину 1σ .

Так же, как и в работе Рида и др. (2019), мы вычислили дисперсию по отклонению от зависимости (3). В итоге нашли для рукава Киля–Стрельца $1\sigma = 0.58$ кпк, а для Внешнего $1\sigma = 0.72$ кпк. Для Внешнего рукава наша оценка мало отличается от оценки Рида и др. (2019). А вот для рукава Киля–Стрельца наша оценка примерно в 2 раза превышает оценку Рида и др. (2019). Это отличие, скорее всего, связано с тем, что рукав Киля–Стрельца в нашем случае трассируют цефеиды с возрастными интервалами в интервале 80–120 млн лет, которые успели значительно удалиться от места своего рождения. Это приводит к более сильному их рассеянию от центра спирального рукава по сравнению с очень молодыми мазерами, которые использовались в работе Рида и др. (2019).

Вэйвлет-анализ распределения цефеид

Результат применения вэйвлет-анализа для определения угла закрутки двух отрезков спиральных рукавов по распределению цефеид на плоскости “позиционный угол–логарифм расстояния” показан на рис. 2. Для построения этого рисунка была использована общая выборка из 1618 цефеид с возрастными интервалами в интервале 80–300 млн лет. Размер дискретной карты 256×256 пикселей, а размер карты в единицах $\theta - \ln(R/R_0)$ составляет 8×4 . Параметр масштаба вэйвлет-преобразования $c = 0.1$.

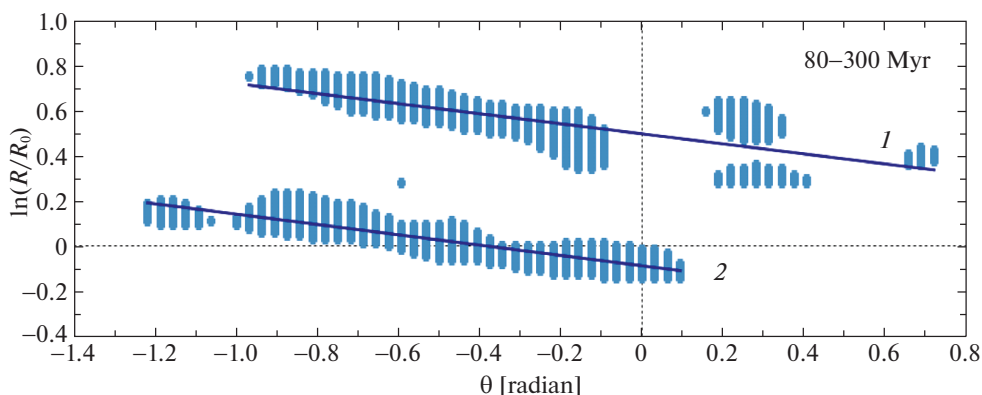


Рис. 2. Вэйвлет-карта на диаграмме “позиционный угол—логарифм расстояния”, построенная по объединенной выборке цефеид с возрастaми в интервале 80–300 млн лет, линия 1 проведена по Внешнему рукаву, а линия 2 по рукаву Киля–Стрельца.

Параметры указанных на рис. 2 прямых, найденных с использованием МНК, даны в табл. 2. При этом были использованы значения вэйвлет-карты, удовлетворяющие значениям по вертикали $Z > 0.3$ при условии, что карты нормированы к 1 (т.е. максимальное значение двумерной вэйвлет-карты по вертикали равно 1.0).

Построение спирального узора

На рис. 3 дано распределение всех цефеид из каталога Сковрон и др. (2019). На рисунке использована такая система координат, в которой ось X направлена к Солнцу из центра Галактики, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики. Показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -12.5^\circ$, римскими цифрами пронумерованы следующие отрезки спиральных рукавов: I — Щита, II — Киля–Стрельца (синяя линия), III — Персея и IV — Внешний рукав (красная линия). Выбран такой масштаб, что часть далеких цефеид осталась за пределами рисунка.

Для рукавов Киля–Стрельца и Внешнего значения a_0 в точности соответствуют найденным в настоящей работе, а для двух других рукавов значения a_0 подобраны “на глаз”. На рисунке можно видеть, что оба эти рукава хорошо проходят по данным во втором и третьем галактическом квадрантах. При этом наилучшим образом представлен рукав Киля–Стрельца, в котором отчетливо видна наиболее плотная концентрация звезд в третьем квадранте.

