

АНАЛИЗ ИЗБРАННЫХ УБЕГАЮЩИХ ЗВЕЗД В ТУМАННОСТИ ОРИОНА ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА GAIA EDR3

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

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

Поступила в редакцию 15.02.2021 г.

После доработки 03.03.2021 г.; принята к публикации 04.03.2021 г.

Выполнено статистическое моделирование траекторий ряда убегающих звезд с использованием значений их параллаксов и собственных движений из каталога Gaia EDR3. Подтверждена гипотеза о том, что звезды AE Aig и μ Col являются продуктом распада кратной системы около 2.5 млн лет назад и Трапедия Ориона может являться родительским скоплением для этой пары звезд. Показано, что данные из каталога Gaia EDR3 для звезды ι Ori, главным образом, значение параллакса, не позволяют говорить о распаде кратной системы AE Aig, μ Col и ι Ori. Подтверждено наличие тесных парных сближений между звездами HD 30112 и HD 43112 около 1 млн лет назад. Результаты тесных тройных сближений подтверждают гипотезу о том, что звезды HD 30112 и HD 43112 вылетели из родительского скопления Col 69. Показано, что звезды HIP 28133 и TYC 5368-1541-1 имеют ненулевую вероятность вылета из области радиусом 10 пк от центра скопления Трапедия Ориона и достаточно высокую вероятность (около 8%) того, что обе они находились на расстояниях менее 20 пк от центра Трапедии Ориона примерно 2.5 млн лет назад. Впервые установлено, что звезды Gaia EDR3 3021115184676332288 и Gaia EDR3 2983790269606043648 имеют вероятность около 0.5% того, что примерно 1.1 млн лет назад они распались как двойная система. Звезда Gaia EDR3 3021115184676332288 имеет вероятность около 16% того, что она вылетела из области радиусом 10 пк от центра скопления Трапедии Ориона примерно 1 млн лет назад.

Ключевые слова: убегающие звезды, Туманность Ориона, Трапедия Ориона, Col 69.

DOI: 10.31857/S0320010821040021

ВВЕДЕНИЕ

В пионерской работе Блау, Моргана (1954) было показано, что две звезды, AE Aig и μ Col, разлетаются в противоположные стороны с большими скоростями: более 100 км/с. А их траектории, продолженные в прошлое, пересекаются около 2.6 млн лет назад в области Туманности Ориона. Работа Блау, Моргана вызвала большой интерес исследователей к вопросам, связанным с обнаружением и изучением молодых убегающих звезд не только в районе ассоциации Ориона, но и в других ОВ-ассоциациях, расположенных вблизи Солнца (Хугерверф и др., 2001; Тецлаф и др., 2011; Маис-Апельянис и др., 2018). На данный момент обнаружены десятки звезд, убегающие радиально из центра Туманности Ориона с большими скоростями (Макбрайд, Кункель, 2019; Платаис и др., 2020; Фариас и др., 2020; Шоттлер и др., 2020).

Анализ данных каталога Hipparcos (1997) позволил Хугерверфу и др. (2001) заключить, что

наблюдаемые свойства трех убегающих звезд — AE Aig, μ Col и ι Ori согласуются с их общим происхождением около 2.5 млн лет назад. Проведенное этими авторами статистическое моделирование показало, что родительское скопление для этих трех звезд тесно связано с Трапедией Ориона. Они также отметили, что наиболее вероятным механизмом, создавшим большие скорости звезд, являются столкновение и разрушение двух двойных систем. Такой сценарий был предложен в работе Гиса, Болтона (1986).

В районе Туманности Ориона известны еще несколько знаковых беглецов. Например, Хугерверф и др. (2001) показали, что звезды HD 30112 и HD 43112 были выброшены из компактного рассеянного звездного скопления Col 69 (λ Ori). В центре Туманности Ориона расположена туманность Клейнманна–Лоу (Kleinmann–Low, KL), содержащая источник радио- и инфракрасного излучения, известный как объект Беклина–Нойгебауэра (Becklin, Neugebauer, BN). Здесь, в области под названием Орион BN/KL, наблюдается разлет нескольких источников. В частности,

* Электронный адрес: vbobylev@gaoran.ru

Родригес и др. (2017) нашли, что распад кратной звездной системы произошел в XV в., а именно, в 1475 ± 6 году.

