

ОСОБЕННОСТИ РАССЕЯННЫХ ЗВЕЗДНЫХ СКОПЛЕНИЙ С БОЛЬШИМИ ВЕРТИКАЛЬНЫМИ СКОРОСТЯМИ ИЗ ОБЛАСТИ ОВ-АССОЦИАЦИИ SCO-СЕН

© 2023 г. В. В. Бобылев^{1*}, А. Т. Байкова¹

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

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 23.07.2023 г.; принята к публикации 11.08.2023 г.

Изучена кинематика уникальной выборки молодых рассеянных звездных скоплений (РЗС) с большими вертикальными скоростями, $15 < W < 40$ км/с. Характеристики этих скоплений были взяты из каталога Хант, Рефферт (2023), где средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний вычислены по данным каталога Gaia DR3. Расположены эти РЗС в околосолнечной окрестности радиусом менее 0.6 кпк и образуют два сгущения: одно — в области ОВ-ассоциации Sco-Сен, другое — в области ассоциаций Per OB3–Per OB2. Показано, что эффект расширения группировки РЗС из 47 членов в области ассоциации Sco-Сен происходит вдоль оси y , $\partial V/\partial y = 51 \pm 12$ км/с/кпк. Эта группировка обладает также положительным вращением вокруг оси z , с угловой скоростью 71 ± 11 км/с/кпк и отрицательным вращением вокруг оси x , со скоростью -35 ± 5 км/с/кпк. По скоростям 27 РЗС из области ассоциаций Per OB3–Per OB2 не найдено значимо отличающихся от нуля градиентов. Изучена кинематика более 1700 звезд, отобранных Луманом (2022) в качестве вероятных членов ОВ-ассоциации Sco-Сен. Показано, что большими вертикальными скоростями эти звезды не обладают. По всем звездам найден коэффициент расширения звездной системы в плоскости xy , $K_{xy} = 43.2 \pm 2.2$ км/с/кпк. По звездам трех группировок UCL, LCC и V1062 Sco со средним возрастом около 20 млн лет впервые найден значимо отличающийся от нуля коэффициент объемного расширения звездной системы, $K_{xyz} = 43.2 \pm 3.4$ км/с/кпк.

Ключевые слова: звезды, рассеянные звездные скопления, кинематика, звездные ассоциации, ОВ-ассоциация Sco-Сен.

DOI: 10.31857/S032001082307001X, **EDN:** GPSGCD

ВВЕДЕНИЕ

Изучение внутренней структуры ОВ-ассоциаций имеет важное значение для решения различных астрофизических задач. Например, это: а) оценка скорости формирования скоплений разного возраста, б) уточнение деталей процесса расширения и рассеивания ассоциаций при образовании популяции звезд поля, в) возможность образования богатых ассоциаций и скоплений в результате слияния более мелких структур, г) определение структуры и продолжительности образования скоплений в областях звездообразования и др. Исследованию ОВ-ассоциаций посвящено огромное количество публикаций (см., например, Блау, 1954; де Зев и др., 1999; Прайбыш, Зиннекер, 1999; Зиннекер, Йорк, 2007; Фейгельсон, 2017; Мельник, Дамбис, 2020; Райт, 2020; Доббс и др., 2022).

Эффект расширения, являющийся одним из важных кинематических свойств, зафиксирован у многих ОВ-ассоциаций (Кантат-Гудин и др., 2019; Рао и др., 2020; Армстронг и др., 2020, 2022). Сложнее оценить собственное вращение ОВ-ассоциации. Например, Кун и др. (2019) изучили выборку из 28 скоплений и ассоциаций с возрастом от 1 до 5 млн лет, данные для которых были взяты из каталога Gaia DR2 (Коллаборация Gaia, 2018). Эти авторы показали, что около 75% рассмотренных систем расширяются с типичными скоростями 0.5 км/с, а собственное вращение обнаружено только в одной системе. Согласно оценкам Мельник, Дамбиса (2017, 2018), расширение ОВ-ассоциаций Per OB1 и Car OB1 происходит с линейными скоростями ~ 6 км/с на их внешних границах.

ОВ-ассоциации имеют сложную структуру. Они содержат газ, пыль, звезды, а также рассеянные

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

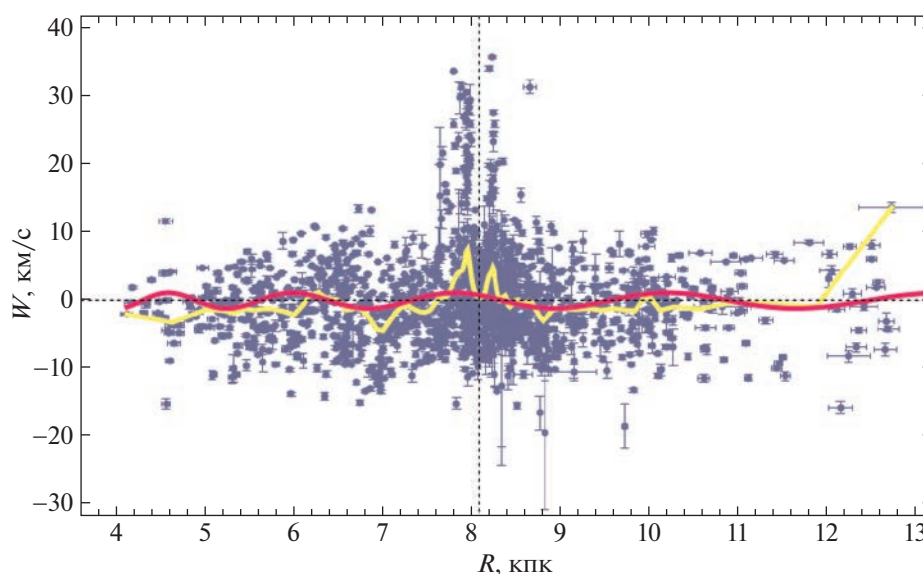


Рис. 1. Вертикальные скорости W в зависимости от галактоцентрического расстояния R выборки РЗС с возрастaми менее 50 млн лет, усредненные данные — желтая линия; периодическая кривая, найденная на основе спектрального анализа — красная линия, рисунок взят из работы Бобылева, Байковой (2023).

