

УДК 524.62+524.66

БАЗА ДАННЫХ OSACA И КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗВЕЗД ОКОЛОСОЛНЕЧНОЙ ОКРЕСТНОСТИ

© 2006 г. В. В. Бобылев, Г. А. Гончаров, А. Т. Байкова

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория, С.-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 22.11.2005 г.; принята в печать 14.04.2006 г.

Лучевые скорости, собранные более чем из 1400 литературных источников, включая Женевско-Копенгагенский обзор окрестностей Солнца (CORAVEL–CfA), переведены на единую систему лучевых скоростей 854 стандартных звезд из сформированного авторами списка. Это позволило вычислить средневзвешенные лучевые скорости с медианной точностью ± 1 км/с для более чем 25 тыс. звезд каталога HIPPARCOS, расположенных в пределах местного галактического спирального рукава (рукава Ориона). Вычисленные лучевые скорости, совместно с координатами, параллаксами и собственными движениями, использованы для определения галактических координат и пространственных скоростей этих звезд. Вместе с другими характеристиками эти величины представлены в виде постоянно обновляемой базы данных и каталога Orion Spiral Arm Catalogue (OSACA). На основе модели Огородникова–Милна проведен кинематический анализ звезд по данным каталога OSACA. Показано наличие существенных различий в кинематике одиночных и кратных ближайших звезд главной последовательности. Использование далеких ($\bar{r} \approx 0.2$ кпк) звезд смешанного спектрального состава позволило оценить угловую скорость галактического вращения $\omega_o = -25.7 \pm 1.2$ км/с кпк, при этом отклонение вертекса найдено равным $l = 13^\circ \pm 2^\circ$, а также обнаружить отрицательный K -эффект. Показано, что отрицательный K -эффект наиболее сильно проявляется в движении гигантов спектральных классов A0–A5 и составляет $K = -13.1 \pm 2.0$ км/с кпк.

PACS numbers : 98.35.Df, 98.35.Pr, 97.10.Wn

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы лучевые скорости десятков тысяч звезд определены с высокой точностью — лучше ± 1 км/с, поэтому большое значение приобретает совместное использование собственных движений и лучевых скоростей звезд для исследования звездной кинематики. Значительная часть высокоточных лучевых скоростей получена с использованием фотоэлектрических кросс-корреляционных спектрометров CORAVEL и цифровых спектрометров Харвард-Смитсоновского центра астрофизики (CfA) и представлена в работе [1] (далее — каталог CORAVEL–CfA). В этой работе, а также в работе [2] показано, что совместное использование собственных движений и лучевых скоростей звезд, оценки межзвездного поглощения, многополосной фотометрии и параметров двойственности позволяет делать выводы об абсолютной величине, возрасте, массе, галактических орбитах звезд, эволюции галактических структур на протяжении миллионов лет, выполнять другие звездно-кинематические исследования. С целью систематического сбора, анализа и переработки соответствующего материала нами сформирована и постоянно обновляется база

данных для звезд с известными координатами, параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями.

Хотя число, взаимное расположение и плотность спиральных рукавов в окрестностях Солнца требует отдельного исследования, абсолютно яркие звезды, являющиеся индикаторами галактических спиральных рукавов, представленные в каталоге HIPPARCOS, позволяют достаточно уверенно судить о расположении и размерах местного спирального рукава. Действительно, в полосе Млечного пути каталог HIPPARCOS полон примерно до 7.3^m , т.е. для звезд с абсолютной величиной $M < -2^m$ до 600 пк, если учесть, что поглощение здесь, как правило, меньше 0.5^m . При этом почти полно представлены звезды с абсолютной величиной $M < -4^m$, относящиеся к соседним спиральным рукавам. Распределение абсолютно ярких звезд по галактическим октантам и расстоянию от Солнца, представленное в табл. 1, позволяет сделать вывод, во-первых, о достаточно равномерном распределении близких абсолютно ярких звезд вдоль галактической долготы, во-вторых, о неравномерном распределении этих звезд вдоль галактической долготы на более далеких расстояниях

Таблица 1. Распределение абсолютно ярких звезд в процентах по галактическим октантам и расстоянию от Солнца

Октант	$r < 400$ пк $M_V < -2$	$r < 500$ пк $M_V < -2$	$400 \text{ пк} < r < 700$ пк $M_V < -2$	$r > 800$ пк $M_V < -4$
0°–45°	11.1	9.9	9.3	10.5
45–90	11.0	12.8	17.7	14.1
90–135	12.5	14.2	17.4	19.7
135–180	11.4	10.9	10.8	11.2
180–225	13.1	13.7	13.0	12.3
225–270	11.4	13.6	14.8	8.9
270–315	12.5	11.5	9.5	15.1
315–360	17.0	13.3	7.5	8.2
Общее число звезд	534	815	817	813

и, в-третьих, о скачкообразном изменении распределения на расстоянии более 700 пк от Солнца. Итак, ближе 400 пк выделяется только ассоциация Скорпиона–Стрельца на галактической долготе около 340°. На расстояниях от 400 до 700 пк абсолютно яркие звезды, в основном, концентрируются около долготы 90° и 225°, видимо, показывая направления, в которых протянулся местный спиральный рукав, а также ширину рукава — около ± 500 пк в направлении центра и антицентра Галактики. Дальше 800 пк преимущественные долготы меняются: повышенная концентрация абсолютно ярких звезд около 110° соответствует известному рукаву Персея, а около 290° — рукаву Стрельца. Таким образом, область в радиусе 500 пк от Солнца можно назвать окружающим нас отрезком местного спирального рукава Ориона.

В настоящее время лучевые скорости известны, а параллаксы относительно точны, в основном, именно для звезд в радиусе 500 пк от Солнца, т.е. в пределах местного спирального рукава Галактики — рукава Ориона. Поэтому каталог, формируемый на основе нашей базы данных, назван Каталогом спирального рукава Ориона (Orion Spiral Arm Catalogue — OSACA; <http://www.geocities.com/orionspiral/>). При этом база данных с множеством таблиц, связей, запросов является своеобразной “фабрикой”, а распространяемым конечным продуктом, периодически вычисляемым по базе данных, является каталог OSACA, состоящий из нескольких таблиц.

Целью данной статьи является описание каталога и рассмотрение наиболее интересных примеров его использования для изучения кинематики звезд околосолнечной окрестности. В качестве одного из примеров проведен анализ влияния на

кинематические параметры использованной модели двойственности ближайших звезд. В качестве другого примера мы рассмотрели относительно далекие звезды спектральных классов A0–A5, обнаруживающих отрицательный K -эффект. Кинематический анализ проведен на основе модели Огородникова–Милна. Для анализа остаточных скоростей звезд применен метод определения эллипсоида Шварцшильда, а также построены двумерные распределения на UV -плоскости.

2. СОСТАВ И ФОРМАТ КАТАЛОГА OSACA

Основой каталога OSACA являются шесть величин, описывающих положение и скорость звезды в пространстве: α , δ , π , μ_α , μ_δ , V_r . По ним вычисляются координаты X , Y , Z и пространственные скорости U , V , W [3] в стандартной галактической прямоугольной системе координат, где X растет в направлении центра Галактики, Y — в направлении ее вращения, Z — в направлении северного полюса Галактики. База данных OSACA постоянно пополняется новыми данными из литературы. Вслед за существенным изменением исходных данных пересчитываются зависимости от них величины, например, после уточнения лучевых скоростей заново вычисляются компоненты скорости U , V , W .

Положение и скорость достаточно точно известны лишь для звезд каталога HIPPARCOS [4], поэтому в каталоге OSACA пока рассматриваются только эти звезды, хотя в базе данных нами накапливаются данные и для других звезд. Собственные движения рассматриваемых звезд из каталога HIPPARCOS имеют медианную точность $\pm 0.0007''/\text{год}$ и $\pm 0.0006''/\text{год}$ по прямому восхождению и склонению, соответственно, и $\pm 0.0009''/\text{год}$ — для тангенциальной скорости.

Таблица 2. Формат текущей версии каталога OSACA

Номер по каталогу HIPPARCOS	I6
Прямое восхождение в град с долями	F11.6
Склонение в град с долями	F11.6
Параллакс в мсек. дуги	F7.2
Точность параллакса в мсек. дуги	F7.2
Относительная точность параллакса	F6.2
Десятичный логарифм параллакса, данного в мсек. дуги	F6.2
Собственное движение по прямому восхождению в 0.001"/год	F9.1
Точность собственного движения по прямому восхождению в 0.001"/год	F6.1
Собственное движение по склонению в 0.001"/год	F9.1
Точность собственного движения по склонению в 0.001"/год	F6.1
Лучевая скорость в км/с	F7.1
Точность лучевой скорости в км/с	F4.1
Звездная величина V в системе Джонсона (из HIPPARCOS)	F6.2
Звездная величина B в системе Джонсона (из HIPPARCOS)	F6.2
Звездная величина I в системе Джонсона (из HIPPARCOS)	F6.2
Показатель цвета $B-V$ в системе Джонсона (из HIPPARCOS)	F7.3
Показатель цвета $V-I$ в системе Джонсона (из HIPPARCOS)	F6.2
Межзвездное поглощение A_v [6]	F5.2
Абсолютная звездная величина M_V	F6.1
Параметр двойственности: 1 — одиночная звезда, 2 — неодионочная звезда	A1
Спектральный класс, включая класс светимости (из НИС [7])	A13
Галактическая долгота в град с долями	F11.6
Галактическая широта в град с долями	F11.6
Собственное движение по галактической долготе в 0.001"/год	F8.1
Собственное движение по галактической широте в 0.001"/год	F8.1
Полная пространственная скорость в км/с	F7.1
Компонент скорости U в галактической системе координат в км/с	F8.1
Компонент скорости V в галактической системе координат в км/с	F8.1
Компонент скорости W в галактической системе координат в км/с	F8.1
Координата X в галактической системе координат в пк	F8.1
Координата Y в галактической системе координат в пк	F8.1
Координата Z в галактической системе координат в пк	F8.1