Трапеция Ориона является массивным компактным рассеянным звездным скоплением, которое расположено в самом центре Туманности Ориона — в поясе Ориона. Это скопление содержит ряд очень молодых массивных звезд. Наиболее яркие компоненты θ^1 Ori: *A, B, C, D* и *E* на видимом небе образуют фигуру в виде трапеции. Известно, что эта кратная система не является гравитационно-устойчивой (Оливарес и др., 2013; Аллен и др., 2017).

AE Aug ($V = 5^m.96$) и μ Col ($V = 5^m.18$) являются одиночными молодыми массивными звездами, обе относятся к спектральному классу O9.5V. Известно, что ι Ori ($V = 2^m.77$) — это кратная система, состоящая из четырех компонентов (Маис-Апельянис, Барба 2020). Главный компонент Aa является спектрально-двойной, состоящей из звезд спектрального класса O9 III и B1 III (Марченко и др., 2000), компонент Ab — это звезда спектрального класса B2 IV, а самый далекий компонент системы B является звездой спектрального класса B2 V.

Для моделирования пространственных звездных траекторий важнейшее значение имеет точность параллакса и собственных движений звезд. В настоящее время появилась версия каталога Gaia EDR3 (Gaia Early Data Release 3, Браун и др., 2020; Линдегрэн и др., 2020) в которой по сравнению с предыдущей версией, Gaia DR2 (Браун и др., 2018), уточнены примерно на 30% значения тригонометрических параллаксов и собственных движений для около 1.5 млрд звезд.

Целью настоящей работы является анализ траекторий ряда убегающих звезд с использованием современных данных из каталога Gaia EDR3. Мы хотим выяснить, насколько тесными были сближения между этими звездами, а также насколько тесными могли быть сближения звезд с центром предполагаемого родительским рассеянного скопления. Для решения этой задачи были выбраны два молодых рассеянных звездных скопления в области Ориона — Трапеция Ориона и Col 69.

ДАННЫЕ

AE Aug, μ Col и ι Ori. В табл. 1 даны измененные характеристики звезд AE Aug (HD 34078, Hip 24575), μ Col (HD 38666, Hip 27204) и ι Ori (HD 37043, Hip 26241), взятые из нескольких источников. Во-первых, это каталог Hipparcos (1997), с которыми работали Хугерверф и др. (2001), во-вторых, каталог Gaia DR2 (Браун и др., 2018), который был использован в работе

Шоттлер и др. (2020) при поиске убегающих звезд, в третьих, это каталог Gaia EDR3, и, наконец, РСДБ-измерения для Туманности Ориона, которые обладают высокой точностью измерения тригонометрических параллаксов и собственных движений радиозвезд, а также мазерных источников.

Видим, что для звезды AE Aug нет значительных различий в исходных данных. Гелиоцентрическое расстояние $d = 1/\pi$, вычисленное для звезды μ Col по данным из каталога Gaia EDR3, существенно превышает найденное по каталогу Hipparcos (1997). Кроме того, видно, что случайные ошибки параметров звезд AE Aug и μ Col в каталоге Gaia EDR3 примерно в два раза меньше по величине, чем в каталоге Gaia DR2, и в 5–10 раз меньше, чем в каталоге Hipparcos (1997). Важно отметить, что у звезд AE Aug и μ Col относительные ошибки параллаксов (а соответственно, и расстояний), указанные в последней колонке табл. 1, не превышают 5%. Поэтому для этих звезд нет необходимости учитывать поправку Лутца–Келкера (1973), которая сильно зависит от значения ошибок параллаксов.