Скорость спирального узора и положение коротации

Выборку из 1618 цефеид с возрастaми в интервале 80–300 млн лет мы разделили в зависимости от моды пульсации. Оказалось, что из них 1132 цефеиды пульсируют в основном тоне, и их средний

возраст составляет 138 млн лет. В первом оберлоне пульсируют 486 цефеид, а их средний возраст составляет 169 млн лет. Разница в возрасте в 31 млн лет дает возможность оценить угловую скорость вращения спирального узора Ω_p . Вернее, разность между угловой скоростью вращения Галактики Ω и скоростью вращения спирального узора Ω_p , так как здесь рассматриваются координаты и скорости относительно Солнца.

Действительно, уравнение (2) можно переписать в виде

$$\ln(R/R_0) = \text{tg } i [\theta - \theta_0 + (\chi - \chi_0)/m + (\Omega - \Omega_p)t], \quad (6)$$

дополнив подход Локтина, Маткина (1992) членом $(\chi - \chi_0)/m$, где χ — радиальная фаза волны, χ_0 — положение Солнца в волне, а m — количество спиральных рукавов. В настоящей работе мы принимаем $m = 4$. При $R \mapsto R_0$ и $\theta \mapsto 0$ будем иметь следующее соотношение:

$$\Delta\Omega = \Delta\chi \times 10^3 / (m\Delta t), \quad (7)$$

где разность фаз $\Delta\chi$ выражена в радианах, разность возрастa Δt в млн лет, а $\Delta\Omega = \Omega - \Omega_p$ в км/с/кпк. В работе Бобылева, Байковой (2012) на основе соотношения (7) из анализа нескольких выборок цефеид различного возрастa была получена оценка $\Delta\Omega = 10 \pm 3$ км/с/кпк для принятого значения $m = 2$ (следовательно, $\Delta\Omega = 5 \pm 2$ км/с/кпк для $m = 4$).

На рис. 4 даны вэйвлет-карты на диаграмме “позиционный угол—логарифм расстояния”, построенные по цефеидам с возрастaми в интервале 80–300 млн лет, пульсирующими как в основном тоне, так и в первом оберлоне. Из-за относительно малого количества цефеид, пульсирующих в первом оберлоне, их карты демонстрируют значительные нерегулярности. Отметим также, что Лемасл и др. (2022) обнаружили существенные отклонения