Собственные движения некоторых рассматриваемых звезд имеют низкую точность из-за двойственности. Для уточнения этих индивидуальных собственных движений мы использовали комбинацию координат и собственных движений

из каталога HIPPARCOS и наземных каталогов по методу Гончарова и Кияевой [5]. Параллаксы, экваториальные координаты и собственные движения рассматриваемых звезд уточняются сравнительно редко — лишь в случае появления новых данных,

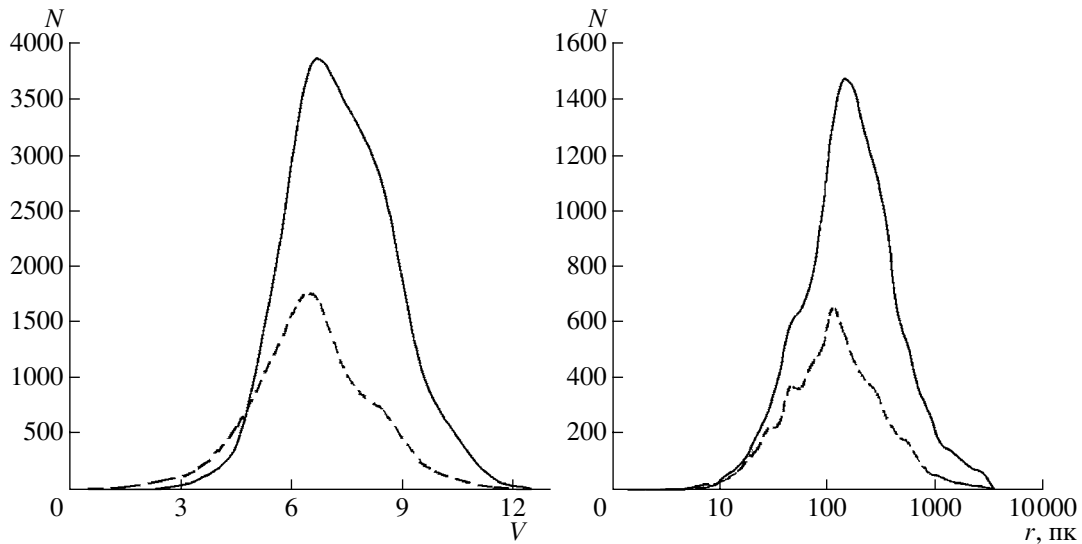


Рис. 1. Распределение звезд OSACA по видимой звездной величине и расстоянию от Солнца: сплошная кривая — одиночные звезды, штриховая кривая — кратные звезды.

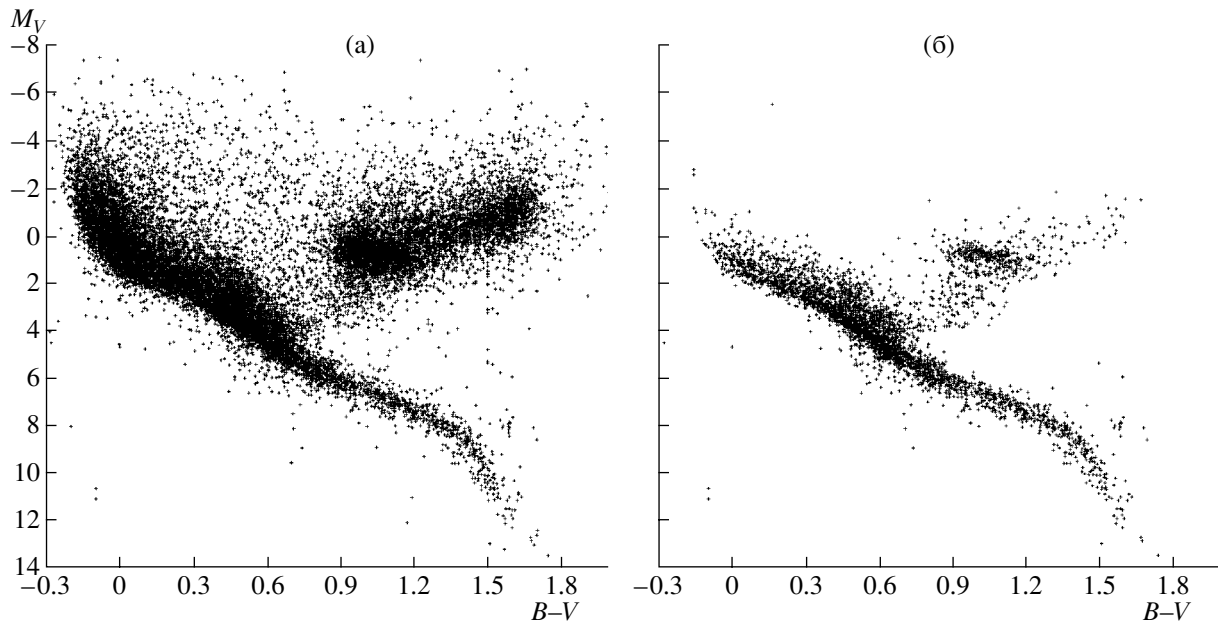


Рис. 2. Распределение звезд OSACA на диаграмме “показатель цвета ($B-V$) — абсолютная звездная величина M_V ”: (а) — все звезды, (б) — одиночные звезды ближе 0.1 кпк.

превосходящих по точности данные HIPPARCOS. Таким образом, основные собираемые и уточняемые данные — лучевые скорости звезд.

В настоящее время каталог имеет следующий состав: основная таблица, таблица ссылок на публикации лучевых скоростей (по одной строке на каждую звезду), таблица ссылок на публикации лучевых скоростей (по одной строке на каждую публикацию), таблица перекрестной идентификации звезд. Формат основной таблицы текущей вер-

сии каталога представлен в табл. 2. Распределение рассматриваемых звезд по видимой звездной величине и расстоянию от Солнечной системы показано на рис. 1: сплошной кривой — для одиночных звезд и штриховой — для кратных. Распределение рассматриваемых звезд на диаграмме “абсолютная звездная величина — показатель цвета $B-V$ ” (рис. 2) напоминает распределение всех звезд каталога HIPPARCOS — представлены все спектральные классы и классы светимости.

3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Каталог WEB [8] содержит около 14 300 звезд HIPPARCOS, имеющих высокоточные параллаксы, лучевые скорости которых известны с точностью лучше ± 5 км/с. Каталог Барбье-Бросса и Фигона [9] содержит около 16 000 таких звезд. В нашем каталоге таких звезд более 28 000, что отражает, во-первых, появление большого числа высокоточных измерений лучевых скоростей в последние годы, в том числе, для более 10 000 звезд — в каталоге CORAVEL—CfA, а во-вторых, выполненное нами приведение всех использованных каталогов лучевых скоростей на единую систему.

Для вычисления средневзвешенных лучевых скоростей нами использованы данные из более чем 1400 публикаций, полный список которых можно найти на интернет-странице OSACA (<http://www.geocities.com/orionspiral/>). Примеры использованных нами крупных публикаций-каталогов — это работы [10–21] и все источники, использованные при составлении каталогов [8, 9, 22]. Все использованные источники лучевых скоростей можно разделить на две части: (1) сотню крупных исходных каталогов, каждый из которых, как правило, имеет собственную систему лучевых скоростей, и (2) более тысячи публикаций по отдельным звездам и небольшим группам звезд. Если в первом случае систематические ошибки конкретного каталога могут быть выявлены из сравнения с неким стандартом или другим каталогом, то во втором случае такое сравнение невозможно из-за малого числа звезд. В этом случае, если отдельные наблюдения звезд выполнены на том же инструменте, что и некий крупный каталог, можно надеяться, что система в этих наблюдениях одна и та же, и для отдельной звезды можно использовать систематические поправки, приписанные данному инструменту.

Проблема стандартов лучевых скоростей имеет длительную историю, и она обострилась в последние годы (см., например, [23–27]). К настоящему моменту лишь для 181 звезды, утвержденной Международным астрономическим союзом (МАС) как стандарт при определении лучевых скоростей, подтверждено постоянство лучевых скоростей. Нумерация этих звезд по каталогам HD и HIPPARCOS, лучевые скорости, звездные величины V и абсолютные величины, показатель цвета $B-V$ даны в таблице, размещенной на интернет-странице OSACA, при этом в колонке “источник” указано “IAU”.

Однако сама необходимость использования неких звезд в качестве стандартов лучевых скоростей в последние годы поставлена под сомнение в связи с появлением астрометрических методов измерения лучевых скоростей [16] и принципиальной

возможностью калибровки системы инструмента путем наблюдения лучевых скоростей тел Солнечной системы.

В работе [27] (далее — каталог Кека) показано, что: (1) использование стандартных звезд и тел Солнечной системы дает практически одинаковые лучевые скорости на уровне точности не хуже ± 0.5 км/с, (2) возможно создание списка сотен стандартных звезд для определения лучевых скоростей с точностью не хуже ± 0.5 км/с, в котором приемлемым образом представлено все разнообразие спектральных классов, классов светимости и других характеристик звезд, (3) для получения абсолютных лучевых скоростей с точностью лучше ± 0.5 км/с необходимо учитывать множество эффектов, которые пока не полностью обоснованы теоретически (не говоря о практическом учете!).