А вот значения собственных движений для звезды ι Ori сильно различаются по данным каталогов Hipparcos (1997) и Gaia EDR3. Причем меньшие случайные ошибки параметров для этой звезды — в каталоге Hipparcos (1997). Таким образом, новое моделирование представляет большой интерес. В настоящей работе для этой звезды мы используем значение ее системной гелиоцентрической лучевой скорости из работы Марченко и др. (2000).

Наконец, в табл. 1 даны значения собственных движений и тригонометрического параллакса, измеренные РСДБ-методом. Эти данные взяты нами из работы Рида и др. (2019). Здесь усреднены радионаблюдения нескольких радиозвезд и мазерных источников, которые наблюдались в Туманности Ориона. В основном, это были звезды типа Т Тельца. Эти данные относятся к центру Туманности Ориона и Трапеции Ориона, в частности. Значение тригонометрического параллакса (а значит, и расстояния) определено здесь с очень высокой точностью. Значение гелиоцентрической лучевой скорости взято нами из работы Харченко и др. (2005), которое было вычислено по звездам Трапеции Ориона. Отметим, что в работе Шоттлер и др. (2020) для центра Туманности Ориона были использованы несколько другие значения собственных движений и лучевой скорости $\mu_\alpha \cos \delta = 1.51 \pm 0.11$ мсд/год, $\mu_\delta = 0.50 \pm 0.12$ мсд/год и $V_r = 21.8 \pm 6.6$ км/с, которые они взяли из работы Куна и др. (2019). Используемые нами значения собственных движений и лучевых скоростей

Таблица 1. Исходные кинематические характеристики звезд, взятые из различных каталогов, $\mu_\alpha^* = \mu_\alpha \cos \delta$

Звезда	Hipparcos (1997)	Gaia DR2	Gaia EDR3	РСДБ
AE Aur				
μ_α^* , мсд/год	-4.05 ± 0.66	-4.440 ± 0.115	-4.747 ± 0.046	
μ_δ , мсд/год	43.22 ± 0.44	43.368 ± 0.081	43.538 ± 0.033	
π , мсд	2.24 ± 0.74	2.464 ± 0.066	2.574 ± 0.034	
V_r , км/с	57.5 ± 1.2 (а)		56.7 ± 0.6 (б)	
d , пк	446^{+220}_{-111}		388^{+6}_{-5}	
μ Col				
μ_α^* , мсд/год	3.01 ± 0.52	2.988 ± 0.279	3.271 ± 0.095	
μ_δ , мсд/год	-22.62 ± 0.50	-22.030 ± 0.291	-22.176 ± 0.110	
π , мсд	2.52 ± 0.55	2.148 ± 0.162	1.702 ± 0.090	
V_r , км/с	109.0 ± 2.5 (в)		109.0 ± 1.8 (г)	
d , пк	397^{+110}_{-70}		588^{+32}_{-30}	
ι Ori				
μ_α^* , мсд/год	2.27 ± 0.65		-2.816 ± 1.022	
μ_δ , мсд/год	-0.62 ± 0.47		-1.693 ± 0.833	
π , мсд	2.46 ± 0.77		1.997 ± 0.730	
V_r , км/с	28.7 ± 1.1 (д)		31.3 ± 1.2 (е)	
d , пк	406^{+185}_{-96}		501^{+288}_{-134}	
Трапедия Ориона				
μ_α^* , мсд/год				3.14 ± 3.06
μ_δ , мсд/год				-1.19 ± 3.71
π , мсд				2.421 ± 0.019
V_r , км/с				28.9 ± 2.7 (ж)
d , пк				413^{+3}_{-4}

Примечание. Лучевые скорости взяты из работ: (а), (в) и (д) — Хугерверфа и др. (2001), (б) — Харченко и др. (2007), (г) — Гончарова (2006), (е) — Марченко и др. (2000), (ж) — Харченко и др. (2005).

для Трапедии Ориона таковы, что при статистическом моделировании покрывается широкий диапазон значений, куда попадают и значения из работы Куна и др. (2019).

