

УДК 524.62; 524.66

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ ВРАЩЕНИЯ ЗВЕЗД ПОЯСА ГУЛЬДА НА ОСНОВЕ ФОРМУЛ БОТТЛИНГЕРА

© 2004 г. В. В. Бобылев*

Главная астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 14.05.2003 г.

На основе каталога HIPPARCOS и опубликованных к настоящему времени лучевых скоростей звезд выполнен кинематический анализ ОБ-звезд. Параметры общего галактического вращения определены на основе далеких ОБ-звезд. Выполнено изучение собственного вращения близких ОБ-звезд на основе остаточных скоростей звезд, которые освобождены от общего галактического вращения. Из анализа кинематических параметров получены оценки геометрических характеристик пояса Гульда. Получены параметры пекулярного движения Солнца, параметры собственного вращения и расширения и сжатия как для случая вращения вокруг галактической оси z , так и для случая вращения вокруг оси, перпендикулярной к плоскости симметрии диска. Найдены кинематические параметры собственного дифференциального вращения для двух возрастных групп близких ОБ-звезд. Показано, что вращение практически всех близких ОБ-звезд происходит в том же направлении, что и вращение Галактики. Построены кривые вращения.

Ключевые слова: пояс Гульда, Галактика (Млечный путь).

DETERMINATION OF THE ROTATION CURVE FOR STARS OF GOULD'S BELT USING BOTTlinger'S FORMULAS, *by V. V. Bobylev*. Based on the Hipparcos catalog and the radial velocities of stars published to date, we perform a kinematic analysis of OB stars. Parameters of the general Galactic rotation were determined from distant OB stars. We use the residual velocities of stars freed from the general Galactic rotation to study the proper rotation of nearby OB stars. Geometrical characteristics of Gould's belt were estimated by analyzing the kinematic parameters. We obtained parameters of the peculiar solar motion as well as parameters of the proper rotation and the expansion and contraction for the rotation around both the Galactic z axis and an axis perpendicular to the symmetry plane of the disk. Kinematic parameters of the proper differential rotation were determined for two age groups of nearby OB stars. All of the nearby OB stars are shown to rotate in the same sense as that of the Galactic rotation. We constructed rotation curves.

Key words: Gould's belt, Galaxy (Milky Way).

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в работах Палоуша (1997), Комерона (1999), Торры и др. (2000), Линдблада (2000) выполнен кинематический анализ звезд пояса Гульда, на основе собственных движений каталога HIPPARCOS (ESA, 1997) в комбинации с лучевыми скоростями. В работе Палоуша (1997) для наиболее молодых звезд пояса Гульда получены величины постоянных Оорта A , B , C , K , сделан вывод о том, что квадратичные члены кинематической модели не значимы. В работе Комерона (1999) на основе анализа пространственных скоростей наиболее молодых звезд пояса Гульда выполнено изучение градиента линейной скорости W вдоль галактической оси z . В работе

Торры и др. (2000) на основе линейной модели Оорта–Линдблада постоянные Оорта получены для большого количества звезд в зависимости от их возраста. Индивидуальный возраст звезд определялся на основе фотометрии Стремгрена. Было показано, что средний возраст звезд пояса Гульда составляет 60×10^6 лет. Линдбладом (2000) на основе анализа результатов работ Комерона (1999) и Торры и др. (2000), предложена модель собственного дифференциального вращения звезд пояса Гульда, учитывающая наклон вращающегося диска к галактической плоскости $i_G = 20^\circ$ и расширение системы звезд, при этом модуль вектора угловой скорости вращения найден $|\omega_G| = 24$ км/с/кпк.

В указанных работах вопрос об учете влияния общего галактического вращения на движение звезд пояса Гульда не ставился. Одной из це-

*Электронный адрес: vbobylev@gao.spb.ru

лей настоящей работы является более корректное определение параметров собственного вращения звезд пояса Гульда на основе пространственных скоростей звезд, освобожденных от общего галактического вращения.

Изучение особенностей движения ОВ-звезд, расположенных от Солнца дальше предполагаемой границы пояса Гульда $r \sim 0.5$ кпк, тесно связано как с проблематикой общего галактического вращения, так и с проблематикой изучения звезд пояса Гульда. В работе Миямото, Жу (1998) выполнен анализ 1352 одиночных звезд О-В5, находящихся на гелиоцентрических расстояниях до 3 кпк и не принадлежащих поясу Гульда. Исследование проведено на основе линейной модели Огородникова–Милна с использованием только собственных движений звезд каталога HIP-PARCOS. Обнаружено систематическое вращение звезд О-В5 вокруг галактической оси x с угловой скоростью $2D_{32}^- = 3.8 \pm 1.1$ км/с/кпк.

В работах Дамбиса и др. (2001), Мельник и др. (2001), Заболотских и др. (2002) на основе нелинейной кинематической модели с использованием пространственных скоростей звезд выполнено моделирование галактического вращения и выявлен ряд нерегулярностей в движении ОВ-ассоциаций, находящихся на гелиоцентрических расстояниях до 3 кпк. В работе Дамбиса и др. (2001) поставлен вопрос о сокращении шкалы расстояний до ОВ-звезд на 10–20%, что необходимо учесть при определении параметров общего галактического вращения.

Целью настоящей работы является изучение регулярных составляющих в движении (вращение, эффекты расширения и сжатия) близких ОВ-звезд, большая часть которых принадлежит поясу Гульда. Предполагается выполнение анализа кинематических особенностей близких ОВ-звезд на основе двух массивов, образованных путем разделения звезд на классы светимости, что является грубым делением на две возрастные группы. Этот подход позволяет проследить эволюционные изменения, происходящие с облаком водорода, из которого образовались данные ОВ-звезды. Прежде чем проводить изучение указанных эволюционных изменений на основе достаточно сложной кинематической модели Огородникова–Милна, особенно в присутствии и вращения, и K -эффекта, необходимо иметь представление о направлении и центре вращения. Этим обусловлен выбор использованной в настоящей работе достаточно простой модели вращения на основе формул Боттлингера.

РАБОЧИЕ МАССИВЫ ДАННЫХ

Следующие астрометрические данные взяты из каталога HIPPARCOS (ESA, 1997): экваториальные координаты, параллаксы, собственные

движения звезд и их ошибки, спектральные классы и классы светимости. Лучевые скорости взяты из каталога Барбье-Бросса, Фигона (2000). В этом каталоге содержатся данные о 4407 ОВ-звездах. В настоящей работе используются одиночные звезды (отброшены астрометрические орбитальные двойные, отмеченные символом “О” в каталоге Барбье-Бросса, Фигона (2000)). Используются только те звезды, для которых одновременно имеются данные о лучевых скоростях и собственных движениях.