Исследования кинематики звезд нуждаются не столько в лучевых скоростях исключительной точности, сколько в однородном массиве лучевых скоростей для большого числа разнообразных звезд. При этом точность ± 1 км/с можно считать приемлемой. Скорости 1 км/с соответствует 1 пк/млн. лет. Этот уровень точности позволяет вычислять галактические орбиты и рассматривать эволюцию галактических структур и групп звезд в радиусе 500 пк от Солнца на протяжении десятков миллионов лет в прошлом и будущем. Кроме того, точность лучевой скорости ± 1 км/с в большом объеме пространства сопоставима с медианной точностью используемых нами тангенциальных скоростей звезд, вычисленных по собственным движениям, а именно, $\pm 0.001''/\text{год}$ — в радиусе 200 пк от Солнца тангенциальная скорость в среднем известна точнее, чем радиальная (примерно для $2/3$ рассматриваемых звезд), а для более далеких звезд наоборот (примерно для $1/3$ звезд).

В каталоге Кека приведен список 782 звезд, предлагаемых в качестве стандартных при определении лучевых скоростей. Эти звезды имеют достаточно стабильные относительные лучевые скорости; они представляют разные классы звезд; для стандартных звезд МАС лучевые скорости в каталоге Кека систематически совпадают со стандартными на уровне точности не хуже ± 0.5 км/с. Хотя для некоторых из этих звезд после выхода каталога Кека обнаружены колебания лучевой скорости, подавляющее большинство из них можно принять в качестве дополнительного стандарта при определении лучевых скоростей на уровне точности $\pm(0.5-1)$ км/с. Характеристики 673 таких звезд даны в таблице, размещенной на интернет-странице OSACA, при этом в колонке “источник” указано “Keck”.

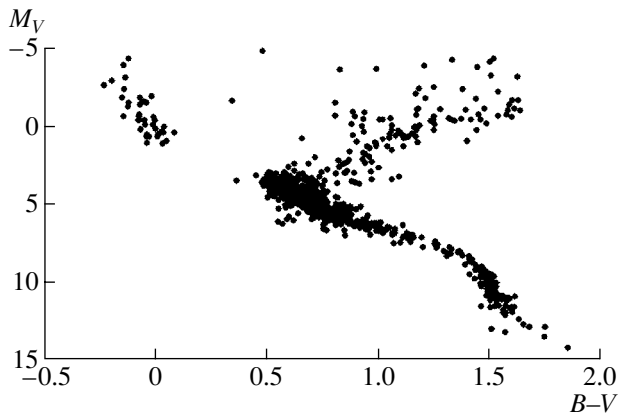


Рис. 3. Диаграмма “показатель цвета ($B-V$) — абсолютная звездная величина M_V ” для звезд стандарта “IAU—Keck”.

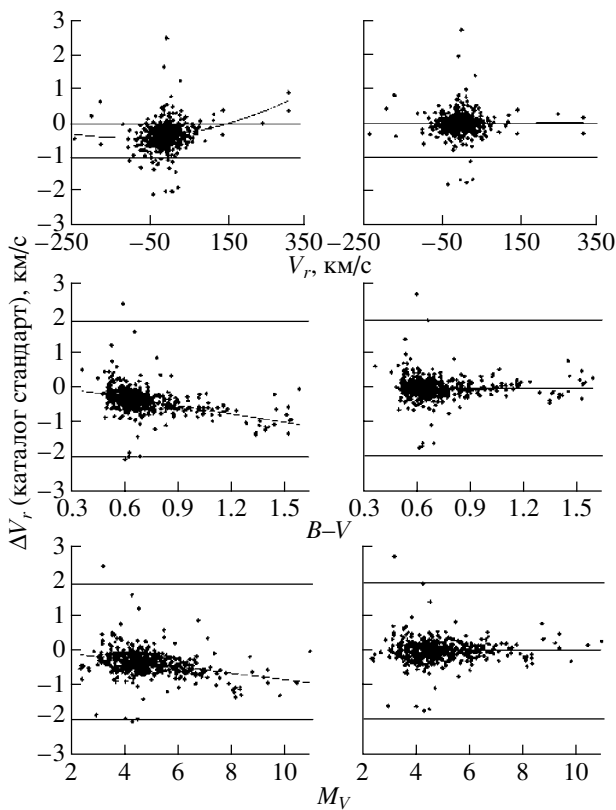


Рис. 4. Разности лучевых скоростей вида “CORAVEL—CfA минус стандарт” для 484 общих звезд в зависимости от различных параметров до (левые графики) и после (правые графики) учета систематических эффектов.

Полный список 854 стандартных звезд, использованных нами для перевода более 50 тыс. исходных лучевых скоростей на единую стандартную систему, обозначенную далее как “IAU—Keck”, не включает некоторые звезды исходных списков

MAC и Кека, показавшие в последние годы заметные колебания лучевой скорости. Распределение этих звезд на диаграмме “показатель цвета ($B-V$) — абсолютная звездная величина M_V ” приведено на рис. 3: как видно, не представлены или сравнительно редки белые карлики, субкарлики, субгиганты и главная последовательность от A5 до F5.

При переводе исходного каталога лучевых скоростей на стандартную систему для общих звезд вычисляются разности лучевых скоростей вида “каталог минус стандарт”, затем выявляются и аппроксимируются систематические зависимости этих разностей от различных параметров звезд, в итоге найденные систематические зависимости исключаются для всех звезд.

В качестве примера рассмотрим выявленные нами систематические ошибки каталога CORAVEL—CfA. На рис. 4 показаны зависимости разностей лучевых скоростей вида “CORAVEL—CfA минус стандарт” для 484 общих звезд в зависимости от значения лучевой скорости, показателя $B-V$ и абсолютной звездной величины (найжены также зависимости от эффективной температуры, индекса H_β и металличности Fe/H). На левых графиках приведены данные до исключения, а на правых — после исключения следующих обнаруженных зависимостей:

$$\Delta V_r = -0.8398(B-V) + 0.2531,$$

$$\Delta V_r = 0.000008V_r^2 + 0.0012V_r - 0.0142,$$

где ΔV_r — разность лучевых скоростей общих звезд вида “CORAVEL—CfA минус стандарт”, ($B-V$) — показатель цвета, V_r — лучевая скорость. Видно, что при исключении зависимостей от лучевой скорости и показателя цвета $B-V$ исчезла и зависимость от абсолютной звездной величины (как и от остальных параметров), новые зависимости при этом не появились, а стандартное отклонение разностей лучевых скоростей вида “CORAVEL—CfA минус стандарт” для общих звезд уменьшилось с 0.38 до 0.33 км/с. Эту величину можно считать примерной оценкой систематической точности каталога CORAVEL—CfA.

Та же процедура применена для перевода других каталогов на единую стандартную систему “IAU—Keck”. Для них, как и для каталога CORAVEL—CfA, наиболее распространены систематические зависимости от лучевой скорости и показателя $B-V$. Именно зависимости от этих двух параметров традиционно обнаруживаются в наблюдениях лучевых скоростей (см., например, [27]).

После перевода всех лучевых скоростей на единую систему для каждой звезды вычисляется

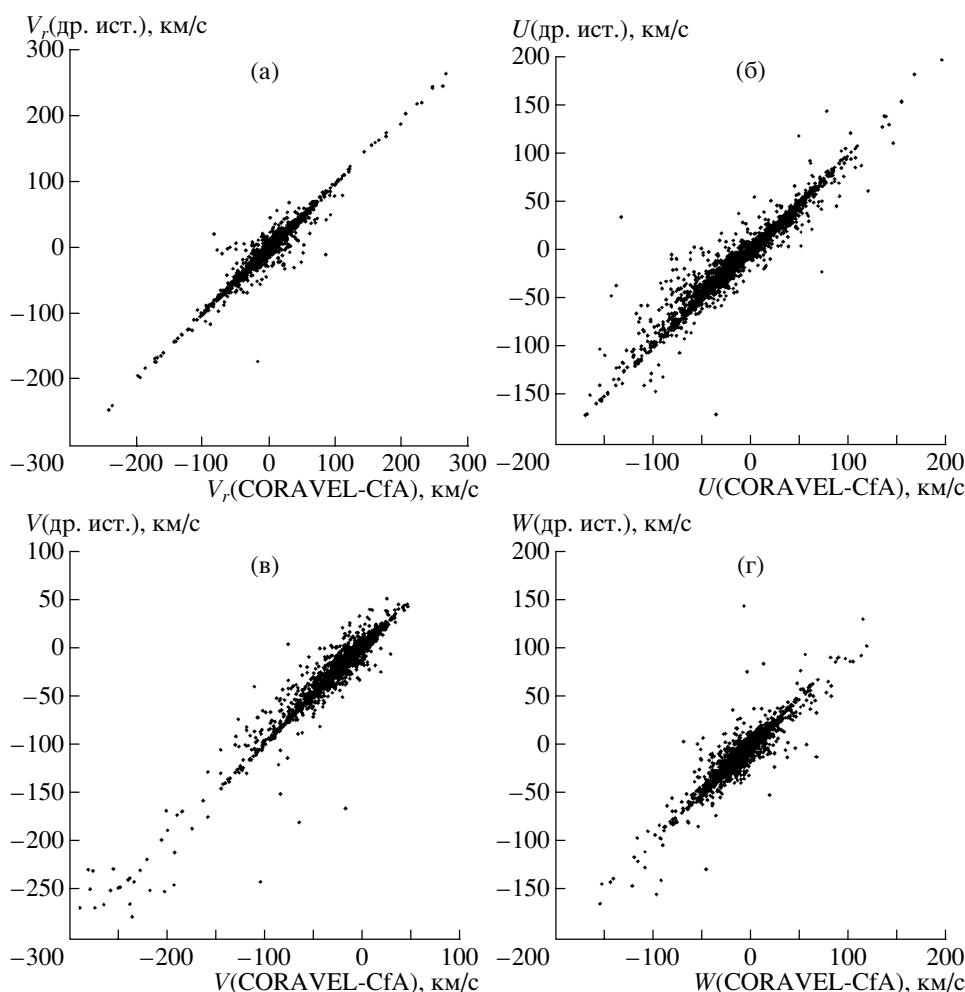


Рис. 5. Сравнение скоростей из каталога CORAVEL–CfA со скоростями, вычисленными по другим источникам лучевых скоростей (3400 общих звезд): (а) — лучевая скорость, (б) — компонент скорости U , (в) — компонент скорости V , (г) — компонент скорости W .