С использованием данных каталога Gaia DR2 в работах Шоттлера и др. (2020) и Фариаса и др. (2020) было выделено несколько десятков подходящих кандидатов в убегающие звезды, которые могли в прошлом вылететь из Туманности Ориона.

Из этих публикаций мы отобрали такие звезды, которые, во-первых, обладают значительной (более 35 км/с) скоростью убегания от Туманности Ориона, во-вторых, имеют измеренные лучевые скорости и, в-третьих, имеют измерения в каталоге Gaia EDR3. Наиболее интересные из отобранных звезд даны в табл. 2. Эти звезды в настоящей работе использованы, в частности, для поиска возможного члена кратной системы, содержащей AE Aur и

Таблица 2. Исходные кинематические характеристики, взятые из каталога Gaia EDR3, для убегающих звезд из списков Шоттлера и др. (2020) и Фариаса и др. (2020)

Gaia EDR3	π , мсд	$\mu_\alpha \cos \delta$, мсд/год	μ_δ , мсд/год	V_r , км/с
3012438796685305728	2.403 ± 0.016	20.116 ± 0.015	-21.574 ± 0.014	0.0 ± 6.8
2986587942582891264	2.616 ± 0.039	-16.632 ± 0.037	-22.102 ± 0.035	-21.3 ± 6.6
2989899774685582592	2.199 ± 0.014	-11.062 ± 0.013	-12.579 ± 0.011	3.5 ± 6.6
2998537847270106240	2.307 ± 0.017	10.916 ± 0.015	-10.408 ± 0.014	45.3 ± 6.6
3003060825792025088	2.425 ± 0.015	15.327 ± 0.017	-4.445 ± 0.015	36.9 ± 6.7
3021115184676332288	2.510 ± 0.013	29.568 ± 0.015	2.294 ± 0.013	31.9 ± 0.8
2983790269606043648	2.752 ± 0.012	-3.901 ± 0.010	-34.407 ± 0.011	16.6 ± 1.4

Таблица 3. Исходные кинематические характеристики звезд, связанных со скоплением Col 69, взятые из каталога Gaia EDR3

Объект	π , мсд	$\mu_\alpha \cos \delta$, мсд/год	μ_δ , мсд/год	V_r , км/с	Ref V_r
HD 43112	2.566 ± 0.082	25.786 ± 0.087	11.591 ± 0.070	36.9 ± 0.7	(а)
HD 30112	2.765 ± 0.047	-45.744 ± 0.051	-31.284 ± 0.041	9.0 ± 4.4	(а)
Col 69	2.551 ± 0.090	0.741 ± 0.236	-2.015 ± 0.165	27.5 ± 0.4	(б)

Примечание. (а) — Гончаров (2006), (б) — Карера и др. (2019).

μ Col, возможно ι Ori, а возможно и еще какой-либо член.

HD 30112, HD 43112 и Col 69. Убегающие звезды HD 30112 ($V = 7^m22$) и HD 43112 ($V = 5^m89$) — это молодые массивные звезды спектрального класса B3/5V и B1V соответственно. Рассеянное звездное скопление Col 69 довольно богато звездами. Согласно Кантат-Гудин и др. (2018), в это скопление входят 669 звезд из каталога Gaia DR2.

В табл. 3 для звезд HD 30112 (HIP 22061), HD 43112 (HIP 29678) и скопления Col 69 приведены их тригонометрические параллаксы и собственные движения, взятые из каталога Gaia EDR3. Для вычисления средних значений тригонометрического параллакса и собственных движений скопления Col 69 нами были взяты измерения из каталога Gaia EDR3. Для этого из каталога Кантат-Гудин и др. (2018) были отобраны несколько десятков звезд с вероятностью принадлежности скоплению более 0.9 в радиусе от центра скопления $7'$, имеющие номера по каталогу Gaia DR2.