РАБОЧИЕ УРАВНЕНИЯ

В настоящей работе используется прямоугольная галактическая система координат с осями, направленными от наблюдателя в сторону галактического центра ($l = 0^\circ$, $b = 0^\circ$, ось x), в направлении галактического вращения ($l = 90^\circ$, $b = 0^\circ$, ось y) и в направлении северного полюса Галактики ($b = 90^\circ$, ось z). Рабочие уравнения получены на основе известных формул Боттлингера (Огородников, 1965) в виде

$$V_r = -u_\odot \cos b \cos(l - l_0) - v_\odot \cos b \sin(l - l_0) - w_\odot \sin b - R_0(R - R_0) \times \quad (1)$$

$$\times \sin(l - l_0) \cos b \omega'_0 - 0.5 R_0(R - R_0)^2 \times \\ \times \sin(l - l_0) \cos b \omega''_0 + K r \cos^2 b, \\ k r \mu_l \cos b = u_\odot \sin(l - l_0) - \quad (2)$$

$$- v_\odot \cos(l - l_0) - (R - R_0)(R_0 \cos(l - l_0) - \\ - r \cos b) \omega'_0 - 0.5(R - R_0)^2(R_0 \cos(l - l_0) - \\ - r \cos b) \omega''_0 + r \cos b \omega_0, \\ k r \mu_b = u_\odot \cos(l - l_0) \sin b + \quad (3)$$

$$+ v_\odot \sin(l - l_0) \sin b - w_\odot \cos b + R_0(R - R_0) \times \\ \times \sin(l - l_0) \sin b \omega'_0 + 0.5 R_0(R - R_0)^2 \times \\ \times \sin(l - l_0) \sin b \omega''_0 - K r \cos b \sin b.$$

Здесь $k = 4.740$, $r = 1/\pi$ — гелиоцентрическое расстояние звезды, R_0 — расстояние от Солнца до центра вращения, R — расстояние от звезды до центра вращения, u_\odot , v_\odot , w_\odot — компоненты пекулярной скорости Солнца относительно локального центроида, компоненты собственного движения звезды $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в миллисекундах дуги в год (мсек. дуги/год), лучевая скорость V_r в км/с, параллакс π в мсек. дуги, расстояния R , R_0 и r в кпк. Величина ω_0 является угловой скоростью вращения на расстоянии R_0 , величины ω'_0 , ω''_0 — соответствующие производные, K — линейный коэффициент радиального расширения (или сжатия), l_0 — направление на центр вращения, R вычисляется в соответствии с выражением

$$R^2 = (r \cos b)^2 - 2R_0 r \cos b \cos(l - l_0) + R_0^2. \quad (4)$$

Уравнения (1)–(3) содержат семь искомым неизвестных: u_{\odot} , v_{\odot} , w_{\odot} , ω_0 , ω'_0 , ω''_0 и K , которые определяются методом наименьших квадратов.

В отличие от работ Дамбиса и др. (2001), Мельник и др. (2001), Заболотских и др. (2002), в которых для определения параметров кривой галактического вращения на основе далеких ОВ-звезд применяются два уравнения (1) и (2), нами используется еще и уравнение (3). Для далеких ОВ-звезд величина $|b|$ близка к 0° , поэтому в использовании уравнения (3) нет особой необходимости. Для близких ОВ-звезд значение широты $|b| \sim 30^\circ$, поэтому применение уравнения (3) является необходимым.

На основе уравнений (1)–(3) предполагается изучение двух вращений:

А. Общего галактического, в этом случае полагаем $l_0 = 0^\circ$.

Б. Собственного вращения близких ОВ-звезд на основе остаточных (освобожденных от общего галактического вращения) скоростей звезд. В этом случае мы делаем попытку оценить, на основе анализа кинематических параметров, еще и следующие геометрические характеристики: l_0 , R_0 и наклон вращающегося диска к галактической плоскости i_G . Предполагается получить кинематические параметры ω_0 , ω'_0 , ω''_0 , K как для случая вращения вокруг галактической оси z , так и для случая вращения вокруг оси, перпендикулярной к плоскости симметрии диска (для характеристики направления данной оси необходимы две величины — наклон i_G и направление восходящего узла Ω_G).

ПОСТОЯННЫЕ ООРТА

В таблице нами собраны опубликованные к настоящему времени результаты независимых определений постоянных Оорта. В обзоре Керра, Линден-Белла (1986) средние значения постоянных Оорта вычислены на основе большого количества доступных к тому времени независимых источников. В работе Хансона (1987) постоянные Оорта определены из анализа абсолютных собственных движений 60 000 слабых звезд (16-й звездной величины), которые являются результатом выполнения программы Ликской обсерватории. В работе Линдблада (1997) постоянные Оорта определены с использованием далеких О- и В-звезд из каталога HIPPARCOS с расстояниями $r \leq 2$ кпк, не принадлежащих поясу Гюльда. В работе Фиста, Уайтлок (1997) постоянные Оорта определены на основе собственных движений цефеид каталога HIPPARCOS. В работе Фиста и др. (1998) постоянная Оорта A определена с использованием доступных лучевых скоростей

Постоянные Оорта A и B

Источник	A , км/с/кпк	B , км/с/кпк
Керр, Линден-Белл (1986)	14.4 _(1.2)	-12.0 _(2.8)
Хансон (1987)	11.3 _(1.1)	-13.9 _(0.9)
Линдблад (2000)	13.7 _(1.0)	-13.6 _(0.8)
Фист, Уайтлок (1997)	14.8 _(0.8)	-12.4 _(0.6)
Фист и др. (1998)	15.1 _(0.3)	
Бобылев (2002)	12.9 _(1.3)	-12.4 _(1.1)
Среднее	13.7 _(0.6)	-12.9 _(0.4)

звезд и нового значения нуля-пункта зависимости период—светимость, полученного на основе тригонометрических параллаксов HIPPARCOS. В работе Бобылева (2002) постоянные Оорта определены из анализа абсолютных собственных движений 31 452 слабых звезд (15-й звездной величины), которые получены в результате выполнения Пулковской программы (каталог PUL2). На основе результатов, перечисленных в таблице, вычислены средние значения постоянных Оорта: $A = 13.7 \pm 0.6$ км/с/кпк и $B = -12.9 \pm 0.4$ км/с/кпк, которые используются в настоящей работе при учете галактического вращения на основе модели Оорта—Линдблада (Огородников, 1965).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Параметры галактического вращения

Сформирован массив данных далеких ОВ-звезд (без разделения на классы светимости) в интервале $0.3 \text{ мсд} < \pi < 1.5 \text{ мсд}$. В результате решения системы уравнений (1)–(3) получены следующие кинематические параметры: $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (8.2 \pm 0.6, 11.6 \pm 0.7, 8.9 \pm 0.6)$ км/с и

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -28.0 \pm 0.6 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +4.17 \pm 0.14 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -0.81 \pm 0.12 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -3.0 \pm 0.4 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (5)$$

Решение получено на основе исследования 791 звезды ($\bar{r} = 1.0$ кпк, среднее значение $\varepsilon_{\pi}/\pi = 1$). В уравнениях (1)–(4) принято $l_0 = 0^\circ$, расстояние от Солнца до центра Галактики $R_0 = 7.1$ кпк, что соответствует короткой шкале