средневзвешенная лучевая скорость. При этом веса исходных каталогов назначаются в соответствии со стандартным отклонением разностей лучевых скоростей вида “каталог минус стандарт” для общих звезд каталога и стандарта. Одиночным наблюдениям приписывается тот же вес, что и каталогам, полученным на соответствующем инструменте.

Лучевые скорости из каталога CORAVEL–CfA, приведенные на стандартную систему “IAU–Keck”, имеют столь высокую точность по сравнению со многими другими источниками, и каталогу CORAVEL–CfA назначен столь высокий вес, что в итоге средневзвешенные лучевые скорости этих звезд практически не отличаются от соответствующих лучевых скоростей CORAVEL–CfA после исправления систематических ошибок.

Однако к некоторым данным каталога CORAVEL–CfA стоит относиться с осторожностью. На рис. 5 лучевые скорости и компоненты

пространственной скорости U , V , W из каталога CORAVEL–CfA сравниваются с соответствующими величинами, вычисленными нами по другим источникам лучевых скоростей для 3400 общих звезд (при этом все лучевые скорости переведены на единую систему и использованы одни и те же собственные движения из HIPPARCOS/Tycho-2). Заметна сильная корреляция всех величин. При этом различие лучевых скоростей преимущественно вызвано случайными ошибками менее точных, чем CORAVEL–CfA, каталогов. Однако для довольно большого числа звезд заметно расхождение величин U , V , W из CORAVEL–CfA и вычисленных нами. Причина этого расхождения кроется в используемых расстояниях: нами использованы расстояния на основе тригонометрических параллаксов HIPPARCOS, а в каталоге CORAVEL–CfA, если тригонометрический параллакс звезды из HIPPARCOS известен с точностью хуже 13%, для вычисления расстояния до звезд

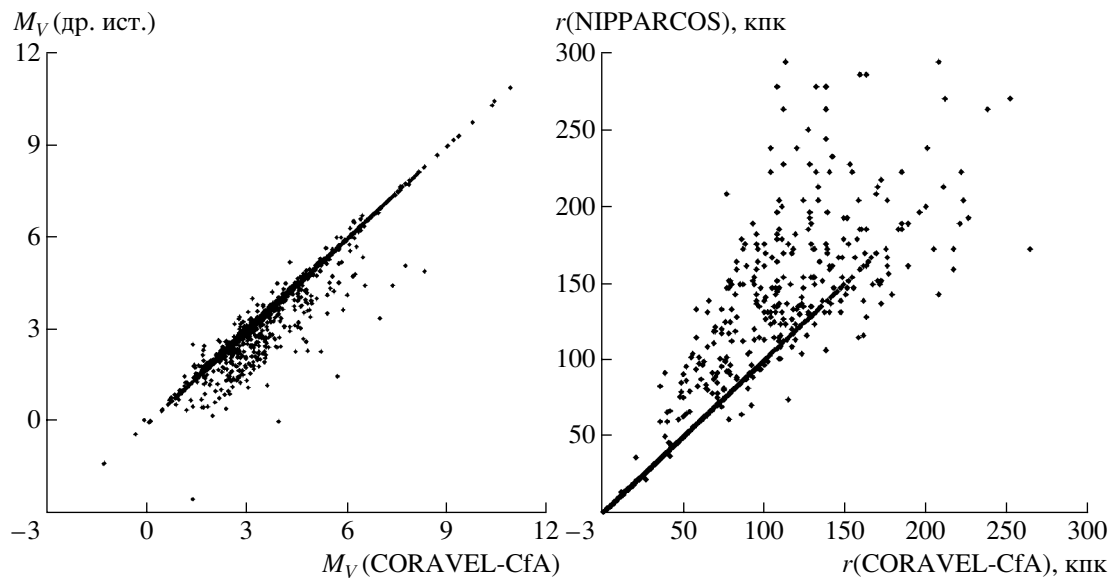


Рис. 6. Слева — сравнение абсолютных звездных величин из каталога CORAVEL—CfA с абсолютными звездными величинами, вычисленными по параллаксам каталога HIPPARCOS с учетом межзвездного поглощения (3400 общих звезд). Разница вызвана различием в учете поглощения и использованием неточных фотометрических параллаксов в каталоге CORAVEL—CfA. Справа — расстояния до звезд из каталога CORAVEL—CfA в сравнении с расстояниями из каталога HIPPARCOS.

ды и соответствующего коэффициента перевода собственного движения из угловой меры в линейную использован фотометрический параллакс. Как признают сами авторы каталога CORAVEL—CfA, эти фотометрические расстояния не применимы для двойных звезд, гигантов и некоторых других категорий звезд. Нами обнаружено, что большинство звезд с заметным различием U , V , W по каталогу CORAVEL—CfA и нашим данным действительно относится к таким “проблемным” звездам, и для них фотометрический параллакс в каталоге CORAVEL—CfA систематически больше тригонометрического (а расстояние систематически меньше). Как видно на рис. 6, этот же эффект проявляется для тех же “проблемных” звезд при сравнении расстояний по параллаксам HIPPARCOS и CORAVEL—CfA и в заметной разнице абсолютных звездных величин, вычисленных нами и взятых из каталога CORAVEL—CfA (при этом расхождение в межзвездном поглощении, вычисленном разными способами, незначительно, так как это довольно близкие звезды, и поглощение в среднем не превосходит 0.1^m).

Так как среди рассматриваемых звезд более 7000 являются известными и предполагаемыми кратными звездными системами, включая более 800 известных и 4500 предполагаемых спектрально-двойных, одной из проблем при вычислении средневзвешенных лучевых скоростей оказались имеющиеся во многих публикациях ошибки идентификации компонентов кратных

звездных систем. Другими словами, авторы часто неправильно указывают компонент, лучевая скорость которого измерена, или вообще не указывают, к какому компоненту относится измерение. В заметной степени эти ошибки вызваны тем, что до недавнего времени номенклатура кратных звездно-планетных систем не была стандартизирована, т.е. в разных каталогах один и тот же компонент был обозначен по-разному. Нами внесено множество исправлений такого рода.

Во всех случаях, когда гравитационная связанность компонентов звездной системы не вызывает сомнений (расстояние между компонентами менее 20 000 а.е.), нами вычислена и далее рассматривается только системная лучевая скорость. Для гравитационно-широких звездных пар (расстояние между компонентами более 20 000 а.е.) в каталоге OSACA приведены все компоненты с измеренными лучевыми скоростями.

Для подавляющего большинства звезд базы данных OSACA имеются оценки случайных ошибок определения лучевых скоростей звезд. Это позволяет оценить случайные ошибки наблюдаемых пространственных скоростей. Например, 26 492 звезд удовлетворяют следующим критериям:

$$e_{\pi}/\pi < 0.3, \quad (1)$$

$$e_V < 15 \text{ км/с}, \quad (2)$$

$$V_{pec} < 100 \text{ км/с}. \quad (3)$$

Здесь e_π/π — относительная ошибка параллакса; $e_V = \sqrt{e_{V_r}^2 + e_{V_l}^2 + e_{V_b}^2}$ — ошибка наблюдаемого вектора скорости $V = (V_r, V_l, V_b)$, где V_r — радиальный компонент скорости, $V_l = 4.74\mu_l \cos br$ — компонент скорости вдоль галактической долготы и $V_b = 4.74\mu_b r$ — компонент скорости вдоль галактической широты; $V_{pec} = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2}$ — остаточная (пекулярная) скорость звезды относительно местного стандарта покоя. Оценка ошибок компонентов V_l и V_b выполнена нами с учетом ошибок параллаксов, но без учета корреляций между компонентами $\mu_l \cos b$ и μ_b , по формуле

$$e_{(V_l, V_b)} = \frac{4.74}{\pi} \sqrt{\mu_{l,b}^2 \left(\frac{e_\pi}{\pi}\right)^2 + e_{\mu_{l,b}}^2},$$

где $\mu_{l,b}$ — компоненты тангенциальных скоростей. Скорость Солнца относительно местного стандарта покоя мы принимаем равной $(u_\odot, v_\odot, w_\odot) = (10.0, 5.3, 7.2)$ км/с в соответствии с работой [28]. Средние значения случайных ошибок скоростей составили $\bar{e}_{V_r} = 2.7$ км/с, $\bar{e}_{V_l} = 2.3$ км/с, $\bar{e}_{V_b} = 1.7$ км/с.

4. МЕТОДЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В данной работе кинематический анализ звезд по данным каталога OSACA основывается на модели Огородникова—Милна. Анализ остаточных скоростей проводится классическим методом определения эллипсоида Шварцшильда, а также с использованием двумерных распределений UV-скоростей.