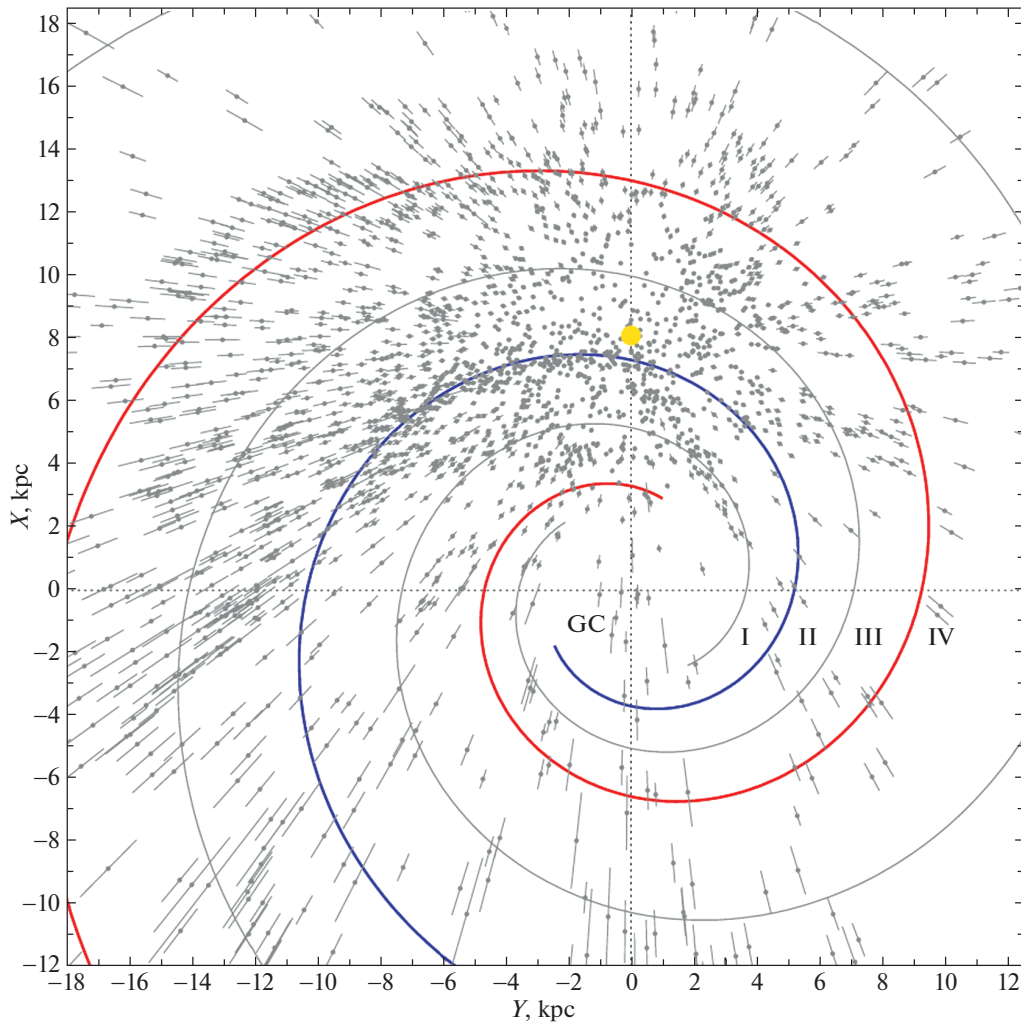


Рис. 3. Распределение цефеид в проекции на галактическую плоскость XU , положение Солнца отмечено желтым кружком, GC — центр Галактики, показаны четыре спиральных рукава, построенные с углом закрутки -12.5° .

от регулярного спирального узора у группировок цефеид с различными физическими свойствами.

В табл. 3 даны параметры спирали, найденные при поиске МНК-решения системы условных уравнений вида (3) по взйвлет-картам рис. 4. В табл. 3 имеются оценки b для двух спиральных рукавов со средней разностью возраста $\Delta t = 31$ млн лет. Так как $b/\text{tg } i - \chi/m = \Delta\Omega t + \theta_0$, то можем перевести найденные смещения Δb или Δa_0 в произошедшие за рассматриваемый промежуток времени Δt разности фаз $\Delta\chi$ и оценить $\Delta\Omega$ с использованием соотношения (7).

В итоге мы нашли для центра рукава Килья—Стрельца $\Delta\Omega = 4.8 \pm 2.8$ км/с/кпк и для центра Внешнего рукава $\Delta\Omega = 12.5 \pm 3.5$ км/с/кпк. Приняв значения длины волны λ , равные 2.5 кпк и 3.5 кпк для окрестности рукава Килья—Стрельца и Внешнего соответственно, мы оценили значение радиуса коротации $R_{\text{cor}} = 9 \pm 0.3$ кпк. На рис. 5 схематично показаны угловая скорости вращения

Галактики Ω и спирального узора Ω_p , отмечены положения спиральных рукавов Килья—Стрельца и Внешнего, а также радиуса коротации.

Наконец, если принять значение угловой скорости вращения Галактики в области коротации $\Omega(R_{\text{cor}}) = 26.9 \pm 0.6$ км/с/кпк согласно кривой вращения из работы Бабылева, Байковой (2022), которая была определена по выборке мазеров с измеренными тригонометрическими параллаксами, находим $\Omega_p = 27 \pm 1$ км/с/кпк.