звездные скопления (РЗС). Изучение РЗС имеет важное значение для решения различных задач, в частности, для понимания структуры и эволюции ассоциаций. В настоящее время одной из наиболее обширных коллекций кинематических данных о РЗС Галактики является каталог Хант, Рефферт (2023). В нем представлено 7200 РЗС, выделенных по данным каталога Gaia DR3 (Коллаборация Gaia, 2022) с использованием популярного алгоритма кластерного анализа HDBSCAN. Как оказалось, в этом каталоге 4780 РЗС уже известны из литературы, а 2420 из общего числа найденных являются новыми кандидатами в РЗС. Для всех РЗС каталога оценены возрасты, время жизни и расстояния. Большой процент РЗС имеет оценку среднего значения лучевой скорости, которая вычислена по данным каталога Gaia DR3. В работе Бобылева, Байковой (2023) для анализа кинематики Галактики и спиральной волны плотности из каталога Хант, Рефферт (2023) были взяты РЗС с возрастом менее 50 млн лет. Всего было отобрано 2494 РЗС со средним возрастом 21 млн лет, из них 1722 РЗС имеют лучевые скорости. Большой неожиданностью явилось обнаружение сильного всплеска в вертикальных скоростях РЗС, расположенных в относительно небольшой околосолнечной окрестности. Этот эффект хорошо можно видеть на рис. 1. Периодические возмущения в вертикальных скоростях f_W этой выборки РЗС, связанные с галактической спиральной волной плотности, также присутствуют, но имеют очень малую амплитуду, $f_W = 1.1 \pm 0.4$ км/с. Найденные перио-

дические возмущения показаны красной линией на рис. 1.

Целью настоящей работы является изучение пространственного распределения и кинематики близких к Солнцу молодых РЗС с большими вертикальными скоростями W . Для этого используем подход, основанный на применении линейной модели Огородникова—Милна. Этот подход применяем также для анализа звезд, принадлежащих ближайшей к Солнцу ОБ-ассоциации Sco-Cen.

Работа структурирована следующим образом. В следующем разделе “Методы” описан подход, основанный на применении линейной модели Огородникова—Милна. Далее в разделе “Результаты” вначале описаны результаты анализа отобранных нами молодых РЗС с большими вертикальными скоростями. Характеристики этих РЗС взяты нами из каталога Хант, Рефферт (2023). Затем даны результаты анализа звезд — вероятных членов ОБ-ассоциации Sco-Cen, взятых согласно списку Лумана (2022). В “Заключении” сформулированы основные результаты работы.

МЕТОД

Из наблюдений имеем три составляющие скорости звезды: лучевую скорость V_r и две проекции тангенциальной скорости $V_l = 4.74r\mu_l \cos b$ и $V_b = 4.74r\mu_b$, направленные вдоль галактической долготы l и широты b соответственно, выраженные в км/с. Здесь коэффициент 4.74 является отношением числа километров в астрономической единице к числу секунд в тропическом году, а r — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк. Компоненты

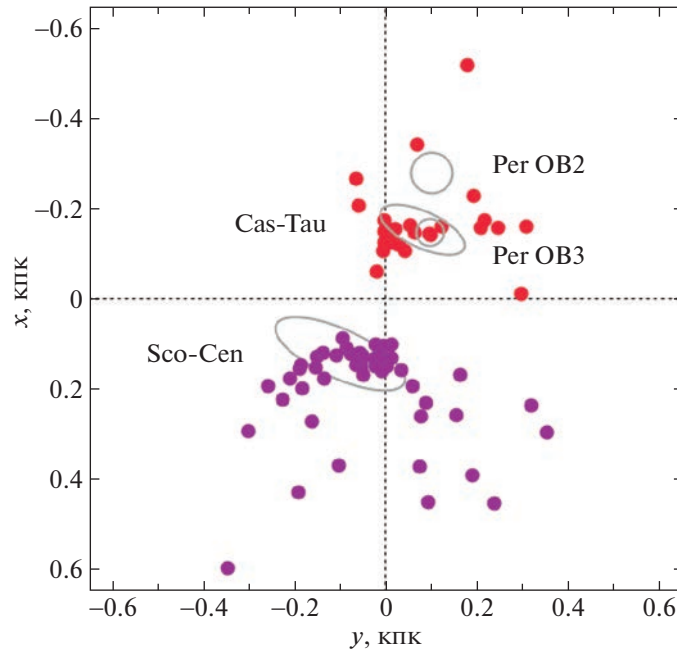


Рис. 2. Распределение РЗС с большими ($W > 15$ км/с) вертикальными скоростями в проекции на галактической плоскости xy , серыми эллипсами показано примерное положение ОБ-ассоциаций Sco-Cen, Per OB3, Cas-Tau и Per OB2.

собственного движения $\mu_l \cos b$ и μ_b выражены в мсд/год (миллисекунды дуги в год). Через компоненты V_r , V_l , V_b вычисляются скорости U , V , W , направленные вдоль прямоугольных галактических осей координат (x, y, z) :

$$\begin{aligned} U &= V_r \cos l \cos b - V_l \sin l - V_b \cos l \sin b, \\ V &= V_r \sin l \cos b + V_l \cos l - V_b \sin l \sin b, \\ W &= V_r \sin b + V_b \cos b, \end{aligned} \quad (1)$$

где скорость U и координата x направлены от Солнца к центру Галактики, V и y — по направлению вращения Галактики, а W и z — на северный галактический полюс.

Согласно линейной модели Огородникова–Милна (Огородников, 1965) в предположении о том, что пекулярная скорость Солнца $(U, V, W)_\odot$ исключена или равна нулю, скорости U , V , W можно представить в виде следующей системы линейных уравнений:

$$\begin{aligned} U &= \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_0 x + \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)_0 y + \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)_0 z, \\ V &= \left(\frac{\partial V}{\partial x} \right)_0 x + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_0 y + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)_0 z, \\ W &= \left(\frac{\partial W}{\partial x} \right)_0 x + \left(\frac{\partial W}{\partial y} \right)_0 y + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_0 z. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь нижний индекс “0” означает, что производные взяты в начале системы координат. По трем диагональным градиентам из правых частей

системы уравнений (2) можно найти параметры расширения звездной системы K_{xy} , K_{xz} и K_{yz} в трех соответствующих плоскостях:

$$\begin{aligned} K_{xy} &= \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_0 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_0 \right] / 2, \\ K_{xz} &= \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_0 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_0 \right] / 2, \\ K_{yz} &= \left[\left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_0 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_0 \right] / 2, \end{aligned} \quad (3)$$

а также коэффициент объемного расширения

$$K_{xyz} = \left[\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_0 + \left(\frac{\partial V}{\partial y} \right)_0 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)_0 \right] / 3. \quad (4)$$

Отметим, что все девять градиентов, участвующих в системе уравнений (2), можно найти графически.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В начале, ориентируясь на рис. 1, мы отобрали РЗС с большими вертикальными скоростями, применяя ограничение $W > 15$ км/с, причем использовалось и ограничение на возраст РЗС: < 80 млн лет. Как оказалось, все отобранные РЗС лежат либо в области Скорпиона–Центавра, либо в области Тельца–Персея. В первом случае полученную группировку РЗС мы обозначаем Sco-Cen, а во втором — Per OB3–Per OB2. На рис. 2 дано распределение отобранных таким образом РЗС в проекции на галактическую плоскость xy . Эллипсами