4.1. Модель Огородникова—Милна

В линейной модели Огородникова—Милна мы придерживаемся обозначений, введенных Ключом [29, 30]. Наблюдаемая скорость звезды $\mathbf{V}(r)$, имеющая гелиоцентрический радиус-вектор \mathbf{r} , с точностью до членов первого порядка малости $r/R_\odot \ll 1$ описывается следующим уравнением в векторной форме:

$$\mathbf{V}(r) = \mathbf{u}_\odot + M\mathbf{r} + \mathbf{V}',$$

где \mathbf{u}_\odot — скорость центра звезд относительно Солнца ($-V_\odot(u_\odot, v_\odot, w_\odot)$), \mathbf{V}' — остаточная скорость звезды (здесь предполагается, что остаточные скорости звезд имеют случайное распределение), M — матрица (тензор) смещений, компонентами которой являются частные производные $\mathbf{u}(u_1, u_2, u_3)$ по $\mathbf{r}(r_1, r_2, r_3)$:

$$M_{pq} = \left(\frac{\partial u_p}{\partial r_q}\right)_\odot, \quad p, q = 1, 2, 3.$$

Матрица M может быть разделена на тензор локальной деформации M^+ и тензор локального вращения M^- [31]:

$$M_{pq}^+ = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_p}{\partial r_q} + \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_\odot, \quad (4)$$

$$M_{pq}^- = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_p}{\partial r_q} - \frac{\partial u_q}{\partial r_p} \right)_\odot, \quad p, q = 1, 2, 3.$$

Рабочие уравнения имеют вид:

$$V_r = f(u_\odot, v_\odot, w_\odot, M_{11}, \dots, M_{33}), \quad (5)$$

$$V_l = f(u_\odot, v_\odot, M_{11}, \dots, M_{23}), \quad (6)$$

$$V_b = f(u_\odot, v_\odot, w_\odot, M_{11}, \dots, M_{33}) \quad (7)$$

(подробнее см. работу [32]). Система условных уравнений (5)–(7) содержит 12 искоемых неизвестных — 3 компонента скорости V_\odot и 9 компонентов M_{pq} , которые определяются методом наименьших квадратов. Компоненты тензоров деформации и вращения вычисляются с использованием найденных величин M_{pq} на основе соотношений (4). Так, постоянные Оорта могут быть найдены следующим образом: $A = 0.5(M_{12} + M_{21})$, $B = 0.5(M_{21} - M_{12})$, $C = 0.5(M_{11} - M_{22})$ и $K = 0.5(M_{11} + M_{22})$, отклонение вертекса l_{xy} определяем из соотношения $\text{tg } 2l_{xy} = -C/A$. Угловая скорость галактического вращения может быть найдена из соотношений $\omega_\odot = B - A = -M_{12}$. Уравнения записаны в такой форме, что отрицательный знак величины ω_\odot соответствует направлению вращения Галактики.

4.2. Определение эллипсоида Шварцшильда

Для определения элементов эллипсоида остаточных скоростей (эллипсоида Шварцшильда) мы используем известный статистический метод, детальное описание которого можно найти в работах [31, 33, 34]. Метод заключается в определении симметричного тензора моментов. Для нахождения шести неизвестных компонентов тензора дисперсий имеем шесть уравнений для каждой звезды. Из анализа собственных значений тензора дисперсий определяются главные полуоси эллипсоида остаточных скоростей $\sigma_{1,2,3}$, а также направления главных осей $l_{1,2,3}$, $b_{1,2,3}$. При образовании остаточных скоростей звезд общее галактическое вращение учитываем с использованием постоянных Оорта $A = 13.7$ км/с кпк и $B = -12.9$ км/с кпк в соответствии с работой [35].

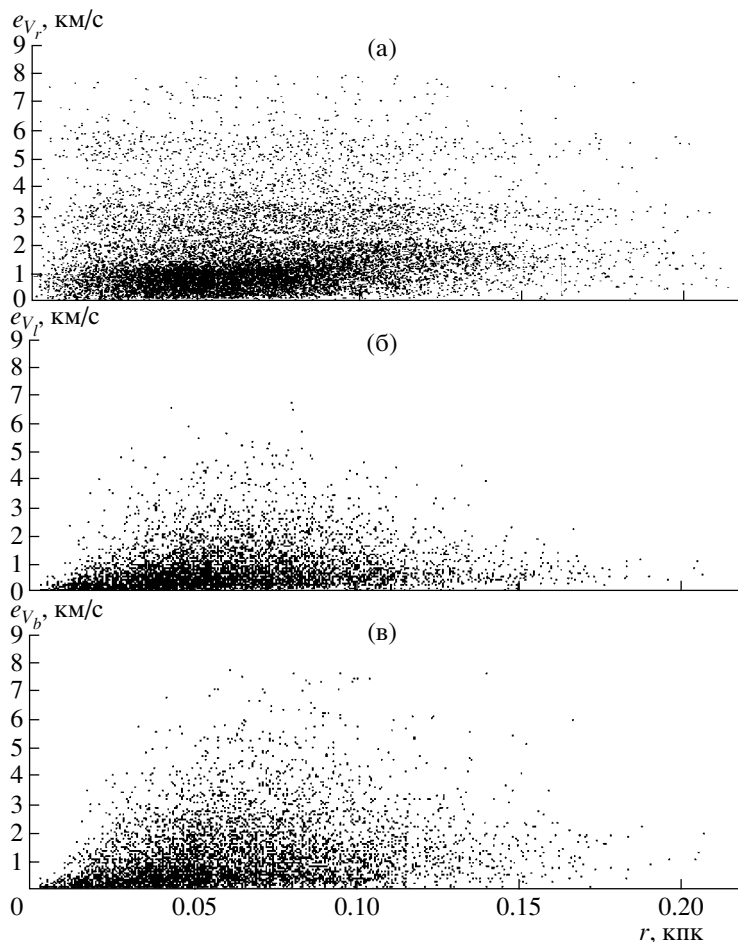


Рис. 7. Случайные ошибки скоростей близких звезд главной последовательности в зависимости от расстояния.

4.3. Двумерные карты пространственных скоростей

Для исследования тонкой структуры распределений остаточных пространственных скоростей с целью обнаружения скоплений, потоков и т.п. представляет интерес построение и анализ двумерных карт скоростей, в частности, на UV -плоскости [36, 37]. Для того, чтобы получить оценку двумерной плотности вероятностей $f(U, V)$ из вычисленных, дискретно распределенных UV -скоростей, мы используем метод адаптивного сглаживания [36] с применением двумерной радиально-симметричной гауссовой функции ядра:

$$K(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right),$$

где $r^2 = x^2 + y^2$; при этом выполняется необходимое для оценки плотности вероятностей соотношение $\int K(r)dr = 1$. Основная идея этого метода заключается в том, что в каждой точке карты выполняется операция сглаживания лучом с размером, задаваемым параметром σ , который изменяется в

соответствии с плотностью данных в окрестности этой точки. Таким образом, в зонах с повышенной плотностью сглаживание производится сравнительно узким лучом, а с понижением плотности данных ширина луча увеличивается. Используем следующее определение адаптивного сглаживания в произвольной точке $\xi = (U, V)$ [36]:

$$\hat{f}(\xi) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{\xi - \xi_i}{h\lambda_i}\right),$$

где $\xi_i = (U_i, V_i)$, λ_i — локальный безразмерный масштабный параметр луча в точке ξ_i , h — общий параметр сглаживания, n — число данных $\xi_i = (U_i, V_i)$. Параметр λ_i в каждой точке двумерной UV -плоскости определяется следующим образом:

$$\lambda_i = \sqrt{\frac{g}{\hat{f}(\xi)}}, \quad \ln g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln \hat{f}(\xi),$$

где g представляет собой геометрическое среднее $\hat{f}(\xi)$. Очевидно, для определения λ_i необходимо знать распределение $\hat{f}(\xi)$, которое, в свою оче-