расстояний (Дамбис и др., 2001). Знак “–” при ω_0 означает, что вращение Галактики происходит по часовой стрелке в рассматриваемой системе координат. Пекулярная скорость Солнца и координаты апекса равны: $V_{\odot} = 16.7 \pm 0.6$ км/с, $L_{\odot} = 55 \pm 2^\circ$, $B_{\odot} = 32 \pm 2^\circ$. На следующем шаге уравнения (1)–(3) были решены вновь, при этом и лучевые скорости и собственные движения звезд исправлены за пекулярную скорость Солнца относительно локального центроида¹. Для этого использованы величины из работы Денен, Бинни (1998): $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (10.0, 5.3, 7.2)$ км/с. В результате получены следующие компоненты движения далеких ОВ-звезд относительно локального центроида: $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (-1.8 \pm 0.6, 6.3 \pm 0.7, 1.8 \pm 0.6)$ км/с, $V_{\text{ОВ}} = 6.8 \pm 0.6$ км/с. В уравнения (1)–(3) компоненты пекулярной скорости Солнца входят с обратным знаком, следовательно, рассматриваемые ОВ-звезды движутся в направлении $L_{\text{ОВ}} = 286 \pm 5^\circ$, $B_{\text{ОВ}} = -15 \pm 5^\circ$. Полученные на основе далеких ОВ-звезд величины ω_0 , ω'_0 , ω''_0 можно рассматривать как параметры галактического вращения. Уравнения (1)–(3) были решены и для расстояния $R_0 = 8.5$ кпк, рекомендованного МАС (1986). Получены следующие кинематические параметры: $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (8.3 \pm 0.6, 12.0 \pm 0.7, 8.9 \pm 0.6)$ км/с,

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -27.9 \pm 0.6 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +3.43 \pm 0.11 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -0.55 \pm 0.10 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -2.9 \pm 0.4 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (6)$$

Постоянные Оорта, которые оцениваются в соответствии с известными формулами (Огородников, 1965) $A = 0.5R_0\omega'_0$ и $B = \omega_0 + 0.5R_0\omega'_0$, вычисленные как на основе решения (5) $A = 14.8 \pm 0.5$ км/с/кпк, $B = -13.2 \pm 0.8$ км/с/кпк, так и на основе решения (6) $A = 14.6 \pm 0.5$ км/с/кпк, $B = -13.3 \pm 0.8$ км/с/кпк, фактически не различаются между собой, и находятся в хорошем согласии с обсуждавшимися выше величинами (таблица).

Собственное вращение звезд пояса Гюльда

Группа А. Рассматриваются близкие ОВ-звезды, не принадлежащие главной последовательности, большую часть которых составляют звезды с классами светимости I, II и III. Обозначим данные звезды как группа А. К этой группе звезд принадлежат более старые звезды пояса Гюльда

¹ Здесь под этим термином понимается LSR (Local Standard of Rest).

(относительно ОВ-звезд главной последовательности). Звезды отобраны при условиях: $0.5 \text{ мсд} < r < 2 \text{ кпк}$ и $\varepsilon_{\pi}/\pi < 1$, которым удовлетворяют 1747 звезд ($\bar{r} = 0.28$ кпк, среднее значение $\varepsilon_{\pi}/\pi = 0.37$). Моделирование собственного дифференциального вращения данных звезд на основе уравнений (1)–(3) проведено в несколько этапов:

1. Лучевые скорости и собственные движения звезд исправлены за галактическое вращение на основе кривой вращения, найденной нами в предыдущем пункте (решение (5)) с использованием формул (1)–(3).

2. Лучевые скорости и собственные движения звезд исправлены за пекулярное движение Солнца относительно локального центроида с использованием величин, полученных в работе Денен, Бинни (1998): $(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot}) = (10.0, 5.3, 7.2)$ км/с.

3. На основании оценок расстояния до центра вращения звезд пояса Гюльда, полученных различными авторами (см. Торра и др., 2000), в качестве исходной была принята величина $R_0 = 0.2$ кпк, с которой были получены решения уравнений (1)–(3) для различных значений l_0 .

Результаты решений отражены на рис. 1. Из графиков видно, что ω_0 , ω'_0 и ω''_0 имеют экстремум при значении $l_0 = 160^\circ$. В широком диапазоне долгот $l_0 = 45^\circ - 225^\circ$ хотя бы один из искомых параметров значительно отличается от нуля.

Примененный метод поиска l_0 необходимо пояснить. Как можно видеть из уравнений (1)–(3), величина ω_0 определяется только из уравнения (2) и при этом не зависит от $l - l_0$, а на верхнем графике рис. 1 мы видим волну в зависимости от l_0 . Если ввести в рассмотрение фазовый угол $l - l_0 = \theta$ и продифференцировать уравнения (1)–(4) по θ , то получим достаточно сложные зависимости определяемых величин от θ . В то же время, как можно видеть из уравнения (4), величина R зависит от $\cos \theta$, следовательно, имеет экстремум при $\theta = 0^\circ$ и $\theta = 180^\circ$. Именно эта зависимость $R = f(\theta)$, при совместном решении уравнений (1)–(3), приводит и к возникновению волн ω_0 , ω'_0 , ω''_0 (рис. 1). Волны являются несимметричными. Применение данного метода к далеким звездам в случае моделирования галактического вращения, когда изменение l_0 на 180° приводит к разности $\Delta R \sim 15$ кпк, показывает, что несимметричность волн проявляется и в амплитудах определяемых параметров. При анализе звезд пояса Гюльда, когда $\Delta R \sim 0.5$ кпк, имеем возможность анализировать только фазовый сдвиг, и он отчетливо виден на рис. 1. Величина $V_{\text{ОВ}}$ также зависит от l_0 и имеет максимум $V_{\text{ОВ}} = 8.50 \pm 0.35$ км/с при $l_0 = 160^\circ$ и минимум $V_{\text{ОВ}} = 7.02 \pm 0.31$ км/с при $l_0 = 45^\circ$. С формальной точки зрения возможными являются

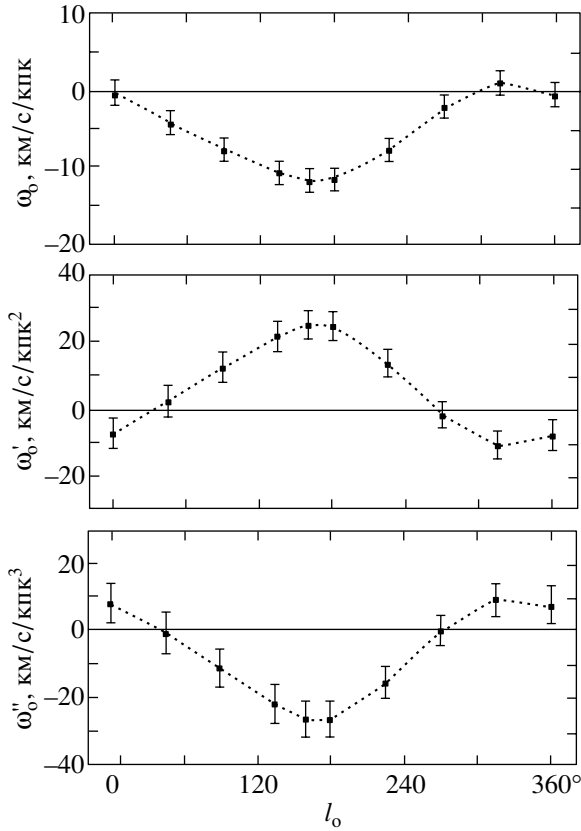


Рис. 1. Параметры кривой вращения близких ОВ-звезд (группа А) ω_0 , ω'_0 и ω''_0 в зависимости от l_0 . Величина R_0 принята равной 0.2 кпк.