МЕТОД

Осесимметричный потенциал Галактики Φ , в котором вычисляются траектории звезд в прошлое, представляется в виде суммы трех составляющих — центрального сферического балджа Φ_b , диска Φ_d и массивного сферического гало темной материи Φ_h :

$$\Phi = \Phi_b + \Phi_d + \Phi_h. \quad (1)$$

Потенциалы балджа Φ_b и диска Φ_d представляются в форме, предложенной Миямото, Нагаи (1975), а компонента гало представляется согласно работе Наварро и др. (1997). Конкретные значения параметров этой модели галактического потенциала приведены в работе Байковой, Бобылева (2016), где она обозначена как модель III.

В гелиоцентрической системе координат ось x направлена в сторону галактического центра, ось y — в сторону галактического вращения и ось z — в северный полюс Галактики. Тогда $x = d \cos l \cos b$, $y = d \sin l \cos b$ и $z = d \sin b$, где $d = 1/\pi$ — гелиоцентрическое расстояние звезды в кпк, которое мы вычисляем через параллакс звезды π в мсд.

Галактические орбиты звезд строятся в системе координат, связанной с местным стандартом покоя. Поэтому из исходных скоростей исключается пекулярная скорость Солнца со значениями $(U, V, W)_{\odot} = (11.0, 12.0, 7.2)$ км/с из работы Шонриха и др. (2010). Учитывается также возвышение Солнца над галактической плоскостью $h_{\odot} = 16$ пк (Бобылев, Байкова, 2016).

Для каждой пары звезд вычисляется параметр сближения между их орбитами $\Delta d(t) = \sqrt{\Delta x^2(t) + \Delta y^2(t) + \Delta z^2(t)}$. Затем определяем параметры Δd_{\min} на момент сближения t_{\min} . Ошибки определения Δd_{\min} и t_{\min} оцениваем с использованием метода Монте-Карло. Предполагается, что ошибки параметров звезд распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением σ . Ошибки добавляются в компоненты собственного движения, параллакс и лучевую скорость звезды.

При рассмотрении тройных сближений, следуя Хугерверфу и др. (2001), расстояние между тремя звездными системами $\Delta D_{\min}(t)$ определяем как максимальное отклонение объектов от их среднего положения. Таким образом, $\Delta D_{\min} = \max |\mathbf{x}_j - \bar{\mathbf{x}}|$ где, например, $j = \text{AE Aur}, \mu \text{ Col}$ и $\iota \text{ Ori}$, среднее положение $\bar{\mathbf{x}} = (\mathbf{x}_{\text{AE Aur}} + \mathbf{x}_{\mu \text{ Col}} + \mathbf{x}_{\iota \text{ Ori}})/3$, а \mathbf{x}_j — положение звезды j .

Распределение параметра тройного сближения в определенной окрестности можно отразить в виде гистограммы. Ожидаемое распределение F_{3D} минимального расстояния ΔD_{\min} вычисляем по формуле Хугерверфа и др. (2001)

$$F_{3D}(\Delta D_{\min}) = \frac{\Delta D_{\min}}{2\sigma\mu\sqrt{\pi}} \times \left\{ \exp\left[-\frac{(\Delta D_{\min} - \mu)^2}{4\sigma^2}\right] - \exp\left[-\frac{(\Delta D_{\min} + \mu)^2}{4\sigma^2}\right] \right\} \quad (2)$$

для подходящего значения среднего μ и дисперсии σ .

Размер области вокруг рассеянного звездного скопления, где звезда остается гравитационно-связанной, сильно варьирует в зависимости от массы скопления и распределения звездной плотности в нем. Можно ориентироваться на значения приливных радиусов. Пискунов и др. (2008) определили такие значения для более 600 рассеянных звездных скоплений. Например, для Col 69 ($\sim 10^2 M_{\odot}$) он найден равным 7.7 пк. Для более массивного ($\sim 10^3 M_{\odot}$) скопления Трапедия Ориона значение приливного радиуса может быть меньшим, так как известно, что большая его масса сконцентрирована в радиусе < 3 пк (да Рио и др., 2014). Тем

не менее при статистическом моделировании мы берем типичное значение 10 пк в качестве радиуса рассеянного звездного скопления.