Таблица 3. Кинематические параметры близких звезд главной последовательности

Параметр	Одиночные звезды	Двойные звезды	Одиночные звезды	Двойные звезды
	$B-V \leq 0.5$		$B-V > 0.5$	
	$N_* = 1720$ $\bar{r} = 67$ пк	$N_* = 1100$ $\bar{r} = 51$ пк	$N_* = 2318$ $\bar{r} = 39$ пк	$N_* = 1138$ $\bar{r} = 30$ пк
u_{\odot} , км/с	10.8 ± 0.4	10.4 ± 0.5	9.0 ± 0.6	10.8 ± 0.9
v_{\odot} , км/с	11.8 ± 0.4	11.8 ± 0.5	20.2 ± 0.6	21.9 ± 0.9
w_{\odot} , км/с	6.9 ± 0.4	7.3 ± 0.5	8.1 ± 0.6	7.4 ± 0.9
V_{\odot} , км/с	17.4 ± 0.4	17.3 ± 0.5	23.5 ± 0.6	25.5 ± 0.9
L_{\odot} , град	48 ± 1	48 ± 2	66 ± 2	64 ± 2
B_{\odot} , град	24 ± 1	25 ± 2	20 ± 2	17 ± 2
M_{11} , км/с кпк	-12 ± 9	11 ± 12	-21 ± 18	103 ± 29
M_{12} , км/с кпк	52 ± 7	33 ± 9	103 ± 17	27 ± 25
M_{13} , км/с кпк	-16 ± 9	-3 ± 12	-22 ± 17	0 ± 28
M_{21} , км/с кпк	-7 ± 9	-25 ± 12	2 ± 18	51 ± 29
M_{22} , км/с кпк	19 ± 7	10 ± 9	20 ± 17	7 ± 25
M_{23} , км/с кпк	4 ± 9	28 ± 12	15 ± 17	-16 ± 28
M_{31} , км/с кпк	2 ± 9	-9 ± 12	16 ± 18	1 ± 29
M_{32} , км/с кпк	3 ± 7	4 ± 9	-28 ± 17	19 ± 25
M_{33} , км/с кпк	6 ± 9	-10 ± 12	0 ± 17	-15 ± 28
λ_1 , км/с кпк	31 ± 9	19 ± 12	57 ± 18	117 ± 29
λ_2 , км/с кпк	-25 ± 9	-21 ± 12	-57 ± 18	-15 ± 29
λ_3 , км/с кпк	8 ± 9	13 ± 12	-1 ± 17	-7 ± 28
σ_1 , км/с	23.09 ± 0.55	22.67 ± 0.67	33.84 ± 0.76	33.82 ± 1.07
σ_2 , км/с	13.21 ± 0.52	13.20 ± 0.59	22.00 ± 0.52	23.06 ± 0.73
σ_3 , км/с	10.15 ± 0.37	10.21 ± 0.45	17.75 ± 0.41	17.27 ± 0.56
l_1, b_1 , град	$14 \pm 3, -1 \pm 0$	$15 \pm 11, -2 \pm 2$	$8 \pm 1, 0 \pm 0$	$9 \pm 9, -2 \pm 2$
l_2, b_2 , град	$104 \pm 2, 0 \pm 1$	$105 \pm 3, 4 \pm 2$	$98 \pm 2, 5 \pm 1$	$98 \pm 4, 9 \pm 2$
l_3, b_3 , град	$349 \pm 2, 89 \pm 6$	$315 \pm 3, 86 \pm 5$	$275 \pm 2, 86 \pm 5$	$291 \pm 4, 81 \pm 5$

редь, может быть определено, если известны все λ_i . Поэтому задача нахождения искомого распределения решается итерационно. В качестве первого приближения используем распределение, полученное путем сглаживания исходной UV -карты лучом фиксированного размера. Оптимальное значение параметра h находится из условия минимума среднеквадратического отклонения оценки $\hat{f}(\xi)$ от истинного распределения $f(\xi)$. Найденные нами значения h для различных выборок звезд, рассматриваемых в данной работе, варьируются от 6 до 10 км/с. Типичная неопределенность в определе-

нии скоростей в нашем случае составляет величину 2 км/с, что повлияло на выбор интервала дискретизации двумерных карт; при этом площадь квадратного пиксела равна $S = 2 \times 2 \text{ км}^2/\text{с}^2$. Карты должны быть промасштабированы множителем nS .

5. РЕЗУЛЬТАТЫ КИНЕМАТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

5.1. Влияние двойственности звезд

Целью данного раздела является установление характера влияния двойственности звезд

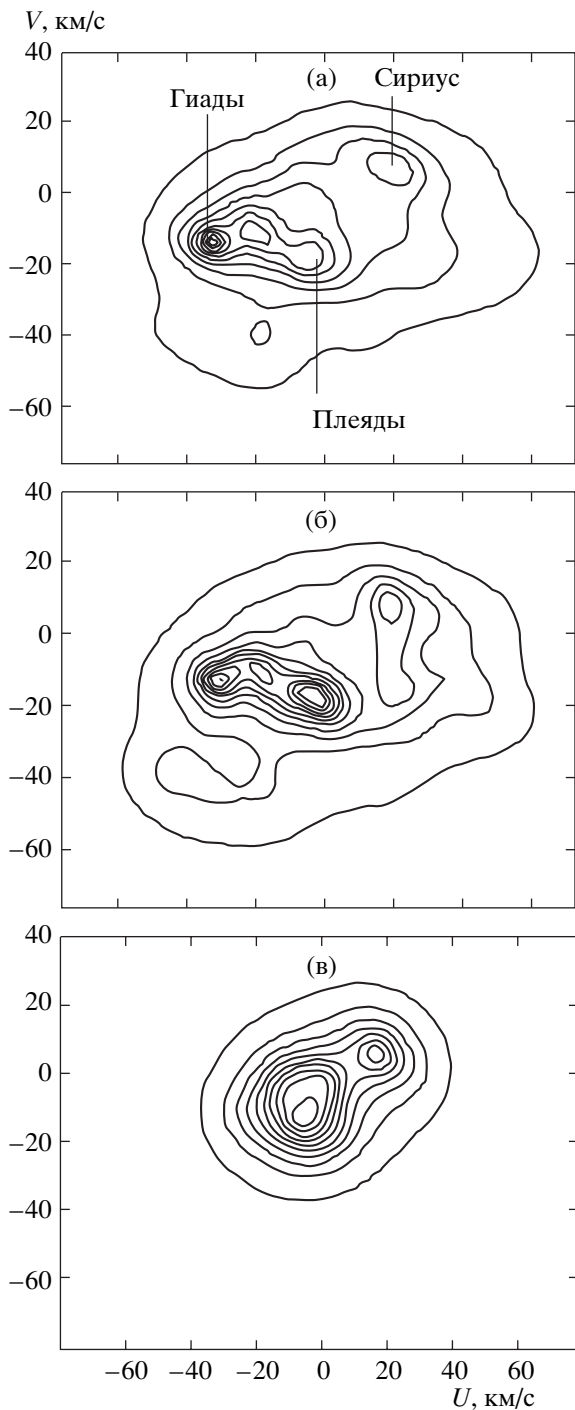


Рис. 8. Распределения UV -скоростей (даны относительно местного стандарта покоя): (а) — одиночные звезды, (б) — двойные близкие звезды главной последовательности ($B-V > 0.5$), (в) — звезды с отрицательным K -эффектом.

на определение параметров модели Огородникова—Милна. Чтобы выявить возможные особенности, зависящие от возраста звезд, мы отобрали из каталога OSACA звезды с классами светимости

V и IV, т.е. звезды главной последовательности, удовлетворяющие следующим условиям:

$$e_{\pi}/\pi < 0.1, \quad e_V < 8 \text{ км/с},$$

а также условию (3). На рис. 7 показано распределение случайных ошибок компонентов наблюдаемых пространственных скоростей V_r, V_l, V_b в зависимости от расстояния для полученной выборки из 6276 звезд. Средние значения случайных ошибок скоростей звезд составили $\bar{e}_{V_r} = 1.1 \text{ км/с}$, $\bar{e}_{V_l} = 1.3 \text{ км/с}$, $\bar{e}_{V_b} = 0.9 \text{ км/с}$. В этом случае средняя ошибка определения модуля пространственной скорости звезды составляет 1.9 км/с . Однородность материала позволяет решать исходные уравнения (5)–(7) с единичными весами.

Всю выборку мы, во-первых, разделили на две части, в зависимости от показателя цвета с границей $B-V = 0.5$, и, во-вторых, для каждой части были образованы выборки, содержащие либо только одиночные, либо только двойные звезды. В табл. 3 приведены следующие определенные величины: компоненты скорости Солнца относительно соответствующего центроида звезд $V_{\odot}(u_{\odot}, v_{\odot}, w_{\odot})$ и координаты апекса полученного движения L_{\odot} и B_{\odot} , элементы тензора смещений M_{pq} и корни тензора деформации $\lambda_{1,2,3}$, главные полуоси эллипсоида остаточных скоростей $\sigma_{1,2,3}$, а также направления главных осей $l_{1,2,3}$, $b_{1,2,3}$. Как можно видеть из верхней части таблицы, в каждом цветовом диапазоне компоненты солнечного движения, найденные на основе выборок одиночных и двойных звезд, не имеют значимых различий между собой.

Среди элементов тензора смещений значимо отличается от нуля только величина M_{12} для трех выборок, указанных в колонках 2–4, а также величина M_{11} для последней выборки двойных красных карликов главной последовательности (колонка 5). Разность в определении величины M_{11} между выборками одиночных и двойных красных карликов составляет $\Delta M_{11} \bar{r} \approx 3 \pm 1 \text{ км/с}$.

Для двух выборок одиночных звезд (колонки 2 и 4) значимо отличаются от нуля два корня тензора деформации $\lambda_{1,2}$, а третий корень λ_3 не отличается значимо от нуля. Следовательно, реализуется планарный случай, при котором $\lambda_{(1,2)} = K \pm \sqrt{A^2 + C^2}$ [38]. Близость модулей найденных корней λ_1 и λ_2 показывает, что реализуется случай вращения (без расширения/сжатия).

Для тензора деформации двойных красных карликов реализуется линейный случай с одним значимым корнем $\lambda_1 = 117 \pm 29 \text{ км/с}$ кпк, при этом значение $K = 55 \pm 19 \text{ км/с}$ кпк достаточно велико. В этом случае эллипс тензора деформации является сильно вытянутым вдоль оси x , т.е. имеется случай расширения вдоль одной оси.

Как можно видеть из табл. 3, в каждом цветовом диапазоне элементы эллипсоида остаточных скоростей звезд, найденные по выборкам одиночных и двойных звезд, не имеют значимых различий. В случае двойных звезд элементы эллипсоида остаточных скоростей отличаются большими случайными ошибками.

Рассмотренные выборки являются наиболее рафинированными в отношении ошибок определения как расстояний до звезд, так и компонентов скоростей.