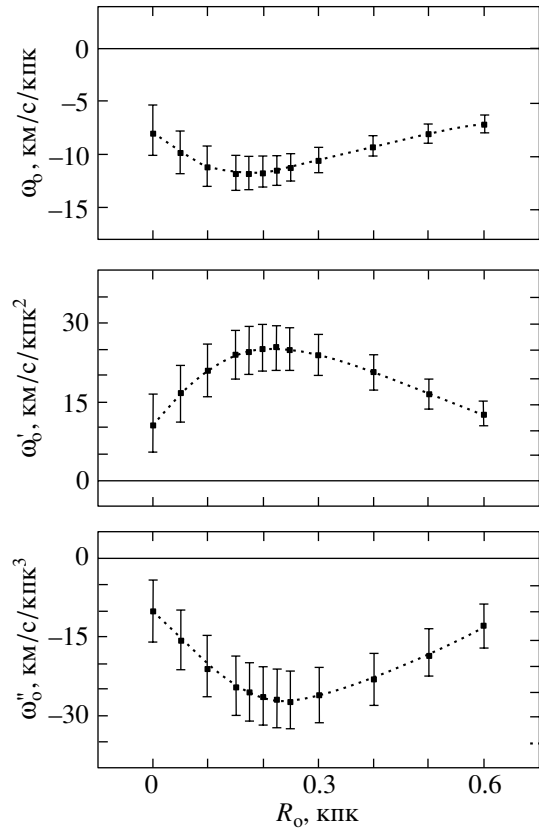


Рис. 2. Параметры кривой вращения близких ОВ-звезд (группа А) ω_0 , ω'_0 и ω''_0 в зависимости от R_0 . Величина l_0 принята равной 160° .

два решения для направлений $l_0 \approx 0^\circ$ и $l_0 \approx 180^\circ$. Мы выбираем то решение, при котором величина l_0 находится во втором квадранте $90^\circ < l < 180^\circ$ (Олано, 1982; Комерон, Торра, 1991).

С принятой величиной $l_0 = 160^\circ$ уравнения (1)–(3) были решены для различных значений R_0 с целью его уточнения. Результаты решений отражены на рис. 2. Все три величины ω_0 , ω'_0 и ω''_0 значимо отличаются от нуля в широком диапазоне R_0 : от 0.1 кпк до 0.4 кпк. Как можно видеть из графиков, величина ω_0 имеет минимум при значении $R_0 = 0.150$ кпк, величины ω'_0 и ω''_0 имеют экстремум при $R_0 = 0.220$ – 0.225 кпк. Нами принято, как наиболее вероятное расстояние до центра вращения, $R_0 = 0.150$ кпк. Непосредственная проверка (построение кривых вращения) показывает, что изменение R_0 от 0.150 кпк до 0.225 кпк приводит к изменению линейных скоростей < 0.25 км/с, что не является существенным.

Рассматриваемые ОВ-звезды движутся относительно локального центроида в направлении $L_{ОВ} = 264 \pm 2^\circ$, $B_{ОВ} = +4 \pm 2^\circ$ со скоростью

$V_{ОВ} = 7.1 \pm 0.3$ км/с. Кинематические параметры, полученные при $l_0 = 160^\circ$, $i_G = 0^\circ$ и $R_0 = 0.15$ кпк, таковы: $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (1.9 \pm 0.3, -8.2 \pm 0.3, -0.4 \pm 0.3)$ км/с,

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -11.8 \pm 1.7 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +23.9 \pm 4.7 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -24.3 \pm 5.7 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -6.0 \pm 0.6 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (7)$$

Постоянные Оорта, которые являются характеристикой собственного дифференциального вращения данной системы ОВ-звезд, вычисленные на основе решения (7), таковы: $A_G = +1.8 \pm 0.4$ км/с/кпк и $B_G = -10.0 \pm 1.7$ км/с/кпк.

Рассмотрен способ учета галактического вращения на основе уравнений (1)–(3) с использованием полученных нами параметров при $R_0 = 8.5$ кпк (решение (6)). При указанном подходе, при $l_0 = 160^\circ$ и $R_0 = 0.15$ кпк, найдено: $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (1.8 \pm 0.3, -8.0 \pm 0.3, -0.4 \pm 0.3)$ км/с, $\omega_0 = -11.4 \pm 1.7$ км/с/кпк, $\omega'_0 = +23.6 \pm 4.7$ км/с/кпк² и $\omega''_0 = -24.2 \pm$

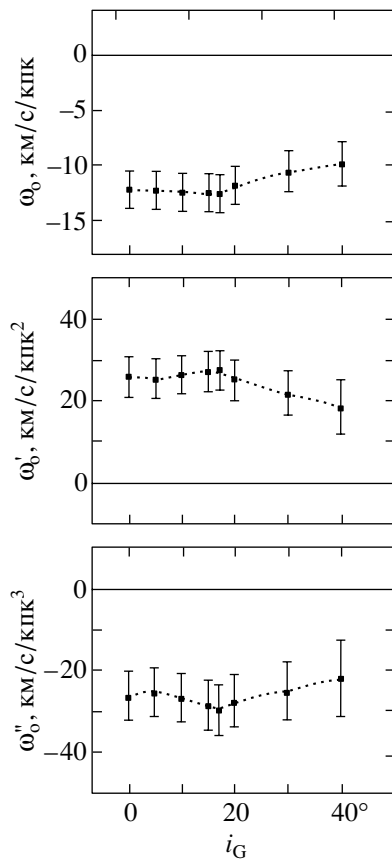


Рис. 3. Параметры кривой вращения близких ОВ-звезд (группа А) ω_0 , ω'_0 и ω''_0 , в зависимости от наклона i_G при $R_0 = 0.15$ кпк, $\Omega_G = 270^\circ$, $|z| < 0.2$ кпк, величина l_0 выбиралась так, чтобы она соответствовала $l_0 = 160^\circ$ в стандартной системе галактических координат.

± 5.7 км/с/кпк³. Это решение практически не отличается от решения (7). Непосредственная проверка показывает, что кривые вращения звезд группы А не имеют существенных различий.

Рассмотрен также способ учета галактического вращения на основе линейной модели Оорта–Линдблада с использованием постоянных Оорта $A = 13.7 \pm 0.6$ км/с/кпк и $B = -12.9 \pm 0.4$ км/с/кпк. При указанном подходе, при $l_0 = 160^\circ$ и $R_0 = 0.15$ кпк, получено: $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (1.9 \pm 0.3, -8.3 \pm 0.4, -0.4 \pm 0.3)$ км/с, $\omega_0 = -11.2 \pm 1.7$ км/с/кпк, $\omega'_0 = +22.1 \pm 4.7$ км/с/кпк² и $\omega''_0 = -24.4 \pm 5.7$ км/с/кпк³. Это решение отличается от решения (7) в найденном значении величины ω''_0 , что приводит к менее выраженному минимуму кривой вращения.