Как Трапедия Ориона, так и Col 69 являются очень молодыми рассеянными звездными скоплениями. Согласно Пискунову и др. (2008), возраст Col 69, найденный по изохронам, составляет около 5.7 млн лет ($\log t = 6.76$). Согласно оценке да Рио и др. (2014), время формирования Туманности Ориона составляет около 4 млн лет. Исходя из этого, мы интегрируем орбиты исследуемых звезд на 5–6 млн лет в прошлое.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

AE Aur, μ Col и ι Ori. На рис. 1а даны траектории звезд AE Aur, μ Col, ι Ori и Трапедии Ориона в проекции на галактическую плоскость xy , а на рис. 1б отражено их движение по вертикали в прошлом на интервале интегрирования около 4 млн лет.

На рис. 2 даны гистограммы минимального парного расстояния Δd_{\min} и моментов сближений t_{\min} между двумя звездами — AE Aur и μ Col. Для построения модельных орбит этих звезд было сделано 10 000 реализаций методом Монте-Карло.

Как можно видеть из рис. 1 и 2, траектории звезд AE Aur и μ Col пересекаются. В результате детального анализа 10 000 модельных данных мы нашли, что существуют очень тесные сближения: до расстояний менее 1 пк — 15 сближений и менее 2 пк — 31 сближение. Можем заключить, что полученные результаты моделирования подтверждают гипотезу Блаау, Моргана (1954) о том, что звезды AE Aur и μ Col являются продуктом разрушения двойной системы. Событие разрушения произошло около 2.5 млн лет назад. Этот вывод находится также в согласии с результатами анализа орбит этих двух звезд, сделанных в работе Хугерверфа и др. (2001) по данным каталога Hipparcos (1997).

Совершенно иная ситуация наблюдается в отношении тройного сближения звезд AE Aur, μ Col и ι Ori. На рис. 3 даны гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} и моментов сближений t_{\min} между ними. Для построения модельных орбит этих звезд было сделано 10 000 реализаций методом Монте-Карло. Максимум распределения минимального расстояния ΔD_{\min} лежит вблизи 80 пк (рис. 3а), что противоречит результатам других авторов. Например, при моделировании аналогичных сближений с использованием данных из каталога Hipparcos (1997) в работе Хугерверфа и др. (2001) была построена (рис. 8 в их работе) гистограмма ΔD_{\min} с максимумом вблизи 6 пк, а дисперсия составила примерно 2 пк. Эти авторы отметили также, что из 2.5 млн модельных орбит трех звезд,

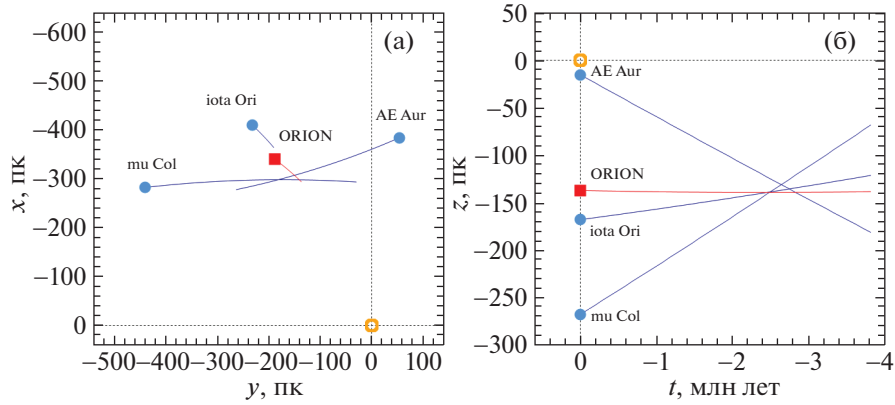


Рис. 1. Траектории звезд в проекции на галактическую плоскость xy , построенные назад в прошлое (а), координаты z в зависимости от времени интегрирования t (б), современные положения звезд обозначены голубыми кружками, красным цветом даны положение и траектория Тrapeции Ориона, желтым кольцом отмечено положение Солнца.