Отметим некоторые результаты определения угловой скорости Ω_p , полученные различными авторами. Из анализа кинематики выборки ярких классических цефеид в работе Мишурова и др. (1979) была получена оценка $\Omega_p = 19.1 \pm 3.6$ км/с/кпк. Также по кинематике цефеид Мишуров и др. (1997) нашли $\Omega_p = 28.1 \pm 2.0$ км/с/кпк. По данным о распределении рассеянных звездных скоплениях Локтин, Маткин (1992) получили оценку $\Omega_p = 21.3$ км/с/кпк. По распределению цефеид в

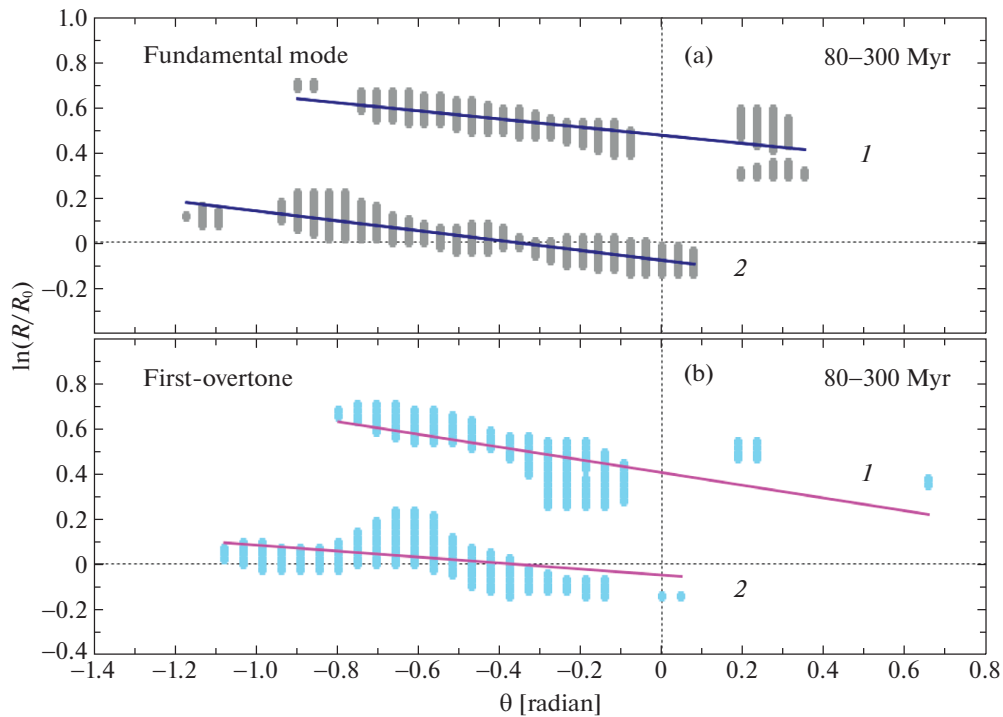


Рис. 4. Вэйвлет-карта на диаграмме “позиционный угол—логарифм расстояния”, построенная по цефеидам с возрастaми в интервале 80–300 млн лет, пульсирующим в основном тоне (а) и по цефеидам, пульсирующим в первом обертоне (b), линия 1 проведена по Внешнему рукаву, а линия 2 по рукаву Килля–Стрельца.

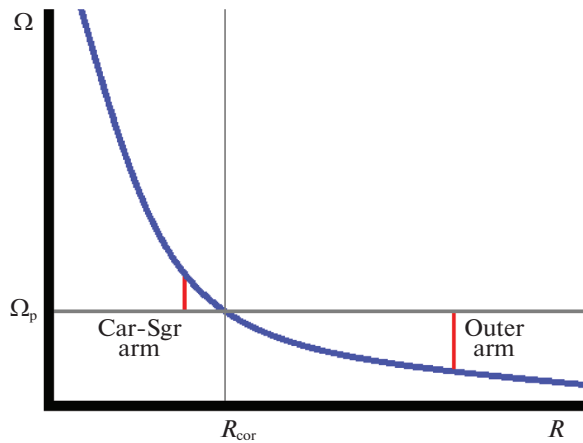


Рис. 5. Угловая скорость вращения Галактики Ω и угловая скорость вращения спирального узора Ω_p в зависимости от галактоцентрического расстояния R , красными линиями для двух рассматриваемых спиральных рукавов показаны разности вида $\Omega - \Omega_p$, качественно соответствующие данным табл. 3.