С целью уточнения угла наклона вращающегося диска звезд пояса Гюльда к галактической плоскости были получены решения уравнений (1)–(3) для

различных значений i_G . Значение долготы восходящего узла нами было принято равным $\Omega_G = 270^\circ$ на основе работы Торры и др. (2000), в которой из распределения звезд каталога HIPPARCOS по небесной сфере были найдены следующие геометрические характеристики: $i_G = 16^\circ - 20^\circ$ и $\Omega_G = 275^\circ - 295^\circ$. Далее был осуществлен переход к новой системе галактических координат, связанной с плоскостью симметрии звезд пояса Гюльда. Варьирование величины i_G в широких пределах требует наложения ограничения на расстояние звезды от предполагаемой плоскости симметрии диска $z = r \sin b$, поэтому нами было использовано условие $|z| < 0.2$ кпк. Величина l_0 выбиралась так, чтобы она соответствовала $l_0 = 160^\circ$ в стандартной системе галактических координат и $R_0 = 0.15$ кпк. Результаты решений отражены на рис. 3. Все три величины ω_0 , ω'_0 и ω''_0 значительно отличаются от нуля в диапазоне i_G от 0° до 20° . Экстремумы плохо выражены, фактически их имеется два: при $i = 0^\circ$ и $i = 17^\circ$, так как существенное влияние оказывают звезды фона. В итоге было принято как наиболее вероятное значение $i_G = 17^\circ$. Параметры дифференциального вращения звезд пояса Гюльда, полученные в новой системе координат при найденном $i_G = 17^\circ$ (и принятом $\Omega_G = 270^\circ$), следующие:

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -12.5 \pm 1.7 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +27.4 \pm 5.0 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -29.5 \pm 6.2 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -6.3 \pm 0.6 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (8)$$

Постоянные Оорта для системы звезд пояса Гюльда, вычисленные на основе этих параметров, таковы: $A_G = 2.1 \pm 0.4$ км/с/кпк, $B_G = -10.5 \pm 1.7$ км/с/кпк.

На рис. 4 построены кривые вращения звезд группы А при наклонах $i_G = 0^\circ$ (решение (7)) и $i_G = 17^\circ$ ($\Omega_G = 270^\circ$) (решение (8)). Как можно видеть из рисунка, линейная скорость вращения $V(R)$ составляет 2 км/с при $R = R_0$ и приближается к 3 км/с при $R = 0.4$ кпк. По положению минимума функции $V(R)$ можно заключить, что радиус звездной системы пояса Гюльда не превышает 1 кпк. Используя определенную нами выше (решение (8)) величину $\omega_0 = -12.5$ км/с/кпк, получаем оценку периода времени, за который звезды пояса Гюльда совершают один оборот вокруг оси вращения $T = 2\pi/\omega_0 = 500 \times 10^6$ лет. Используя результаты работы Торры и др. (2000) в отношении величины K как калибровочные ($K = -5.1 \pm 1.5$ км/с/кпк в интервале $0.1 < r \leq 2.0$ кпк для возраста $T > 60 \times 10^6$ лет), можем заключить, что звезды группы А имеют средний возраст более 60×10^6 лет.

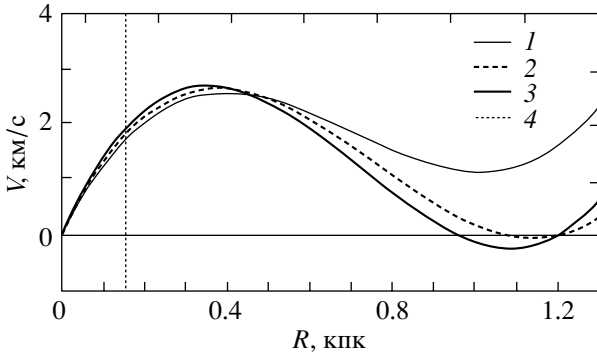


Рис. 4. Кривая вращения близких ОБ-звезд (группа А): 1 — решение при $R_0 = 0.15$ кпк, $l_0 = 160^\circ$, наклоне $i_G = 0^\circ$, учет галактического вращения произведен на основе модели Оорта—Линдблада с постоянными Оорта $A = 13.7 \pm 0.6$ км/с/кпк и $B = -12.9 \pm 0.4$ км/с/кпк; 2 — при $R_0 = 0.15$ кпк, $l_0 = 160^\circ$ и наклоне $i_G = 0^\circ$ (решение (7)); 3 — при $R_0 = 0.15$ кпк и наклоне $i_G = 17^\circ$ (решение (8)) (узел $\Omega_G = 270^\circ$, направление на центр вращения в новой системе галактических координат соответствует $l_0 = 160^\circ$ в стандартной системе координат); 4 — положение Солнца $R_0 = 0.15$ кпк.

Группа В. Рассматриваются близкие ОБ-звезды, принадлежащие главной последовательности, с классами светимости IV и V. Обозначим данные звезды как группа В. К этой группе звезд принадлежат относительно более молодые звезды пояса Гульда. Звезды отобраны при условиях: $1.0 \text{ мсд} < \pi$ ($r < 1$ кпк) и $\varepsilon_\pi/\pi < 1$, которым удовлетворяют 1443 звезды ($\bar{r} = 0.21$ кпк, среднее значение $\varepsilon_\pi/\pi = 0.26$).

Было найдено, что рассматриваемые ОБ-звезды движутся относительно локального центра в направлении $L_{ОВ} = 262 \pm 2^\circ$, $B_{ОВ} = 1 \pm 2^\circ$ со скоростью $V_{ОВ} = 9.0 \pm 0.3$ км/с. На основе описанного выше метода фактически однозначно определяется расстояние $R_0 = 0.3$ кпк, менее уверенно определяется направление $l_0 = 160^\circ$ (интервал от 160° до 140°). Кинематические параметры, полученные при $l_0 = 160^\circ$, $i_G = 0^\circ$ и $R_0 = 0.3$ кпк таковы: $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (2.0 \pm 0.3, -10.0 \pm 0.4, -0.1 \pm 0.3)$ км/с,

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -6.3 \pm 1.5 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +26.7 \pm 7.3 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -65 \pm 18 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -2.5 \pm 0.7 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (9)$$

Постоянные Оорта, вычисленные на основе этих параметров, таковы: $A_G = +4.0 \pm 1.1$ км/с/кпк, $B_G = -2.3 \pm 1.9$ км/с/кпк. В отличие от звезд группы А, для данных звезд имеется отчетливый пик параметров вращения при поиске угла i_G ,

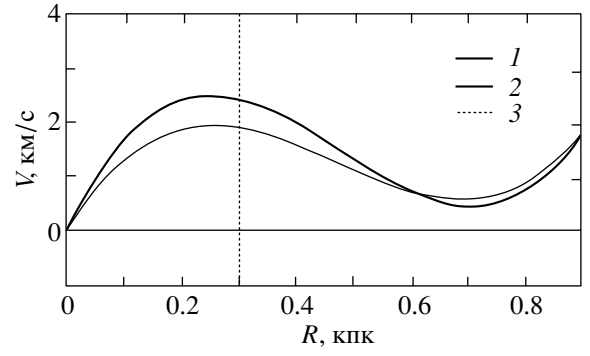


Рис. 5. Кривая вращения близких ОБ-звезд (группа В): 1 — при $R_0 = 0.3$ кпк, $l_0 = 160^\circ$, наклоне $i_G = 0^\circ$; 2 — при $R_0 = 0.3$ кпк и наклоне $i_G = 20^\circ$, направление на центр вращения в новой системе галактических координат соответствует $l_0 = 160^\circ$ в стандартной системе координат; 3 — положение Солнца $R_0 = 0.3$ кпк.