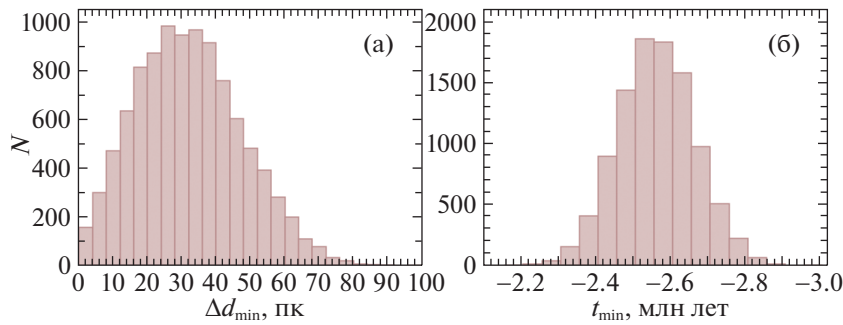


Рис. 2. Гистограммы минимального расстояния Δd_{\min} (а) и моментов сближений t_{\min} (б) между двумя звездами AE Aur и μ Col.

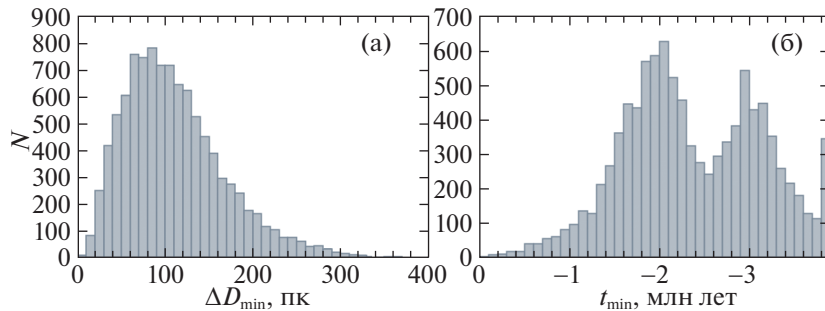


Рис. 3. Гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} (а) и моментов сближений t_{\min} (б) между тремя звездами AE Aur, μ Col и ι Ori.

в 114 случаях были обнаружены очень тесные взаимные сближения, где $\Delta D_{\min} < 1$ ПК.

Необычный двугорбый вид распределения на рис. 3б объясняется тем, что звезда ι Ori в разное время сближается с траекториями двух других звезд. Таким образом, здесь отражается эффект прилета звезды ι Ori издалека.

Звезда ι Ori очень яркая, $V = 2^m77$, что не может не сказаться на качестве ее измерительных данных. По-видимому, параллакс звезды ι Ori

измерен более надежно в каталоге Hipparcos, так как телескоп этой программы был ориентирован на измерения существенно более ярких звезд по сравнению со спутником Gaia.

На рис. 4 приведены гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} (а) и моментов тройных сближений t_{\min} (б) между звездами AE Aur, μ Col и Тrapeцией Ориона, отобранные при условии $\Delta D_{\min} < 10$ ПК. Экспонента на рис. 4а вписана согласно выражению (2) с матожиданием $\mu = 8$ ПК

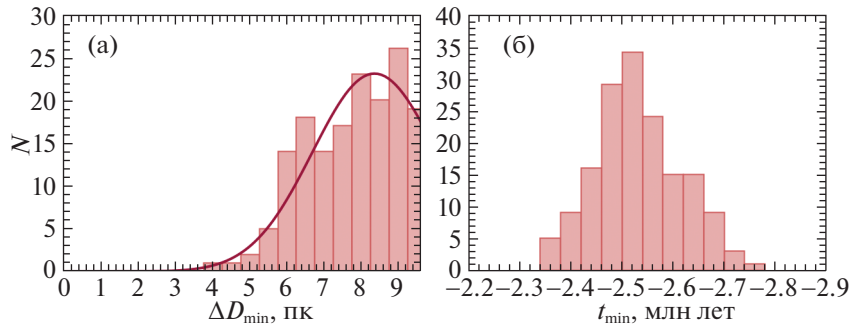


Рис. 4. Гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} (а) и моментов тройных сближений t_{\min} (б) между звездами AE Aur, μ Col и Орион, которые отобраны при условии $\Delta D_{\min} < 10$ пк.