Построенные нами распределения UV -скоростей (рис. 8) показывают, что двойные звезды существенно больше (примерно вдвое), чем одиночные, сконцентрированы в районе локальных пиков, которые ассоциируются со скоплениями Гиады и Плеяды. Отметим, что на приведенных изображениях нижний уровень и шаг контурных линий составляет 10% от максимального значения.

Найденные на основе выборок одиночных и двойных красных карликов особенности в определении параметров модели Огородникова–Милна, например, значимость параметра M_{11} , не противоречат нашему результату анализа существенно меньшей выборки близких визуально-двойных звезд [39]. При этом в настоящей работе кинематические параметры определены со значительно более высокой точностью. Распределения UV -скоростей как одиночных, так и кратных звезд (рис. 8) и красных карликов (наиболее старых звезд), в особенности, показывают, что на процесс формирования звезд в галактическом диске оказывает влияние устойчивый фактор, который можно связать с воздействием бара в центре Галактики [40, 41] и спиральной структуры Галактики [42].

5.2. Отрицательный K -эффект

Целью данного раздела является анализ звезд, у которых наиболее сильно проявляется отрицательный K -эффект. Для этого мы отобрали только те одиночные звезды, которые удовлетворяют соотношениям (1)–(3), а также критерию $\pi < 10$ мсек. дуги, применение которого приводит к тому, что, в основном, мы рассматриваем гиганты. Все отобранные звезды расположены в интервале расстояний 0.1–0.6 кпк. В результате анализа 9468 звезд ($\bar{r} = 0.175$ кпк) смешанного спектрального состава мы определили следующие параметры: $A = 12.3 \pm 1.0$ км/с кпк, $B = -13.4 \pm 1.0$ км/с кпк, $C = -6.1 \pm 1.0$ км/с кпк, $K = -4.1 \pm 1.0$ км/с кпк, при этом отклонение вертекса найдено равным $l = 13^\circ \pm 2^\circ$, угловая скорость галактического вращения составляет $\omega_\odot = -25.7 \pm 1.2$ км/с кпк. Полученные значения постоянных Оорта A, B и ω_\odot в целом находятся в хорошем согласии с параметрами галактического вращения, найденными в

работах различных авторов на основе гораздо более далеких, чем наши, звезд [35, 43, 44]. В то же время нами найден значимо отличающийся от нуля параметр K , что представляет большой интерес. В рамках модели Огородникова–Милна наличие отрицательного K -эффекта означает, что рассматриваемая система звезд находится в состоянии сжатия.

Отрицательный K -эффект в движении OB -звезд (вплоть до расстояний ≈ 4 кпк) с величиной $-(1-6)$ км/с кпк был обнаружен в работах различных авторов [35, 45]. Природа этого явления в настоящее время до конца не ясна. Высказываются различные гипотезы: либо это эффект, связанный с особенностями измерения лучевых скоростей звезд [46], либо влияние бара в центре Галактики [46], либо влияние спиральной структуры [47, 48]. В частности, в работе [49] была сделана попытка учесть спиральную структуру, которая оказалась неудачной: отрицательный K -эффект остался.

Отметим, что для наиболее молодых и близких OB -звезд характерен положительный K -эффект [32, 49], поэтому эти звезды нами не рассматриваются.

В данной работе нам удалось сформировать выборку звезд с максимально выраженным отрицательным K -эффектом, которую составили 1269 звезд с показателем цвета $B-V \leq 0.2$. При этом звезды классов светимости V и IV не были использованы, не рассматривались также звезды спектральных классов O и B, так что в данную выборку вошли только звезды спектральных классов A0–A5 с классами светимости I, II, III, но основную часть составили звезды, для которых классы светимости в каталоге OSACA не указаны. Далее мы рассмотрели остаточные скорости звезд, в которые были введены поправки за общее галактическое вращение (см. п. 4.2). В результате были найдены следующие значения пекулярной скорости Солнца $u_\odot = 10.2 \pm 0.4$ км/с, $v_\odot = 10.9 \pm 0.4$ км/с, $w_\odot = 6.6 \pm 0.4$ км/с, $V_\odot = 16.4 \pm 0.4$ км/с, $L_\odot = 47^\circ \pm 2^\circ$, $B_\odot = 24^\circ \pm 2^\circ$, а также следующие компоненты тензоров M, M^+ и M^- (в единицах км/с кпк), характеризующие остаточные кинематические эффекты:

$$M = \begin{pmatrix} -28.0_{(3.2)} & -1.4_{(2.5)} & -0.2_{(4.1)} \\ -11.4_{(3.2)} & 1.9_{(2.5)} & 2.6_{(4.1)} \\ 0.3_{(3.2)} & 0.2_{(2.5)} & -3.3_{(4.1)} \end{pmatrix},$$

$$M^+ = \begin{pmatrix} -28.0_{(3.2)} & -6.4_{(2.0)} & 0.0_{(2.6)} \\ -6.4_{(2.0)} & 1.9_{(2.5)} & 1.4_{(2.4)} \\ 0.0_{(2.6)} & 1.4_{(2.4)} & -3.3_{(4.1)} \end{pmatrix},$$

$$M^- = \begin{pmatrix} 0 & 5.0_{(2.0)} & -0.2_{(2.6)} \\ -5.0_{(2.0)} & 0 & 1.2_{(2.4)} \\ 0.2_{(2.6)} & -1.2_{(2.4)} & 0 \end{pmatrix}$$

Корни тензора деформации ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) составляют (3.5, -29.3, -3.5) км/с кпк, ошибки их определения составляют ≈ 3 км/с кпк. Направления главных осей тензора деформации таковы:

$$\begin{aligned} L_1 &= 282^\circ \pm 2^\circ, & B_1 &= -12^\circ \pm 1^\circ, \\ L_2 &= 12^\circ \pm 4^\circ, & B_2 &= -1^\circ \pm 26^\circ, \\ L_3 &= 285^\circ \pm 4^\circ, & B_3 &= 79^\circ \pm 6^\circ. \end{aligned}$$

Отклонение вертекса в плоскости xy составило $l_{xy} = -33^\circ \pm 4^\circ$; получены также параметры K -эффекта: $K = 0.5(M_{11} + M_{22}) = -13.1 \pm \pm 2.0$ км/с кпк и $C = 0.5(M_{11} - M_{22}) = -14.9 \pm \pm 2.0$ км/с кпк.

Так как тензор вращения M^- не содержит элементов, значимо отличающихся от нуля, то мы можем полагать, что определяющим эффектом в остаточном движении данных звезд является радиальная составляющая. При этом один из корней полагаем равным нулю (λ_3), и мы рассматриваем только плоскость xy . Учитывая, что $(\partial V_R / \partial R)_{R_0} = \lambda_1$, имеем $(V_R / R)_{R_0} = \lambda_2$, где R — расстояние от кинематического центра, которое нам не известно. Однако на основе соотношений

$$\begin{aligned} K + C &= 4 \pm 3 \text{ км/с кпк,} \\ K - C &= -29 \pm 3 \text{ км/с кпк} \end{aligned}$$

мы имеем оценку характерной остаточной скорости звезд $(K - C)\bar{r} = -5.4 \pm 0.6$ км/с, а также получаем значение $K = -12.9$ км/с кпк и значение $C = 16.4$ км/с кпк (изменился знак), которое в данном случае является характеристикой радиальной составляющей остаточных скоростей звезд. Полученная оценка -5.4 ± 0.6 км/с находится в согласии с амплитудой периодических колебаний остаточных скоростей звезд в межзвучавном пространстве в радиальном направлении $f_R = 7 \pm 1$ км/с, которая получена в работе [50] из анализа движения ОВ-ассоциаций.

Направление третьей оси $B_3 = 79^\circ \pm 6^\circ$ показывает, что эффект сжатия происходит в плоскости Галактики. Фактически оба корня тензора деформации (λ_1 и λ_2) близки к нулю. Это означает, что сжатие происходит вдоль одной оси, имеющей направление $12^\circ - 192^\circ$, ошибки определения которого составляют от 2° до 4° .

Главные оси тензора остаточных скоростей ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) таковы: $(16.09 \pm 0.56, 10.04 \pm 0.53,$

$6.89 \pm 0.47)$ км/с; направления главных осей имеют следующие координаты:

$$\begin{aligned} l_1 &= 27^\circ \pm 4^\circ, & b_1 &= -1^\circ \pm 0^\circ, \\ l_2 &= 117^\circ \pm 6^\circ, & b_2 &= -1^\circ \pm 2^\circ, \\ l_3 &= 80^\circ \pm 6^\circ, & b_3 &= 88^\circ \pm 3^\circ. \end{aligned}$$

Мы можем видеть, что имеется различие в углах l_1, l_{xy} и L_2 , и это различие только подчеркивает тот факт, что в кинематике данных звезд влияние радиальной составляющей является существенным.

На рис. 8в показано распределение остаточных UV -скоростей рассматриваемых звезд, из которого следует, что имеется концентрация только к двум пикам — Сириуса и Плеяд. Примечательно, что для звезд с отрицательным K -эффектом мала скорость (v_\odot) относительно местного стандарта покоя.