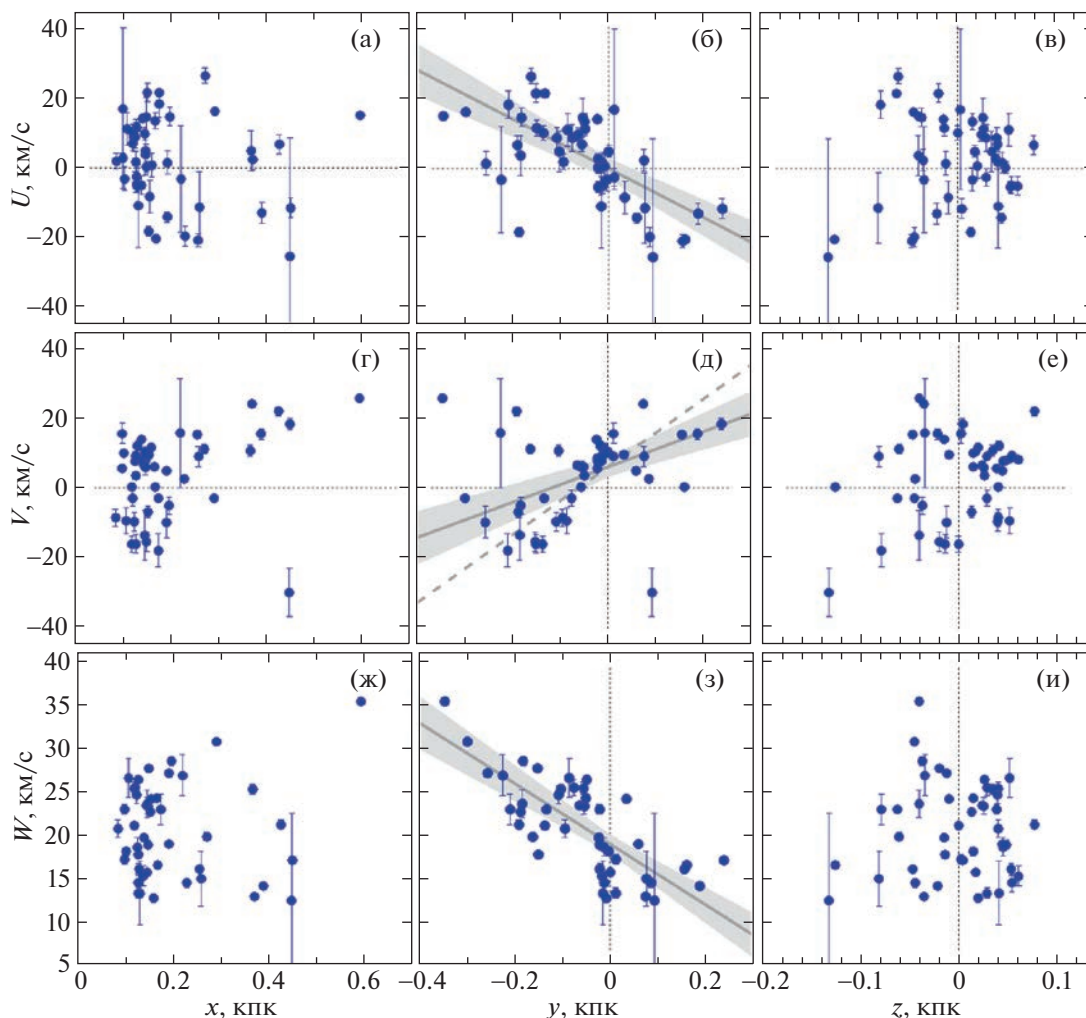


Рис. 3. Зависимости скоростей U , V , W от координат x , y , z , отобранных РЗС с большими ($W > 15$ км/с) вертикальными скоростями из области ассоциации Sco-Cen.

показано примерное положение OB-ассоциаций Sco-Cen, Per OB3, Cas-Tau и Per OB2. При указании положения ассоциаций в пространстве и на небесной сфере ориентируемся на работы де Зева и др. (1999) и Мельник, Дамбиса (2020).

OB-ассоциацию Sco-Cen обычно разделяют на три части: US (Upper Scorpius), UCL (Upper Centaurus Lupus) и LCC (Lower Centaurus Crux), центры которых находятся от Солнца на расстояниях 145, 140 и 118 пк соответственно. Практически все звезды OB-ассоциации Sco-Cen расположены в четвертом галактическом квадранте.

В рассматриваемом регионе Per OB3–Per OB2 расположены три OB-ассоциации, центры которых находятся практически на одном луче зрения: компактная ассоциация Per OB3 (α Per), значительно большая по занимаемому пространству ассоциация Cas-Tau, а также ассоциация Per OB2. Согласно де Зеву и др. (1999), движение скопления α Per согласуется с движением Cas-Tau, что

говорит о физической связи между этими двумя звездными группировками. Таким образом, ореол ассоциации Per OB3 является внутренней областью ассоциации Cas-Tau.

Ассоциация Per OB3 находится от Солнца на расстоянии около 180 пк в направлении $l \sim 150^\circ$, $b \sim -7^\circ$. Расстояние до центра ассоциации Cas-Tau составляет около 200 пк, центр лежит в направлении $l \sim 160^\circ$, $b \sim -10^\circ$. Наиболее далекая из описываемых трех ассоциаций, Per OB2, расположена на расстоянии около 300 пк, центр ее лежит в направлении $l \sim 160^\circ$, $b \sim -16^\circ$.

Область ассоциации Sco-Cen

На рис. 3 даны скорости U , V , W в зависимости от координат x , y , z отобранных РЗС с большими вертикальными скоростями из области ассоциации Sco-Cen.

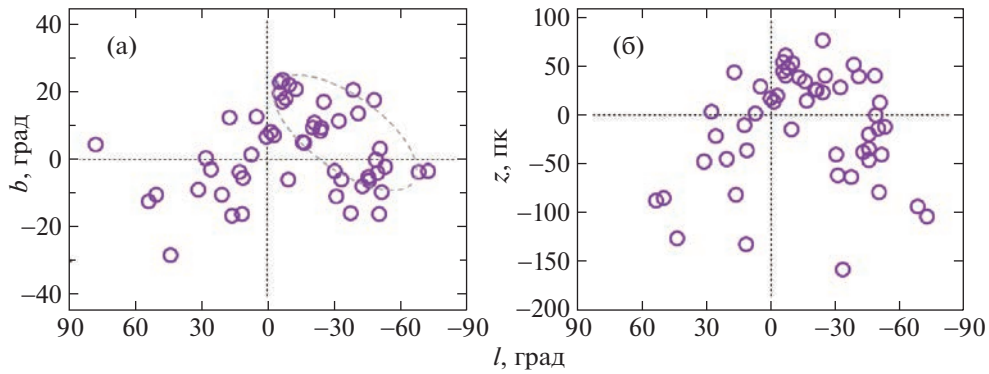


Рис. 4. (а) — Распределение отобранных РЗС вблизи области ассоциации Sco-Cep на плоскости lb , эллипсом показано примерное положение звезд этой ассоциации, (б) — распределение РЗС на плоскости lz .