который уверенно определяется и составляет $i_G = 20^\circ$. Кинематические параметры, полученные при $l_0 = 160^\circ$, $i_G = 20^\circ$ и $R_0 = 0.3$ кпк, таковы: $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (2.0 \pm 0.3, -10.0 \pm 0.4, -0.1 \pm 0.3)$ км/с,

$$\begin{aligned} \omega_0 &= -8.1 \pm 1.5 \text{ км/с/кпк}, \\ \omega'_0 &= +35.2 \pm 7.6 \text{ км/с/кпк}^2, \\ \omega''_0 &= -84 \pm 20 \text{ км/с/кпк}^3, \\ K &= -2.0 \pm 0.8 \text{ км/с/кпк}. \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 5 даны две кривые вращения, построенные на основе решений (9) и (10).

Остаточные скорости U, V . На рис. 6 даны средние остаточные скорости ОБ-звезд, U, V в проекции на галактическую плоскость xu для звезд группы А. Скорости U, V вычислены на основе известных формул (Куликовский, 1985) в стандартной системе галактических координат при $l_0 = 0^\circ$. В данном случае скорости звезд освобождены от общего галактического вращения, от пекулярного движения Солнца (относительно апекса Денен, Бинни, 1998) и от найденного общего линейного движения ОБ-звезд. Координаты звезд в окрестности радиусом $r = 850$ пк отнесены к найденному центру вращения, разбиты по секторам через 45° , и в каждом секторе разделены на четыре зоны по расстояниям. В каждой из полученных 32 частей вычислены средние остаточные скорости, которые показаны на рисунке. На каждом из восьми лучей, исходящих из центра вращения, имеется по четыре вектора скорости, каждый из которых можно разложить на тангенциальную и радиальную составляющие. Как можно видеть из рисунка, на каждом из восьми лучей тангенциальная составляющая достаточно хорошо воспроизводит (вращение от оси y к x) найденную нами кривую

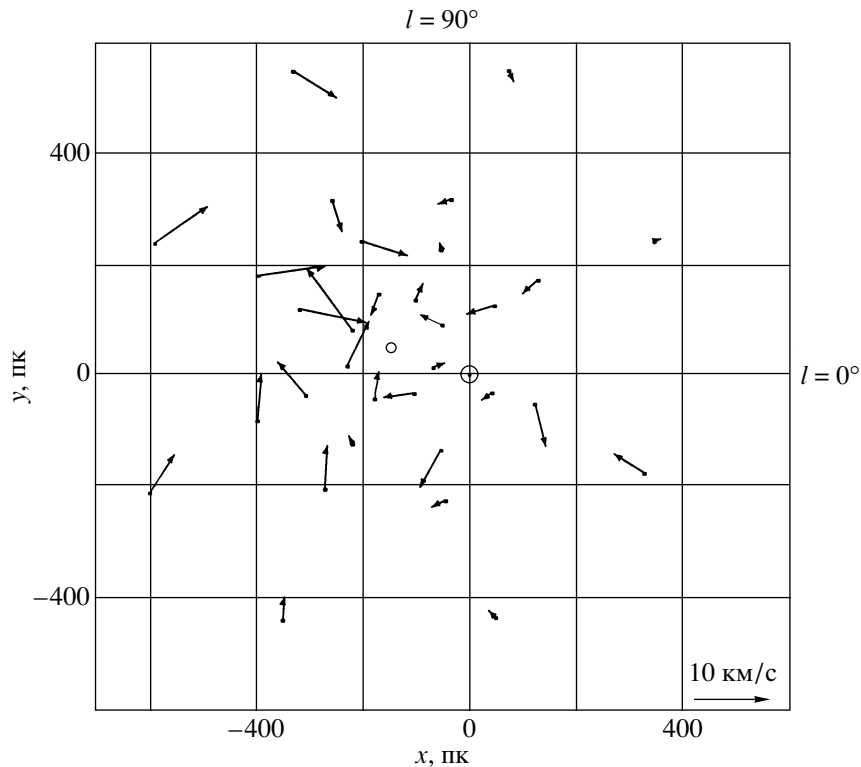


Рис. 6. Средние остаточные скорости U , V близких ОБ-звезд (группа А) в проекции на галактическую плоскость xy . Солнце находится в начале системы координат. Кружком отмечен найденный центр вращения: $l_0 = 160^\circ$, $R_0 = 0.15$ кпк.

вращения (рис. 4). Исключение составляют два луча I квадранта $0 < l < 90^\circ$. Отчетливо видна и радиальная составляющая по направлению к центру (отрицательный K -эффект), величина которой достигает ≈ 4 км/с для удаленных от центра звезд (особенно во II и III квадрантах). На рис. 7 даны средние остаточные скорости ОБ-звезд, U , V в проекции на плоскость xy для звезд группы В. Как можно видеть из рисунка, остаточные скорости данных звезд носят более выраженный локальный характер. А именно, велики скорости в окрестности центра звезд пояса Гюльда с радиусом ≈ 0.3 кпк, на более далеких расстояниях их распределение носит случайный характер.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в данной работе кинематические параметры далеких ОБ-звезд (решение (5)) хорошо согласуются с кинематическими параметрами 59 далеких ($\bar{r} = 1.9$ кпк) ОБ-ассоциаций, найденными в работе Дамбиса и др. (2001): $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (8.2 \pm 1.3, 11.9 \pm 1.1, 9.5 \pm \pm 0.9)$ км/с, $\omega_0 = -29.1 \pm 1.0$ км/с/кпк, $\omega'_0 = +4.57 \pm 0.20$ км/с/кпк² и $\omega''_0 = -1.32 \pm \pm 0.14$ км/с/кпк³, при $R_0 = 7.1$ кпк, а также с результатами работы Мельник и др. (2001):

$(u_\odot, v_\odot) = (7.5 \pm 0.9, 11.2 \pm 1.3)$ км/с, $\omega_0 = -30.2 \pm 0.8$ км/с/кпк, $\omega'_0 = +5.0 \pm 0.2$ км/с/кпк² и $\omega''_0 = -1.5 \pm 0.2$ км/с/кпк³, при $R_0 = 7.1$ кпк, $w_\odot = 7$ км/с, где они определены на основе 132 далеких ОБ-ассоциаций. Полученные нами кинематические параметры далеких ОБ-звезд при $R_0 = 8.5$ кпк (решение (6)) находятся в согласии с параметрами кривой галактического вращения, найденными в работе Заболотских и др. (2002): $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (7.21 \pm 2.10, 12.33 \pm 1.76, 8.24 \pm 1.61)$ км/с, $\omega_0 = -26.61 \pm 1.35$ км/с/кпк, $\omega'_0 = +3.66 \pm 1.35$ км/с/кпк² и $\omega''_0 = -0.73 \pm \pm 0.19$ км/с/кпк³, при $R_0 = 8.5$ кпк, где они получены на основе далеких классических цефеид и рассеянных звездных скоплений (знаки ω_0 здесь изменены для согласования с нашей системой координат). Это позволяет заключить, что учет общего галактического вращения нами произведен достаточно надежно.