В результате анализа собственных движений около 40 000 гигантов III класса светимости, выполненного в работе [51], найдено значение $K = -7.5 \pm 1.8$ км/с кпк для звезд G5-K0, расположенных на расстояниях далее 250 пк (среднее расстояние составило около 364 пк). Полученный нами результат находится в согласии с результатом работы [51]. При этом мы можем заключить, что применение высокоточных пространственных скоростей звезд каталога OSACA позволяют почувствовать отрицательный K -эффект на гораздо более близких расстояниях, а применяемый нами подход, который показал, что фактически имеется сжатие вдоль одной оси, позволяет в целом ближе подойти к пониманию природы данного эффекта.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами создана и постоянно обновляется база данных OSACA (Orion Spiral Arm Catalogue) для звезд с известными координатами, параллаксами, собственными движениями и лучевыми скоростями в пределах рукава Ориона нашей Галактики. Лучевые скорости более чем из 1400 источников, включая Женевско-Копенгагенский обзор окрестностей Солнца (CORAVEL-CfA), переведены на единую систему лучевых скоростей 854 стандартных звезд из сформированного нами списка. Это позволило вычислить средневзвешенные лучевые скорости более 25 тыс. звезд каталога HIPPARCOS с медианной точностью 1 км/с. На примере исключения систематических ошибок CORAVEL-CfA показана эффективность использования предложенного стандарта лучевых скоростей звезд. Исправлено множество ошибок идентификации компонентов кратных звездных систем, имеющих во многих публикациях.

На основе данных каталога OSACA проведен кинематический анализ 6276 ближайших звезд

главной последовательности, для которых средние ошибки пространственных скоростей составляют ± 2 км/с. Использование модели Огородникова—Милна и анализ распределений UV -скоростей звезд показали наличие существенных различий в кинематике одиночных и кратных звезд. В частности, показано, что в плоскости UV -скоростей кратные звезды в существенно большей степени, чем одиночные, сконцентрированы в районе пика, ассоциируемого с потоком Гиалды—Плеяды.

Использование 9468 сравнительно далеких ($r \approx 0.2$ кпк) звезд смешанного спектрального состава позволило оценить угловую скорость галактического вращения $\omega_o = -25.7 \pm 1.2$ км/с кпк (при этом отклонение вертекса найдено равным $l = 13^\circ \pm 2^\circ$), а также радиальную составляющую скорости — K -эффект, наиболее сильно проявляющийся в движении звезд-гигантов спектральных классов А0—А5. В рамках модели Огородникова—Милна найдены следующие параметры $K = -13.1 \pm 2.0$ км/с кпк и $C = 14.9 \pm 2.0$ км/с кпк, на основе которых получена оценка характерной остаточной радиальной скорости использованной выборки звезд -5.4 ± 0.6 км/с. Эффект максимального сжатия связан с направлением $12^\circ - 192^\circ$, ошибки определения которого составляют от 2° до 4° .

Авторы благодарны рецензенту за ценные замечания, которые способствовали улучшению статьи. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-02-17047).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. B. Nordström, M. Mayor, J. Andersen, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **418**, 989 (2004).
2. G. A. Gontcharov, *Order and Chaos in Stellar and Planetary Systems*, eds G. G. Byrd, K. V. Kholshchevnikov, A. A. Mylläri, *et al.*, ASP Conf. Ser. (2004), Vol. 316, p. 276.
3. П. Г. Куликовский, *Звездная астрономия* (М.: Наука, 1985).
4. *The HIPPARCOS and Tycho Catalogues*, ESA SP-1200 (1997).
5. Г. А. Гончаров, О. В. Кияева, Письма в "Астрон. журн." **28**, 302 (2002).
6. F. Arenou, M. Grenon, and A. Gomez, *Astron. and Astrophys.* **258**, 104 (1992).
7. C. Turon, M. Crézé, D. Egret, *et al.*, *The Hipparcos Input Catalogue* (Noordwijk: ESA Publ. Div., 1992), Vols. 1–7.
8. M. Duflot, P. Figon, and N. Meysonnier, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **114**, 269 (1995).
9. M. Barbier-Brossat and P. Figon, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **142**, 217 (2000).
10. D. Bersier, G. Burki, M. Mayor, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **108**, 25 (1994).
11. C. Fehrenbach, M. Duflot, C. Mannone, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **124**, 255 (1997).
12. J. Fernley and T. G. Barnes, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **125**, 313 (1997).
13. C. Flynn and K. C. Freeman, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **97**, 835 (1993).
14. S. Grenier, M. O. Baylac, L. Rolland, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **137**, 451 (1999).
15. M. Imbert, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **140**, 79 (1999).
16. S. Madsen, D. Dravins, and L. Lindegren, *Astron. and Astrophys.* **381**, 446 (2002).
17. J. R. de Medeiros and M. Mayor, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **139**, 433 (1999).
18. J. R. de Medeiros, S. Udry, G. Burki, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **395**, 97 (2002).
19. S. M. Rucinski, C. C. Capobianco, W. Lu, *et al.*, *Astron. J.* **125**, 3258 (2003).
20. E. Solano, R. Garrid, J. Fernley, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **125**, 321 (1997).
21. J. Storm, B. W. Carney, W. P. Gieren, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **415**, 531 (2004).
22. S. Malaroda, H. Levato, and S. Galliani, *Complejo Astronomico El Leoncito* (2004).
23. S. Udry, M. Mayor, E. Maurice, *et al.*, *Precise Stellar Radial Velocities*, eds L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov, ASP Conf. Ser. (1999), Vol. 185, p. 383.
24. F. C. Fekel, *Precise Stellar Radial Velocities*, eds L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov, ASP Conf. Ser. (1999), Vol. 185, p. 378.
25. S. Udry, M. Mayor, and D. Cueloz, *Precise Stellar Radial Velocities*, eds L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov, ASP Conf. Ser. (1999), Vol. 185, p. 367.
26. R. P. Stefanik, D. W. Latham, and G. Torres, *Precise Stellar Radial Velocities*, eds L. P. Ossipkov and I. I. Nikiforov, ASP Conf. Ser. (1999), Vol. 185, p. 354.
27. D. L. Nidever, G. W. Marcy, R. P. Butler, *et al.*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **141**, 503 (2002).
28. W. Dehnen and J. J. Binney, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **298**, 387 (1998).
29. S. V. M. Clube, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **159**, 289 (1972).
30. S. V. M. Clube, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **161**, 445 (1973).
31. К. Ф. Огородников, *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965).
32. В. В. Бобылев, Письма в "Астрон. журн." **30**, 861 (2004).
33. П. П. Паренаго, *Курс звездной астрономии* (М.: Госиздат, 1954).
34. R. J. Trumpler and H. F. Weaver, *Statistical Astronomy* (Berkeley: Univ. of Calif. Press, 1953).
35. В. В. Бобылев, Письма в "Астрон. журн." **30**, 185 (2004).
36. J. Skuljan, J. B. Hearnshaw, and P. L. Cottrell, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **308**, 731 (1999).
37. R. S. De Simone, X. Wu, and S. Tremaine, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.* **350**, 627 (2004).
38. C. A. Murray, *Vectorial Astrometry* (Bristol: Adam Hilger Ltd, 1983).

39. В. В. Бобылев, В. В. Витязев, Г. А. Гончаров, Вестн. С.-Петербургск. ун-та, сер. 1, вып. 4, № 25, 111 (2003).
40. R. Fux, *Astron. and Astrophys.* **373**, 511 (2001).
41. G. Mühlbauer and W. Dehnen, *Astron. and Astrophys.* **401**, 975 (2003).
42. C. Babusiaux and G. Gilmore, *astro-ph/0501383* (2005).
43. L. R. Bedin, G. Piotto, I. R. King, *et al.*, *Astron. J.* **126**, 247 (2003).
44. М. В. Заболоцких, А. С. Расторгуев, А. К. Дамбис, Письма в “Астрон. журн.” **28**, 454 (2002).
45. D. Fernández, F. Figueras, and J. Torra, *Astron. and Astrophys.* **372**, 833 (2001).
46. F. Pont, M. Mayor, and G. Burki, *Astron. and Astrophys.* **285**, 415 (1994).
47. M. R. Metzger, J. A. R. Caldwell, and P. L. Schechter, *Astron. J.* **115**, 635 (1998).
48. K. Rohlfs, *Lectures in Density Waves* (Berlin: Springer-Verlag, 1977).
49. J. Torra, D. Fernández, and F. Figueras, *Astron. and Astrophys.* **359**, 82 (2000).
50. А. М. Мельник, А. К. Дамбис, А. С. Расторгуев, Письма в “Астрон. журн.” **27**, 611 (2001).
51. С. П. Рыбка, *Кинемат. и физ. небесн. тел* **20**, 437 (2004).

The OSACA Database and a Kinematical Analysis of Stars in the Solar Neighborhood

V. V. Bobylev, G. A. Goncharov, and A. T. Baikova

We transformed the radial velocities compiled from more than 1400 published sources, including the Geneva–Copenhagen survey of the solar neighborhood (CORAVEL–CfA), into a uniform system based on the radial velocities of 854 standard stars in our list. This enabled us to calculate the average weighted radial velocities for more than 25 000 HIPPARCOS stars located within the local Galactic spiral arm (the Orion arm) with a median error of ± 1 km/s. We use the radial velocities together with the stars’ coordinates, parallaxes, and proper motions to determine their Galactic coordinates and space velocities. These quantities, along with other parameters of the stars, are available from the continuously updated Orion Spiral Arm Catalogue (OSACA) and the associated database. We perform a kinematic analysis of stars by applying an Ogorodnikov–Milne model to the OSACA data. The kinematics of the nearest single and multiple main-sequence stars differ substantially. We used distant ($\bar{r} \approx 0.2$ kpc) stars of mixed spectral composition to estimate the angular velocity of the Galactic rotation, $\omega_{\odot} = -25.7 \pm 1.2$ km/s kpc, and the vertex deviation, $l = 13^{\circ} \pm 2^{\circ}$, and detect a negative K effect. This negative K effect is most conspicuous in the motion of A0–A5 giants, and is equal to $K = -13.1 \pm 2.0$ km/s kpc.