работе Дамбиса и др. (2015) найдено значение $\Omega_p = 25.2 \pm 0.5$ км/с/кпк, где было проведено усреднение по трем отрезкам спиральных рукавов. Полученная в настоящей работе оценка $\Omega_p = 27 \pm \pm 1$ км/с/кпк находится в хорошем согласии с перечисленными результатами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена выборка классических цефеид Галактики с оценками расстояний до них из работы

Сковрон и др. (2019), которые были вычислены этими авторами на основе соотношения период—светимость. Главной особенностью настоящей работы является то, что расстояния до цефеид из работы Сковрон и др. (2019) были увеличены на 10% согласно полученным нами ранее (Бобылев, Байкова, 2022a) результатам кинематического анализа этих цефеид. Для определения геометрических характеристик спиральных рукавов Килля–Стрельца и Внешнего использованы цефеиды с возрастaми в интервале 80–300 млн лет. Расстояние от Солнца

Таблица 3. Параметры спирали, найденные при поиске МНК-решения системы условных уравнений вида (3) по вэйвлет-картам на рис. 4

Рукав	a	b	i , град.	a_0 , кпк
II (Киля–Стрельца)	-0.218 ± 0.010	-0.078 ± 0.008	-12.32 ± 0.61	7.49 ± 0.08
IV (Внешний)	-0.180 ± 0.010	$+0.475 \pm 0.007$	-10.21 ± 0.69	13.03 ± 0.08
II (Киля–Стрельца)	-0.133 ± 0.011	-0.047 ± 0.010	-7.55 ± 0.66	7.73 ± 0.08
IV (Внешний)	-0.282 ± 0.012	$+0.406 \pm 0.009$	-15.75 ± 0.64	12.16 ± 0.08

Примечание. В верхней части даны параметры, полученные по цефеидам со средним возрастом 138 млн лет, пульсирующими в основном тоне, а в нижней — по цефеидам со средним возрастом 169 млн лет, пульсирующими в первом оберлоне.

до галактического центра R_0 в настоящей работе принято равным 8.1 ± 0.1 кпк.

По 257 цефеидам, принадлежащим отрезку рукава Киля–Стрельца, с возрастными в интервале 80–120 млн лет с применением единичных весов $w_i = 1$ при поиске МНК-решения системы условных уравнений (3) получена оценка угла закрутки спирального узора $i = -12.5 \pm 0.5^\circ$. Положение центра этого спирального рукава на оси “центр Галактики–Солнце” найдено равным $a_0 = 7.29 \pm 0.05$ кпк. По 352 более возрастным цефеидам, принадлежащим отрезку Внешнего рукава, с возрастными 120–300 млн лет, найдены $i = -12.3 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 13.01 \pm 0.06$ кпк.

Вычисления были повторены с применением весов вида $w_i = 1/\sigma_{\ln(R/R_0)}^2$. В этом случае для рукава Киля–Стрельца получены следующие оценки: $i = -12.7 \pm 0.4^\circ$ и $a_0 = 7.28 \pm 0.05$ кпк, а для Внешнего рукава $i = -12.0 \pm 0.5^\circ$ и $a_0 = 13.03 \pm 0.06$ кпк.

В настоящей работе мы повторили анализ Бобылева (2022) практически по тем же звездам. Отличие состоит только в том, что расстояния до цефеид из работы Сковрон и др. (2019) были увеличены на 10%. Мы нашли, что удлинение шкалы расстояний цефеид на 10% изменили значения искомым параметров i и a_0 примерно на величину 1σ .

Для каждого отрезка спирального рукава был найден параметр ширины, вычисленный как дисперсия σ по отклонению от центра рукава. Для рукава Киля–Стрельца значение этого параметра составляет $1\sigma = 0.58$ кпк, а для Внешнего $1\sigma = 0.72$ кпк.

Вычисления были повторены с использованием вэйвлет карты в плоскости “позиционный угол–логарифм расстояния”, для построения которой была использована общая выборка из 1618 цефеид с возрастными в интервале 80–300 млн лет. В этом случае для рукава Киля–Стрельца получены следующие оценки: $i = -12.9 \pm 0.4^\circ$ и $a_0 = 7.43 \pm 0.05$ кпк, а для Внешнего рукава $i = -12.5 \pm 0.5^\circ$

и $a_0 = 13.33 \pm 0.06$ кпк. Видим, что на основе двух различных подходов мы получили очень близкие результаты.