В группировку в области ассоциации Sco-Cep вошли следующие 47 РЗС: HSC 151, HSC 157, HSC 191, HSC 199, HSC 310, HSC 376, HSC 2585, HSC 2603, HSC 2615, HSC 2618, HSC 2630, HSC 2636, HSC 2648, HSC 2662, HSC 2690, HSC 2733, HSC 2782, HSC 2816, HSC 2850, HSC 2900, HSC 2907, HSC 2919, HSC 2931, HSC 2963, HSC 2976, Harvard 10, OC 0666, OCSN 92, OCSN 96, OCSN 98, OCSN 100, Platais 10, Theia 67, Theia 222, Theia 436, BH 164, CWNУ 1004, CWNУ 1143, HSC 67, HSC 103, Theia 711, Theia 828, UPK 33, UPK 606, UPK 612, UPK 624 и UPK 640 со средним возрастом 28 млн лет. Распределение этих РЗС на небесной сфере дано на рис. 4. Как следует из этого рисунка, а также из рис. 2, большая часть РЗС расположена вблизи места, занимаемого ассоциацией Sco-Cep.

По скоростям 47 РЗС из области ассоциации Sco-Cep найдены три значимо отличающихся от нуля градиента: $\partial U/\partial y = -71 \pm 11$ км/с/кпк, $\partial V/\partial y = 51 \pm 12$ км/с/кпк и $\partial W/\partial y = -35 \pm 5$ км/с/кпк. Значения этих градиентов были найдены из решения условных уравнений вида $y = a + bx$ (здесь y и x — соответствующие скорости и координаты, a — постоянный член, b — соответствующий градиент) методом наименьших квадратов с двумя неизвестными a и b . Пунктирной линией на рис. 3д дана зависимость с наклоном $\partial V/\partial y = 98 \pm 20$ км/с/кпк, полученная по 30 РЗС при ограничении $|y| < 0.15$ кпк, т.е. по ядру пространственного распределения скоплений.

Из трех диагональных членов отличен от нуля только один градиент, $\partial V/\partial y = 51 \pm 12$ км/с/кпк. Это говорит о том, что расширение анализируемой подсистемы РЗС происходит вдоль оси y .

Градиенты вида $\partial U/\partial y$ и $\partial W/\partial y$ связаны с вращением звездной системы. Согласно линейной модели Огородникова—Милна (Огородников, 1965), при отсутствии деформаций, компоненты угловой

скорости вращения $\Omega_{x,y,z}$ вокруг соответствующих координатных осей могут быть найдены из системы условных уравнений (2):

$$U = 0 - \Omega_z y + \Omega_y z, \quad (5)$$

$$V = \Omega_z x + 0 - \Omega_x z,$$

$$W = -\Omega_y x + \Omega_x y + 0.$$

В итоге имеем положительное значение вращения вокруг оси z с угловой скоростью $\Omega_z = -\partial U/\partial y = -71 \pm 11$ км/с/кпк и отрицательное вращения вокруг оси x со скоростью $\Omega_x = \partial W/\partial y = -35 \pm 5$ км/с/кпк.

На рис. 5 дано схематичное распределение скоростей U , V и W для РЗС из области ассоциации Sco-Cep на трех соответствующих плоскостях. На плоскости xy распределение векторов качественно отражает найденный градиент вида $\partial U/\partial y$, тонкой стрелкой показано вращение Ω_z в направлении, противоположном вращению Галактики. Распределение скоростей V на рис. 5б отражают расширение системы РЗС вдоль оси y в соответствии с градиентом $\partial V/\partial y$.

Распределение скоростей W на рис. 5в качественно отражает найденный градиент вида $\partial W/\partial y$, тонкой стрелкой показано направление вращения вокруг оси x , Ω_x . Конечно, необходимо иметь в виду, что здесь все анализируемые РЗС имеют большие вертикальные скорости, а вращение осуществляется относительно их условного центра, имеющего скорость $W \approx 20$ км/с.

Область ассоциаций Per OB3—Per OB2

На рис. 6 даны скорости U , V , W в зависимости от координат x , y , z , отобранных РЗС с большими вертикальными скоростями из области Per OB3—Per OB2. По скоростям РЗС из этой области не найдено значимо отличающихся от нуля градиентов.

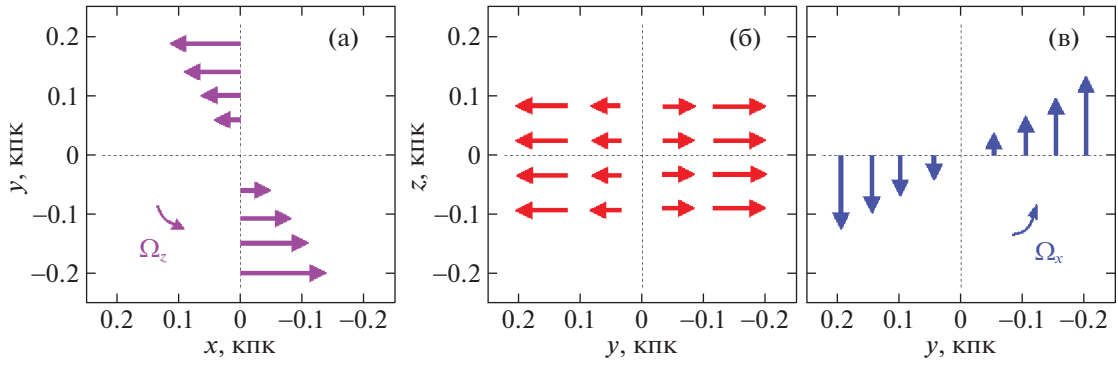


Рис. 5. Схематичное распределение скоростей U, V, W для РЗС из области ассоциации Sco-Cen: (а) — скорости U на плоскости xy , (б) — скорости V на плоскости yz , (в) — скорости W на плоскости yz .