Направление на центр вращения звезд пояса Гюльда и расстояние до него, найденные в настоящей работе, $l_0 = 160^\circ$ и $R_0 = 0.15$ кпк (группа А), находятся в согласии с направлением на центр вращения облака нейтрального водорода $l_0 = 131^\circ$ и $R_0 = 0.166$ кпк, полученным Олано (1982), а также с оценками, сделанными для звезд пояса Гюльда в

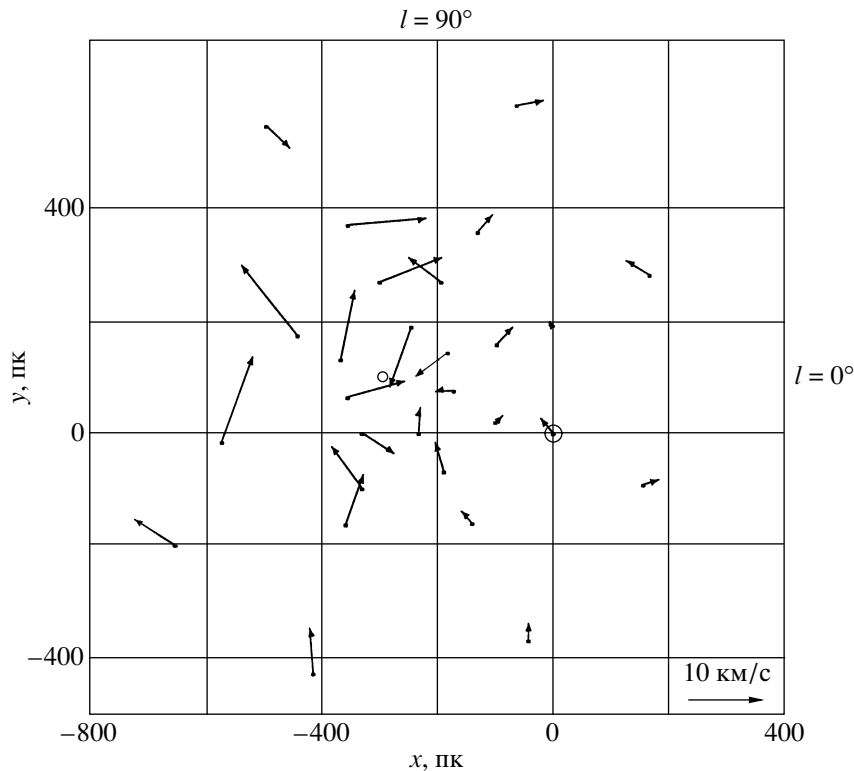


Рис. 7. Средние остаточные скорости U , V близких ОБ-звезд (группа В) в проекции на галактическую плоскость xy . Солнце находится в начале системы координат. Кружком отмечен найденный центр вращения: $l_0 = 160^\circ$, $R_0 = 0.3$ кпк.

работе Комерона, Торры (1991): $l_0 = 146^\circ$ и $R_0 = 0.080$ кпк. Наклон оси вращения близких ОБ-звезд, полученный в данной работе, $i_G = 17^\circ - 20^\circ$, хорошо согласуется с наклоном системы звезд пояса Гульда $i_G = 16^\circ - 20^\circ$, найденным в работе Торры и др. (2000).

Величину $2D_{32}^-$, найденную в работе Миямото, Жу (1998), можно рассматривать как проекцию угловой скорости вращения звезд пояса Гульда на галактическую ось x . При этом важно подчеркнуть, что компонента вектора твердотельного вращения вокруг оси x свободна от влияния общего галактического вращения. Принимая $i_G = 20^\circ$, $\Omega_G = 270^\circ$, будем иметь $|\omega_0| = 2D_{32}^- / \cos 70^\circ = 11.1 \pm 3.2$ км/с/кпк. В этом случае знак “+” при D_{32}^- соответствует вращению звезд пояса Гульда со знаком “-” в используемой нами системе координат. При таком подходе имеется согласие найденной нами величины угловой скорости вращения ω_0 (решения (7) и (9)) с результатами работы Миямото, Жу (1998).

Найденная нами максимальная величина ω_0 (решение (8)) в два раза меньше, чем оценка Линдблада (2000): $\omega_G = B - A_\omega = -24$ км/с/кпк, при этом Линдбладом были использованы значения $A_\omega = 6.4$ км/с/кпк и $B = -17.4$ км/с/кпк.

Указанная разница возникает, во-первых, из-за величины A_G . В нашем случае, как видно из анализа решений (7) и (8), она оказывается малой, $A_G = 2.1$ км/с/кпк, и не дает заметного вклада в величину угловой скорости ω_G . Во-вторых, значение $B = -17.4$ км/с/кпк, найденное в работе Торра и др. (1997), и использованное Линдбладом, не было освобождено от влияния общего галактического вращения. Можем заключить, что оценка Линдблада $\omega_G = -24$ км/с/кпк является завышенной в два раза.

Сравнение кривых вращения показывает, что вклад второй производной ω_0'' (рис. 4) в разложение угловой скорости галактического вращения приводит к разнице линейных скоростей ~ 1 км/с при $R \sim 1$ кпк. Учет галактического вращения, выполненный на основе формул (1)–(3) (решения (7) и (8)), является более корректным в том случае, если величина второй производной является характеристикой именно галактического вращения. Данный вопрос имеет отношение к установлению шкалы расстояний, если она устанавливается на основе анализа ОБ-звезд (Дамбис и др., 2001). Действительно, при наличии собственного вращения ОБ-звезд со знаком “-” найденная по этим звездам угловая скорость галактического вращения окажется

завышенной, что приведет к некоторому сокращению шкалы расстояний.

Сравнение кривых вращения решения (7), (8) и (9), (10) (см. также рис. 4–5) показывает, что учет наклона i_G не приводит к существенной разнице линейных скоростей. Поэтому для приложений, например, для освобождения наблюдаемых движений от собственного вращения близких ОВ-звезд, удобно использовать решение (7), (9) и формулы (1)–(3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определенные на основе далеких ($0.67 < r < 3.0$ кпк) ОВ-звезд параметры общего галактического вращения $\omega_o = -28.0 \pm 0.6$ км/с/кпк, $\omega'_o = +4.17 \pm 0.14$ км/с/кпк², $\omega''_o = -0.81 \pm 0.12$ км/с/кпк³, $K = -3.0 \pm 0.4$ км/с/кпк, ($R_o = 7.1$ кпк), позволяют достаточно надежно получить остаточные скорости близких ОВ-звезд.