Придерживаясь модели глобального спирального узора в Галактике с одним значением угла закрутки для всех рукавов, мы заключили, что значение этого угла близко к -12.5° .

Выборку из 1618 цефеид с возрастными в интервале 80–300 млн лет мы разделили в зависимости от моды пульсации. Оказалось, что из них 1132 цефеиды пульсируют в основном тоне, а 486 цефеид пульсируют в первом оберлоне. Две эти выборки имеют разницу в возрасте 31 млн лет. Из анализа этих данных мы нашли, что радиус коротации составляет около 9 кпк. Таким образом, он расположен между Солнцем и рукавом Персея, на внутренней границе рукава Персея. Получена оценка угловой скорости вращения спирального узора $\Omega_p = 27 \pm 1$ км/с/кпк.

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).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **38**, 715 (2012) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **38**, 638 (2012)].
- Бобылев, Байкова (Bobylev V.V. and Bajkova A.T.), *MNRAS* **437**, 1549 (2014).
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрон. журн.* **98**, 497 (2021) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **65**, 498 (2021)].
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **48**, 138 (2022) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **48**, 126 (2022)].
- Бобылев В.В., Байкова А.Т., *Астрон. журн.* **99**, 558 (2022a) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **66**, 545 (2022a)].
- Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **48**, 492 (2022b) [V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **48**, 376 (2022b)].
- Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **454**, 119 (1995).

9. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. J.* **566**, 261 (2002).
10. Валле (J.P. Vallée), *Astron. J.* **135**, 1301 (2008).
11. Валле (J.P. Vallée), *New Astron. Rev.* **79**, 49 (2017).
12. Валле (J.P. Vallée), *Astrophys. Space Sci.* **363**, 243 (2018).
13. Ванг и др. (S. Wang, X. Chen, R. de Grijs, and L. Deng), *Astrophys. J.* **852**, 78 (2018).
14. Васкес и др. (R.A. Vázquez, J. May, G. Carraro, L. Bronfman, A. Moitinho, and G. Baume), *Astrophys. J.* **672**, 930 (2008).
15. Веселова, Никифоров (A.V. Veselova and I.I. Nikiforov), *Res. Astron. Astrophys.* **20**, 209 (2020).
16. Витязев В.В., *Вэйвлет-анализ временных рядов* (СПб.: Изд-во СПб. Университета, 2001).
17. Герхард (O. Gerhard), *Mem. Soc. Astron. Italiana Suppl. Ser.* **18**, 185 (2011).
18. Грив и др. (E. Griv, I.-G. Jiang, and L.-G. Hou), *Astrophys. J.* **844**, 118 (2017).
19. Дамбис А.К., Бердников Л.Н., Ефремов Ю.Н., Князев А.Ю., Расторгуев А.С., Глушкова и др., *Письма в Астрон. журн.* **41**, 533 (2015) [A.K. Dambis, et al., *Astron. Lett.* **41**, 489 (2015)].
20. Диас, Лепинэ (W.S. Dias and J.R.D. Lépine), *Astrophys. J.* **629**, 825 (2005).
21. Ефремов Ю.Н., *Астрон. журн.* **88**, 127 (2011) [Yu.N. Efremov, *Astron. Rep.* **55**, 105 (2011)].
22. Жоржелин, Жоржелин (Y.M. Georgelin and Y.P. Georgelin), *Astron. Astrophys.* **49**, 57 (1976).
23. Крезе, Меннесье (M. Crèze and M.O. Mennessier), *Astron. Astrophys.* **27**, 281 (1973).
24. Лепинэ и др. (J.R.D. Lépine, Yu. Mishurov and S.Yu. Dedikov), *Astrophys. J.* **546**, 234 (2001).
25. Лемасл и др. (B. Lemasle, H.N. Lala, V. Kovtyukh, M. Hanke, Z. Prudil, G. Vopo, V.F. Braga, R. da Silva, et al.), arXiv: 2209.02731 (2022).
26. Ливайн и др. (E.S. Levine, L. Blitz, and C. Heiles), *Science* **312**, 1773 (2006).
27. Линь, Шу (C.C. Lin and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **140**, 646 (1964).
28. Линь и др. (C.C. Lin, C. Yuan, and F.H. Shu), *Astrophys. J.* **155**, 721 (1969).
29. Локтин, Маткин (A.V. Loktin and N.V. Matkin), *Astron. Astrophys. Tr.* **3**, 169 (1992).
30. Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., *Письма в Астрон. журн.* **27**, 611 (2001) [A.M. Mel'nik, A.K. Dambis, and A.S. Rastorguev, *Astron. Lett.* **27**, 521 (2001)].
31. Мишуров Ю.Н., Павловская Е.Д., Сучков А.А., *Астрон. журн.* **23**, 147 (1979) [Yu.N. Mishurov, E.D. Pavlovskaja and A.A. Suchkov, *Astron. Rep.* **56**, 268 (1979)].
32. Мишуров и др. (Yu.N. Mishurov, I.A. Zenina, A.K. Dambis, et al.), *Astron. Astrophys.* **323**, 775 (1997).
33. Мишуров, Зенина (Yu.N. Mishurov and I.A. Zenina), *Astron. Astrophys.* **341**, 81 (1999).
34. Моитиньо и др. (A. Moitinho, R.A. Vázquez, G. Carraro, G. Baume, E.E. Giorgi, and W. Lyra), *MNRAS* **368**, L77 (2006).
35. Никифоров И.И., Веселова А.В., *Письма в Астрон. журн.* **44**, 102 (2018) [I.I. Nikiforov, A.V. Veselova, *Astron. Lett.* **44**, 81 (2018)].
36. Паладини и др. (R. Paladini, R. Davies and G. DeZotti), *MNRAS* **347**, 237 (2004).
37. Поджио и др. (E. Poggio, R. Drimme, T. Cantat-Gaudin, P. Ramos, V. Ripepi, E. Zari, R. Andrae, R. Blomme, et al.), *Astron. Astrophys.* **651**, 104 (2021).
38. Попова М.Э., Локтин А.В., *Письма в Астрон. журн.* **31**, 190 (2005) [M.E. Popova, A.V. Loktin, *Astron. Lett.* **31**, 171 (2005)].
39. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
40. Руссейль (D. Russeil), *Astron. Astrophys.* **397**, 133 (2003).
41. Сковрон и др. (D.M. Skowron, J. Skowron, P. Mróz, A. Udalski, P. Pietrukowicz, I. Soszyński, M.K. Szymański, R. Poleski, et al.), *Science* **365**, 478 (2019).
42. Сюй и др. (Y. Xu, L.-G. Hou, and Y.-W. Wu), *Res. Astron. Astrophys.* **18**, 146 (2018).
43. Сюй и др. (Y. Xu, L.G. Hou, S. Bian, C.J. Hao, D.J. Liu, J.J. Li, and Y.J. Li), *Astron. Astrophys.* **645**, L8 (2021).
44. Тэйлор, Кордес (J.H. Taylor, and J.M. Cordes), *Astrophys. J.* **411**, 674 (1993).
45. Удальский и др. (A. Udalski, M.K. Szymański, and G. Szymański), *Acta Astron.* **65**, 1 (2015).
46. Хао и др. (Hao C.J., Xu Y., Hou L.G., S.B. Bian, J.J. Li, Z.Y. Wu, Z.H. He, Y.J. Li, and D.J. Liu), *Astron. Astrophys.* **652**, 102 (2021).
47. Хой, Хан (L.G. Hou and J.L. Han), *Astron. Astrophys.* **569**, 125 (2014).
48. Хой, Хан (L.G. Hou and J.L. Han), *MNRAS* **454**, 626 (2015).
49. Хой (L.G. Hou), *Front. Astron. Space Sci.* **8**, 103 (2021).
50. Чен и др. (X. Chen, S. Wang, L. Deng, R. de Grijs, and M. Yang), *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **237**, 28 (2018).
51. Чу (C.K. Chui), *Wavelets: A Mathematical Tool for Signal Analysis* (SIAM, Philadelphia, PA., 1997).