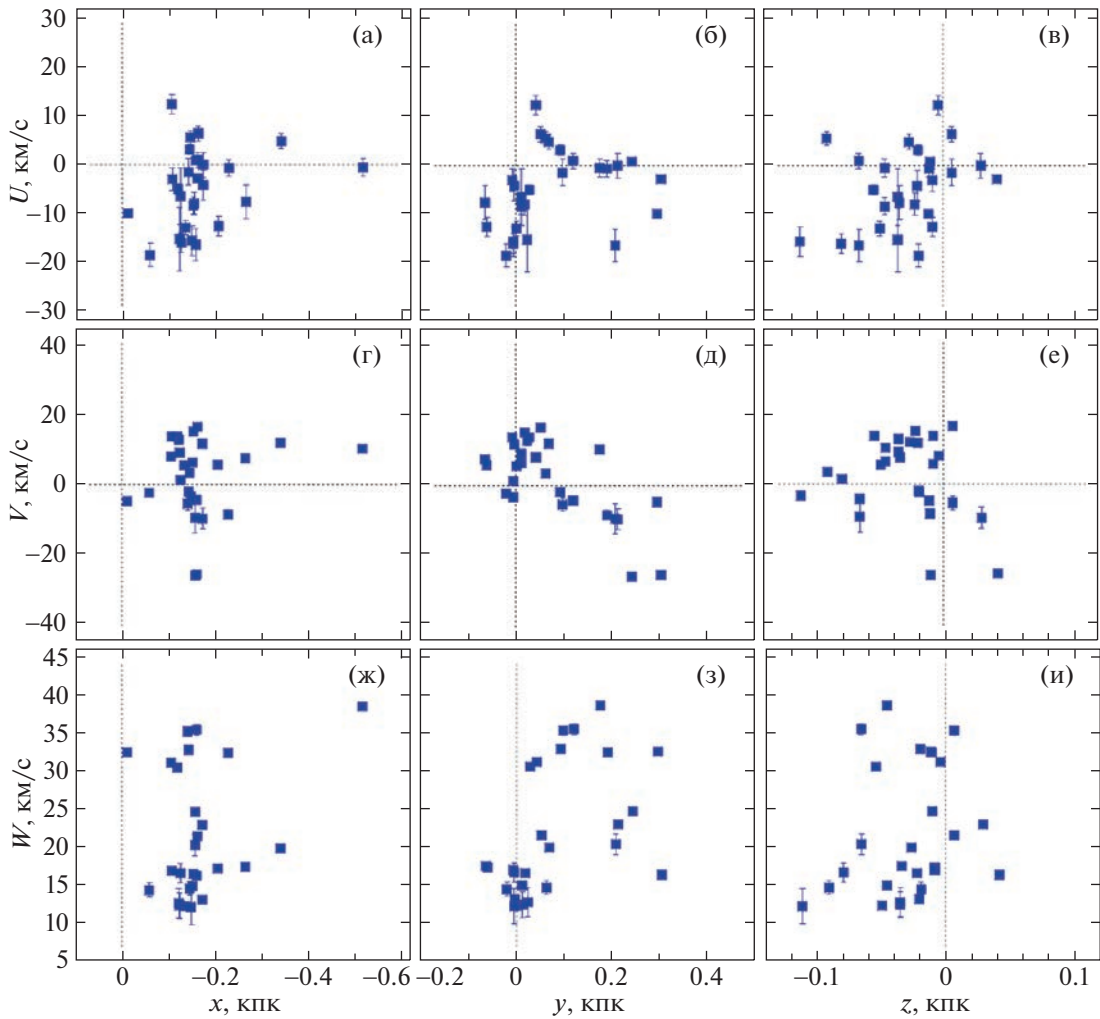


Рис. 6. Зависимости скоростей U, V, W от координат x, y, z , отобранных РЗС с большими вертикальными скоростями из области ассоциаций Per OB3–Per OB2.

В эту группировку вошли следующие 27 РЗС: HSC 1318, HSC 1426, HSC 1438, HSC 1531, CWNU 1129, HSC 940, HSC 981, HSC 1020, HSC 1553, HSC 1566, Melotte 20, Melotte 22, HSC 1040, HSC 1131, HSC 1165, HSC 1238, Theia 7, Theia 54, Theia 65, Theia 66, Theia 93, HSC 1254, HSC 1270, HSC 1279, HSC 1314, Theia 517 и UPK 303 со средним возрастом 33 млн

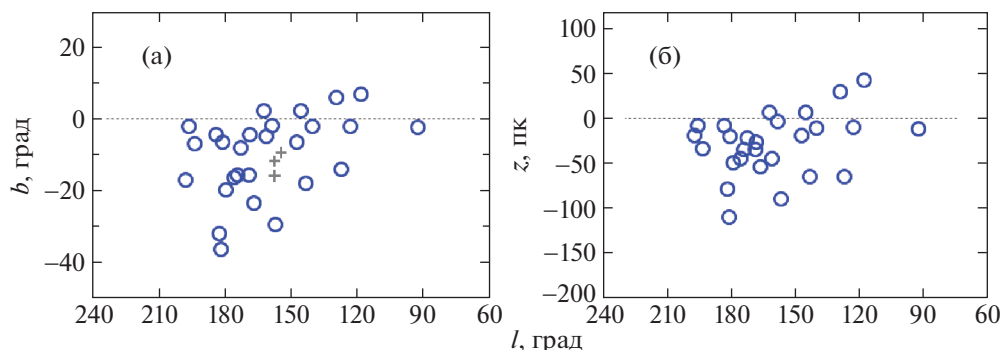


Рис. 7. (а) — Распределение отобранных РЗС вблизи области Per OB3–Per OB2 на плоскости lb , крестиками отмечены центры ассоциаций Per OB3, Cas-Tau и Per OB2, (б) — распределение РЗС на плоскости lz .

лет. Распределение этих РЗС на небесной сфере дано на рис. 7. Отметим, что Melotte 20 — это хорошо известное рассеянное звездное скопление α Per, а Melotte 22 — Плеяды.

Звезды из ассоциации Sco-Cep

Полученные в настоящей работе кинематические характеристики РЗС с относительно большими вертикальными скоростями в области ОБ-ассоциации Sco-Cep интересно сравнить с кинематическими характеристиками звезд — членов этой ассоциации. Важно выяснить, насколько тесными являются кинематические характеристики анализируемых РЗС с характеристиками звезд — наиболее вероятных членов ассоциации. Ведь в случае слабой и неорганичной связи таких характеристик для понимания обнаруженных свойств выборки РЗС необходимо привлекать механизмы, мало связанные с процессами, описывающие внутреннюю кинематику ассоциаций.

Отбор звезд, принадлежащих ОБ-ассоциации Sco-Cep, производился неоднократно на базе различных измерительных данных (Блау, 1954; де Зев и др., 1999; Сартори и др., 2003; Мельник, Дамбис, 2017; Дамиани и др., 2019; Луман, 2022).

Одной из последних в этом списке является работа Лумана (2022), в которой выполнен отбор слабых звезд — вероятных членов ОБ-ассоциации Sco-Cep. Отбор осуществлялся с использованием пространственного положения звезд, кинематических и фотометрических критериев. Каталог содержит 10 509 звезд с данными из Gaia EDR3, более 1700 из этих звезд имеют лучевые скорости, значения которых были взяты Луманом из литературы. Звезды с оценками расстояния, собственными движениями и лучевыми скоростями представляют наибольший интерес для нас, так как позволяют провести полноценный трехмерный анализ их кинематики. Отметим, что на рис. 16 работы Лумана (2022) можно видеть наличие градиентов вида $\partial U/\partial x$ и $\partial V/\partial y$.

В качестве членов ОБ-ассоциации Sco-Cep Луман рассматривал шесть следующих подсистем: UCL, LCC, US, Lupus, V1062 Sco и Ophiuchus. Эти подсистемы имеют несколько различных средний возраст: UCL — 16 млн лет (Пеко, Мамаек, 2016), LCC — 15 млн лет (Пеко, Мамаек, 2016), US — ~ 10 млн лет (Луман, Эсплин, 2020), Lupus — ~ 6 млн лет (Луман, 2022), V1062 Sco — ~ 20 млн лет (Луман, 2022), Ophiuchus — 2–6 млн лет (Луман, 2022). Важно отметить, что, согласно Луману (2022), возраст UCL и LCC составляет ~ 20 млн лет. Известно также, что оценки возраста, полученные по маломассивным звездам, отличаются от оценок, полученных по звездам большой массы. Например, по маломассивным звездам возраст US составляет ~ 5 млн лет, по звездам средней большой массы ~ 11 млн лет (Херцег, Хилленбранд, 2015).