Анализ движений близких ОВ-звезд, проведенный с разделением их на две группы по классам светимости, позволяет сделать ряд важных выводов о “кинематической эволюции” водородного облака, из которого образовались все звезды пояса Гюльда. Под “кинематической эволюцией” мы понимаем вращение, эффекты расширения и сжатия и возможную прецессию оси вращения. Во-первых, показано, что общим для всех близких ОВ-звезд является наличие линейного “переносного” движения по отношению к локальному центрону с величиной $V_{ОВ} = 7–9$ км/с в направлении $l \approx 270^\circ$. Это означает, что данные звезды сформировались из единого облака водорода, который заполняет межзвездное околозвездное пространство в радиусе до $r = 1–1.5$ кпк. Во-вторых, общим для всех близких ОВ-звезд является наличие собственного вращения вокруг оси z с угловой скоростью от ≈ -10 км/с/кпк. В-третьих, для подавляющего большинства близких ОВ-звезд имеется отрицательный K -эффект, который означает, что газ, из которого формировались звезды, находился в состоянии сжатия. Можем заключить, что самые молодые и наименее многочисленные звезды пояса Гюльда, с известным положительным K -эффектом (расширение), по-видимому, сформировались $20–30 \times 10^6$ лет назад (Торра и др., 2000) после взрыва водородного облака (Олано, 1982), и их движение отражает мгновенное состояние уже достаточно давно существующего вращающегося облака водорода.

Впервые показано, что для близких ОВ-звезд, которые в основном принадлежат поясу Гюльда, имеется значимая вторая производная в разложении угловой скорости их собственного вращения.

Кинематические параметры собственного дифференциального вращения близких, $\bar{r} = 0.29$ кпк, ОВ-звезд с классами светимости I, II, III найдены следующими: $\omega_o = -12.5 \pm 1.7$ км/с/кпк, $\omega'_o = +27.4 \pm 5.0$ км/с/кпк², $\omega''_o = -29.5 \pm 6.2$ км/с/кпк³, $K = -6.3 \pm 0.6$ км/с/кпк, при найденных в результате моделирования расстоянии до центра вращения $R_o = 0.15$ кпк в направлении $l_o = 160^\circ$ и наклоне вращающегося диска к плоскости Галактики $i_G = 17^\circ$ ($\Omega_G = 270^\circ$).

В отличие от традиционной локализации пояса Гюльда ($r < 500$ пк), основанной на анализе пространственного распределения самых молодых ОВ-звезд (Торра и др., 2000), найденные нами кинематические параметры собственного вращения звезд с классами светимости I, II, III показывают, что вращение имеет место вплоть до расстояний $r \sim 1$ кпк, и это необходимо учитывать при кинематическом анализе далеких ($r > 0.5$ кпк) ОВ-звезд.

Кинематические параметры собственного дифференциального вращения близких, $\bar{r} = 0.21$ кпк, ОВ-звезд главной последовательности таковы: $\omega_o = -8.1 \pm 1.5$ км/с/кпк, $\omega'_o = +35.2 \pm 7.6$ км/с/кпк², $\omega''_o = -84.2 \pm 19.9$ км/с/кпк³, $K = -2.0 \pm 0.8$ км/с/кпк, при найденном в результате моделирования расстоянии до центра вращения $R_o = 0.3$ кпк в направлении $l_o = 160^\circ$ и наклоне вращающегося диска к плоскости Галактики $i_G = 20^\circ$ ($\Omega_G = 270^\circ$). Знак “–” при ω_o означает, что вращение звезд пояса Гюльда происходит в том же направлении, что и вращение Галактики.

В целом заключаем, что систематические составляющие линейных скоростей близких ОВ-звезд зависят от двух эффектов – вращения и сжатия. На расстоянии $r = 0.3$ кпк от центра ($R_o = 0.2–0.3$ кпк в направлении $l = 160^\circ$) определяющим является собственное вращение пояса Гюльда. При этом средняя линейная скорость достигает значения 3 ± 1 км/с и достаточно быстро падает до нуля с увеличением r . Вне границы радиусом $r = 0.3$ кпк (от Солнца) определяющим является эффект сжатия, который, при росте r приводит ко все возрастающей составляющей в скоростях звезд, и уже на границе $r = 0.5$ кпк, например, для относительно старых ОВ-звезд, средняя линейная скорость достигает значения величины -3 ± 0.3 км/с.

Автор выражает признательность рецензентам за полезные замечания. Автор благодарен В.В. Витязеву, Е.В. Хруцкой и А.Т. Байковой за помощь и полезные обсуждения результатов работы. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 02-02-16570).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барбье-Бросса, Фигон (M. Barbier-Brossat and P. Figon), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **142**, 217 (2000).
2. Бобылев В.В., Изв. ГАО Пулково **216**, 57 (2002).
3. Дамбис А.К., Мельник А.М., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 68 (2001).
4. Денен, Бинни (W. Dehnen and J.J. Binney), *MNRAS* **298**, 387 (1998).
5. Заболотских М.В., Расторгуев А.С., Дамбис А.К., Письма в Астрон. журн. **28**, 516 (2002).
6. Керр, Линден-Белл (F.J. Kerr and D. Lynden-Bell), *MNRAS* **221**, 1023 (1986).
7. Комерон (F. Comerón), *Astron. Astrophys.* **351**, 506 (1999).
8. Комерон, Торра (F. Comerón and J. Torra), *Astron. Astrophys.* **241**, 57 (1991).
9. Куликовский П.Г., *Звездная астрономия* (М.: Наука, 1985).
10. Линдبلاد (P.O. Lindblad), *Astron. Astrophys.* **363**, 154 (2000).
11. Линдبلاد и др. (P.O. Lindblad, J. Palouš, K. Lodén, et al.), *HIPPARCOS Venice'97* (Ed. B. Battrock, Noordwijk: ESA Publ. Div., 1997), p. 507.
12. Мельник А.М., Дамбис А.К., Расторгуев А.С., Письма в Астрон. журн. **27**, 611 (2001).
13. Миямото, Жу (M. Miyamoto and Z. Zhu), *Astrophys. J.* **115**, 1483 (1998).
14. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965).
15. Олано (C.A. Olano), *Astron. Astrophys.* **112**, 195 (1982).
16. Палоуш (J. Palouš), *Reference System and Frames in the Space Era: Present and Future Astrometric Programmes* (Ed. J. Vondrák, N. Capitane, Prague, 1997), p. 157.
17. Торра и др. (J. Torra, A.E. Gómez, F. Figueras, et al.), *HIPPARCOS Venice'97* (Ed. B. Battrock, Noordwijk: ESA Publ. Div., 1997), p. 513.
18. Торра и др. (J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras), *Astron. Astrophys.* **359**, 82 (2000).
19. Фист, Уайтлок (M.W. Feast and P.A. Whitelock), *MNRAS* **291**, 683 (1997).
20. Фист и др. (M.W. Feast, F. Pont, and P.A. Whitelock), *MNRAS* **298**, L43 (1998).
21. Хансон (R.B. Hanson), *Astrophys. J.* **94**, 409 (1987).
22. ESA, *The Hipparcos and Tycho Catalogue*, ESA SP-1200 (1997).