Видим, что в ОБ-ассоциацию Sco-Cep входят три очень молодые (~ 6 млн лет) подсистемы — US, Lupus и Ophiuchus (которые и на небесной сфере расположены рядом) и три более старые (~ 20 млн лет) подсистемы — UCL, LCC и V1062 Sco.

На рис. 8а–в даны скорости U от координаты x , V — от y , W — от z для полной выборки звезд из ассоциации Sco-Cep, при этом звезды подсистем US, Lupus и Ophiuchus выделены розовым цветом. По всем звездам этой выборки были найдены значения двух следующих значимо отличающихся от нуля градиентов: $\partial U/\partial x = 31.3 \pm 2.6$ км/с/кпк и $\partial V/\partial y = 55.2 \pm 1.6$ км/с/кпк. Эти зависимости даны на соответствующих панелях с указанной заливкой доверительной областью, соответствующей уровню 1σ (здесь σ является средним квадратичным отклонением от найденной линейной зависимости). Граничное значение $y > -0.03$ кпк было использовано нами в качестве единственного условия для отбора звезд, принадлежащих подсистемам US, Lupus и Ophiuchus. В этом случае имеем

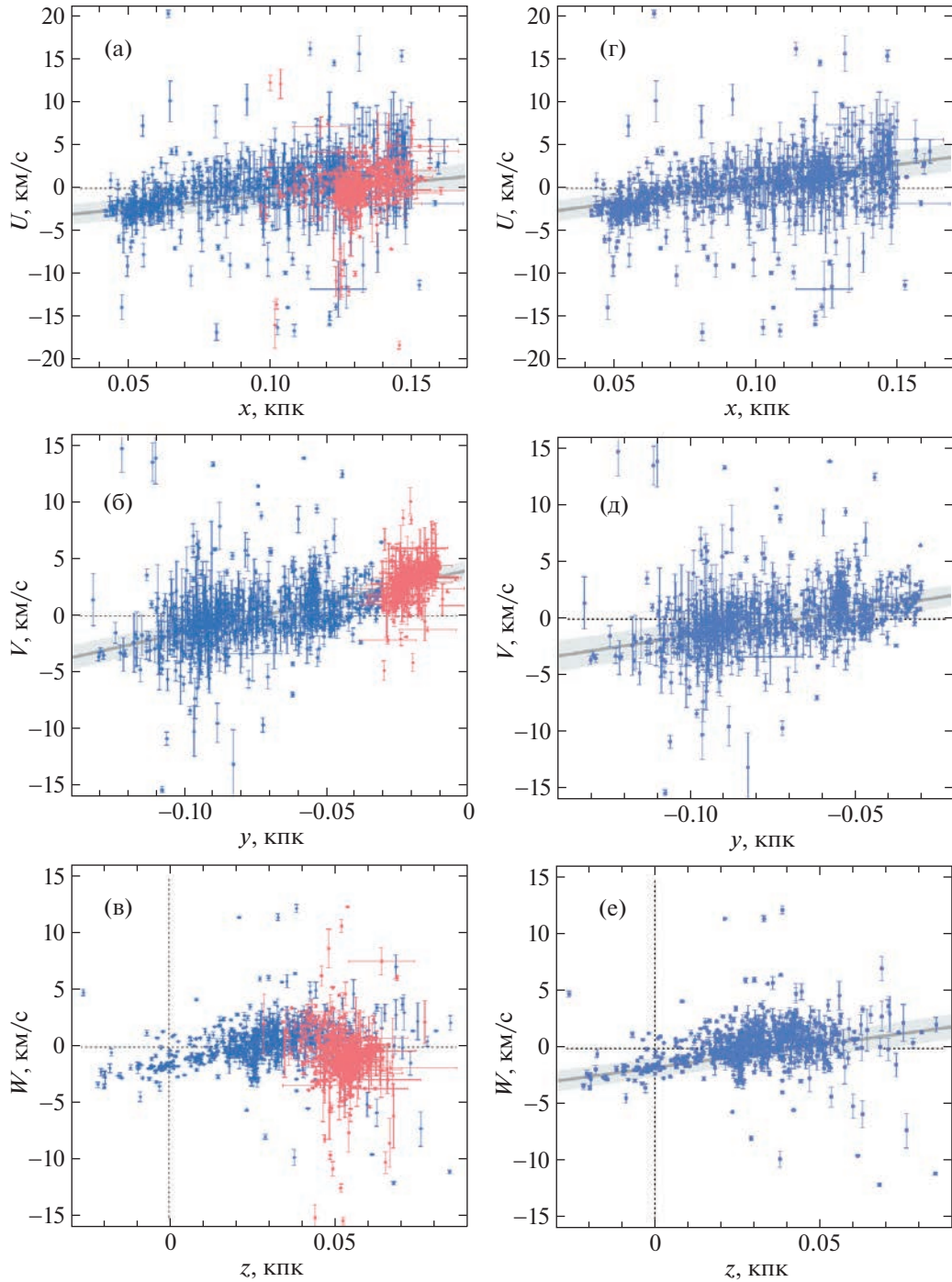


Рис. 8. Скорости U , V , W звезд из ОБ-ассоциации Sco-Cep в зависимости от координат x , y , z .

значимо отличающийся от нуля коэффициент расширения звездной системы в плоскости xy (3):

$$K_{xy} = 43.2 \pm 2.2 \text{ км/с/кпк}. \quad (6)$$

На рис. 8г–е даны скорости U от координаты x , V — от y , W — от z для выборки звезд из ассоциации Sco-Cep, которая не включает члены US, Lupus и Ophiuchus. По звездам этой выборки были найдены значения трех следующих градиен-

тов: $\partial U/\partial x = 44.6 \pm 3.3 \text{ км/с/кпк}$, $\partial V/\partial y = 44.9 \pm 3.8 \text{ км/с/кпк}$ и $\partial W/\partial z = 40.2 \pm 3.1 \text{ км/с/кпк}$. Эти зависимости даны на соответствующих панелях с указанной заливкой доверительной областью, соответствующей уровню 1σ . В этом случае имеем значимо отличающийся от нуля коэффициент расширения не только в каждой из трех плоскостей (3), но и коэффициент объемного расширения звездной

системы (4):

$$K_{xyz} = 43.2 \pm 3.4 \text{ км/с/кпк}. \quad (7)$$

ОБСУЖДЕНИЕ

При кинематическом анализе звезд в ассоциации Sco-Cep Бобылевым, Байковой (2020) было найдено значение коэффициента расширения системы $K = 39 \pm 2 \text{ км/с/кпк}$. Этот коэффициент имеет смысл K_{xy} (см. соотношение (3)), так как был использован подход с четырьмя постоянными Оорта A , B , C и K , которые и описывают кинематику в этой плоскости.

Определение же трехмерного коэффициента расширения K_{xyz} (см. соотношение (4)) в литературе можно встретить крайне редко. В этой связи интересно отметить работу Армстронга и др. (2020), где для популяции “В” молодых звезд из области ассоциации Vel OB2 были найдены значения трех следующих градиентов: $\partial U/\partial x = 98 \pm 21 \text{ км/с/кпк}$, $\partial V/\partial y = 44 \pm 7 \text{ км/с/кпк}$ и $\partial W/\partial z = 69 \pm 11 \text{ км/с/кпк}$. В таком случае можем оценить значение $K_{xyz} = 70 \pm 8 \text{ км/с/кпк}$. Принимая радиус ассоциации 0.05 кпк , согласно рис. 7 из работы этих авторов, получаем оценку линейной скорости объемного расширения ассоциации на ее внешней границе $3.5 \pm 0.4 \text{ км/с}$.

Одним из первых эффект расширения OB-ассоциации Sco-Cep оценил Блау (1964). По данным о молодых массивных звездах спектрального класса В он нашел угловой коэффициент ее линейного расширения $K_{xy} = 50 \text{ км/с/кпк}$, что позволило оценить время расширения 20 млн лет .

Интересно отметить работу Райта, Мамаева (2018), которые протестировали кинематику ассоциации Sco-Cep несколькими методами с использованием данных о звездах из каталога Gaia DR1 (Коллаборация Gaia, 2016). В частности, рассмотрели метод поиска коэффициента линейного расширения по лучевым скоростям звезд, а также экстраполировали назад орбиты звезд с целью найти момент наименьшей области их пространственной концентрации. Удивительно, но эти авторы не нашли признаков расширения ассоциации.

Наоборот, Голдман и др. (2018) показали наличие расширения звезд в подгруппе LCC с коэффициентом $K_{xy} \sim 35 \text{ км/с/кпк}$. Бобылев, Байкова (2007) нашли $K_{xy} = 46 \pm 8 \text{ км/с/кпк}$ по массивным звездам ассоциации Sco-Cep с данными из каталога Hipparcos (1997). А в работе Бобылева, Байковой (2020) оценка $K_{xy} = 39 \pm 2 \text{ км/с/кпк}$ была получена с учетом влияния галактической

спиральной волны плотности по звездам из каталога Gaia DR2, и показано отсутствие заметного вращения ассоциации.

Таким образом, найденное нами по звездам значение коэффициента расширения OB-ассоциации Sco-Cep в плоскости xy $K_{xy} = 43.2 \pm 2.2 \text{ км/с/кпк}$ (6) находится в хорошем согласии с результатами других авторов. А вот оценка коэффициента объемного расширения более старой подсистемы OB-ассоциации Sco-Cep $K_{xyz} = 43.2 \pm 3.4 \text{ км/с/кпк}$ (7) является новой.

Результаты, полученные из анализа звезд и РЗС в области OB-ассоциации Sco-Cep, показывают, что отличающиеся по возрасту группировки обладают различной кинематикой. Звездное ядро ассоциации, состоящее из UCL, LCC и V1062 Sco, показывает практически однородное расширение во всех плоскостях, а также расширение во все стороны. Более молодая звездная фракция ассоциации, состоящая из US, Lupus и Ophiuchus, имеет своеобразное движение по координате z и демонстрирует расширение в плоскости xy . Наиболее старая часть OB-ассоциации Sco-Cep, состоящая из РЗС с большими вертикальными скоростями со средним возрастом $\sim 28 \text{ млн лет}$, показывает эффекты расширения вдоль оси y , а также вращения вокруг осей x и z . На основе рис.4б складывается впечатление, что РЗС с большими вертикальными скоростями очерчивают внешнюю границу OB-ассоциации Sco-Cep.

С другой стороны, появление РЗС с большими вертикальными скоростями, по-видимому, связано с более масштабным процессом. Как видим, таким процессом затронута область, сопоставимая с областью, занимаемой поясом Гулда ($r < 0.6 \text{ кпк}$). Здесь известна также волна Рэдклиффа (Алвес и др., 2020), которая проявляется в виде вертикальных возмущений положений и скоростей молодых звезд и РЗС (Бобылев и др., 2022а). Причем конкретный механизм, вызвавший такие возмущения, пока не известен. Например, Флек (2020) предлагает связать происхождение волны Рэдклиффа с неустойчивостью Кельвина–Гельмгольца. Маршалл, Мартин (2023) рассматривают возникновение волны Рэдклиффа в рамках формирования Северного Полярного Шпура (North Celestial Pole Loop). Большая же часть исследователей (Видроу и др., 2012; Беннет, Бови, 2018; Туласидхаран и др., 2022) придерживается предположения о том, что возмущения вертикальных координат и вертикальных скоростей звезд в галактическом диске могли быть вызваны гравитационным воздействием ударника типа карликовой галактики-спутника Млечного Пути.

Мы нашли, что кинематические свойства РЗС с большими вертикальными скоростями сильно отличаются от внутренней кинематики звезд, принадлежащих ОВ-ассоциации Sco-Cep. В следующей работе мы планируем отобрать из каталога Хант, Рефферт (2023) РЗС, лежащие в области волны Рэдклиффа, и выполнить их спектральный анализ (как это было сделано по выборке мазеров в работе Бобылева и др., 2022б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучена кинематика уникальной выборки молодых (моложе 80 млн лет) РЗС с большими вертикальными скоростями, $15 < W < 40$ км/с. Расположены эти скопления в области $r < 0.6$ кпк. Кинематические характеристики этих РЗС взяты нами из каталога Хант, Рефферт (2023), где средние значения их собственных движений, лучевых скоростей и расстояний были вычислены по данным каталога Gaia DR3. Установлено, что отобранные таким образом молодые РЗС расположены в области близких к Солнцу ОВ-ассоциаций. Одна группировка расположена в области ассоциации Sco-Cep, вторая — в области ассоциаций Per OB3, Cas-Tau и Per OB2, которую мы обозначили как Per OB3–Per OB2.

Показано, что эффект расширения группировки РЗС из 47 членов в области ассоциации Sco-Cep происходит вдоль оси y , $\partial V/\partial y = 51 \pm 12$ км/с/кпк. Причем ядро выборки, состоящее из 30 РЗС, демонстрирует еще большее значение, $\partial V/\partial y = 98 \pm 20$ км/с/кпк. Эта группировка обладает также положительным вращением вокруг оси z с угловой скоростью $\Omega_z = 71 \pm 11$ км/с/кпк и отрицательным вращением вокруг оси x со скоростью $\Omega_x = -35 \pm 5$ км/с/кпк. По скоростям 27 РЗС из области ассоциаций Per OB3–Per OB2 не найдено значимо отличающийся от нуля градиентов.

Изучены около 1700 звезд, отобранных Луманом (2022) в качестве вероятных членов ОВ-ассоциации Sco-Cep. По всем звездам этой выборки были найдены два значимо отличающихся от нуля градиента: $\partial U/\partial x = 31.3 \pm 2.6$ км/с/кпк и $\partial V/\partial y = 55.2 \pm 1.6$ км/с/кпк. В этом случае имеем значимо отличающийся от нуля коэффициент расширения звездной системы в плоскости xy : $K_{xy} = 43.2 \pm 2.2$ км/с/кпк. Эти звезды не обладают большими вертикальными скоростями.

По звездам трех группировок UCL, LCC и V1062 Sco со средним возрастом около 20 млн лет найдены значения трех следующих градиентов: $\partial U/\partial x = 44.6 \pm 3.3$ км/с/кпк, $\partial V/\partial y = 44.9 \pm 3.8$ км/с/кпк и $\partial W/\partial z = 40.2 \pm 3.1$ км/с/кпк.

В этом случае значимо отличается от нуля коэффициент объемного расширения звездной системы $K_{xyz} = 43.2 \pm 3.4$ км/с/кпк. Оценка этого параметра сделана впервые.

Авторы благодарны рецензентам за полезные замечания, которые способствовали улучшению работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алвес и др. (J. Alves, C. Zucker, A.A. Goodman, J.S. Speagle, St. Meingast, Th. Robitaille, D.P. Finkbeiner, E.F. Schlafly, and G.M. Green), *Nature* **578**, 237 (2020).
2. Армстронг и др. (J.J. Armstrong, N.J. Wright, R.D. Jeffries, and R.J. Jackson), *MNRAS* **494**, 4794 (2020).
3. Армстронг и др. (J.J. Armstrong, N.J. Wright, R.D. Jeffries, R.J. Jackson, and T. Cantat-Gaudin), *MNRAS* **517**, 5704 (2022).
4. Беннет, Бови (M. Bennett and J. Bovy), *MNRAS* **482**, 1417 (2018).
5. Блаау (A. Blaauw), *Astron. J.* **59**, 317 (1954).
6. Блаау (A. Blaauw), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **2**, 213 (1964).
7. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **33**, 643 (2007) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **33**, 571 (2007)].
8. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Астрон. журн. **97**, 301 (2020) [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Rep.* **64**, 326 (2020)].
9. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Мишуров Ю.Н., Письма в Астрон. журн. **48**, 553 (2022)б [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, and Yu.N. Mishurov, *Astron. Lett.* **48**, 434 (2022)б].
10. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Мишуров Ю.Н., Астрофизика **65**, 603 (2022)а [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, and Yu.N. Mishurov, *Astrophysics* **65**, 579 (2022)а].
11. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **49** (2023) в печати [V.V. Bobylev and A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **49** (2023) in press].
12. Видроу и др. (L.M. Widrow, S. Gardner, B. Yanny, S. Dodelson, and H.-Y. Chen), *Astrophys. J. Lett.* **750**, L41 (2012).
13. Голдман и др. (B. Goldman, S. Röser, E. Schilbach, A.C. Moor, and T. Henning), *Astrophys. J.* **868**, 32 (2018).
14. Дамиани и др. (F. Damiani, L. Prisinzano, I. Pillitteri, G. Micela, and S. Sciortino), *Astron. Astrophys.* **623**, A112 (2019).
15. Де Зев и др. (P.T. de Zeeuw, R. Hoogerwerf, J.H.J. de Bruijne, A.G.A. Brown, and A. Blaauw), *Astron. J.* **117**, 354 (1999).
16. Доббс и др. (C.L. Dobbs, T.J.R. Bending, A.R. Pettitt, A.S.M. Buckner, and M.R. Bate), *MNRAS* **517**, 675 (2022).
17. Зиннекер, Йорк (H. Zinnecker and H.W. Yorke), *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 481 (2007).

18. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, N.J. Wright, J.J. Armstrong, A. Vallenari, L. Balaguer-Nunez, P. Ramos, D. Bossini, et al.), *Astron. Astrophys.* **626**, 17 (2019).
19. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **595**, A2 (2016).
20. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
21. Коллаборация Gaia (Gaia Collaboration, A. Vallenari, A.G.A. Brown, T. Prusti, et al.), arXiv: 2208.0021 (2022).
22. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), *Astrophys. J.* **870**, 32 (2019).
23. Луман, Эсплин (K.L. Luhman and T.L. Esplin), *Astron. J.* **160**, 44 (2020).
24. Луман (K.L. Luhman), *Astron. J.* **163**, 24 (2022).
25. Маршал, Мартин (A. Marchal and P.G. Martin), *Astrophys. J.* **942**, 70 (2023).
26. Мельник, Дамбис (A.M. Mel'nik and A.K. Dambis), *MNRAS* **472**, 3887 (2017).
27. Мельник А.М., Дамбис А.К., *Астрон. журн.* **95**, 895 (2018) [A.M. Mel'nik, A.K. Dambis, *Astron. Rep.* **62**, 998 (2018)].
28. Мельник, Дамбис (A.M. Mel'nik and A.K. Dambis), *MNRAS* **493**, 2339 (2020).
29. Огородников К.Ф., *Динамика звездных систем* (М.: Физматгиз, 1965). [K.F. Ogorodnikov, *Dynamics of stellar systems* (Oxford: Pergamon, ed. Beer, A. 1965)].
30. Пеко, Мамаек (M.J. Pecaute and E.E. Mamajek), *MNRAS* **461**, 794 (2016).
31. Прайбыш, Зиннекер (T. Preibish and H. Zinnecker), *Astron. J.* **117**, 2381 (1999).
32. Райт, Мамаек (N.J. Wright and E.E. Mamajek), *MNRAS* **476**, 381 (2018).
33. Райт (N.J. Wright), *New Astron. Rev.* **90**, id. 101549 (2020).
34. Рао и др. (A. Rao, P. Gandhi, C. Knigge, J.A. Paice, W.C. Leigh, and D. Boubert), *MNRAS* **495**, 1491 (2020).
35. Сартори и др. (M.J. Sartori, J.R.D. Lépine, and W.S. Dias), *Astron. Astrophys.* **404**, 913 (2003).
36. Туласидхаран и др. (L. Thulasidharan, E. D'Onghia, E. Poggio, R. Drimmel, J.S. Gallagher, III, C. Swiggum, R.A. Benjamin, and J. Alves), *Astron. Astrophys.* **660**, 12 (2022).
37. Фейгельсон (E.D. Feigelson), arXiv: 1704.0811 (2017).
38. Флек (R. Fleck), *Nature* **583**, 24 (2020).
39. Хант, Рефферт (E.L. Hunt and S. Reffert), *Astron. Astrophys.* **673**, A114 (2023).
40. Херцер, Хилленбранд (G.J. Herczeg and L.A. Hillenbrand), *Astrophys. J.* **808**, 23 (2015).
41. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).