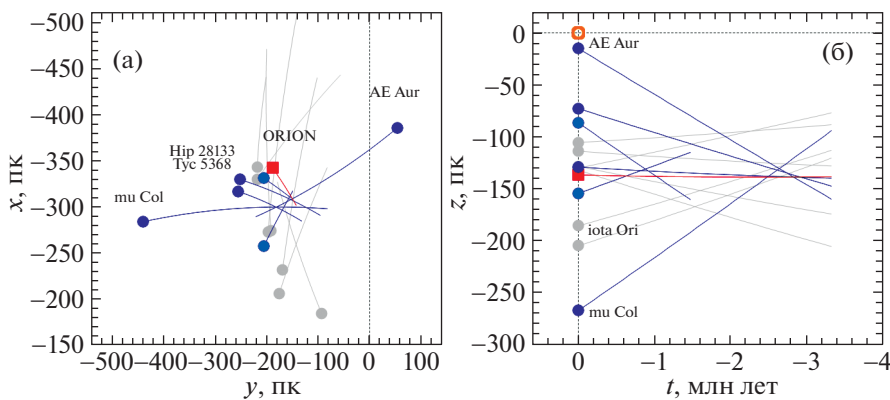


Рис. 5. Траектории звезд в проекции на галактическую плоскость xy , построенные назад в прошлое (а), координаты z в зависимости от времени интегрирования t (б), современные положения звезд обозначены кружками, красным цветом даны положение и траектория центра скопления Трапедия Ориона, подробности даны в тексте.

и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 1.2$ пк. Таким образом, из 10 000 модельных сближений мы получили 160, при которых все три объекта находятся в окрестности радиусом 10 пк. Этот результат подтверждает гипотезу о том, что Трапедия Ориона может являться родительским скоплением для пары звезд AE Aur и μ Col.

Распределение моментов сближений t_{\min} на рис. 4б имеет максимум в районе 2.5 млн лет в прошлом, что находится в хорошем согласии с моментами, найденными для парных сближений звезд AE Aur и μ Col (рис. 2б).

Обратим внимание на то, что звезда ι Ori и центр Трапедии Ориона лежат на одном луче зрения, как это хорошо можно видеть на рис. 1а. Таким образом, если бы мы взяли значение параллакса звезды ι Ori из каталога Hipparcos (1997) (см. табл. 1), то получили бы тесные тройные сближения.

HIP 28133 и TYC 5368-1541-1. На рис. 5 даны проекции пространственных траекторий, построенные по звездам AE Aur, μ Col, Трапедии

Ориона, а также по звездам из табл. 2. Серым цветом отмечены положения и траектории, которые не представляют большого интереса для решения наших задач. Таких звезд даже больше, чем указано в табл. 2, так как в нее мы не включили звезды с параллаксами более 3 мсд, которые имеются в списке Фариаса и др. (2020), но в рисунок они вошли. Более темным цветом на рисунке отмечены наиболее интересные звезды.

В первую очередь, это две звезды HIP 28133 (Gaia EDR3 2998537847270106240) и TYC 5368-1541-1 (Gaia EDR3 3003060825792025088), некоторые характеристики которых даны в четвертой и пятой строках табл. 2. Эти звезды были выделены в качестве кандидатов в убегающие звезды Шоттлером и др. (2020). Известно, что звезда HIP 28133 относится к спектральному классу G8IV. Как можно видеть из рис. 5, проекции их орбит пересекаются с проекциями орбит звезд AE Aur и μ Col. Исходя из этого, был проведен эксперимент по выяснению, какова вероятность того, что одна из этих звезд или обе они могли входить в прошлом

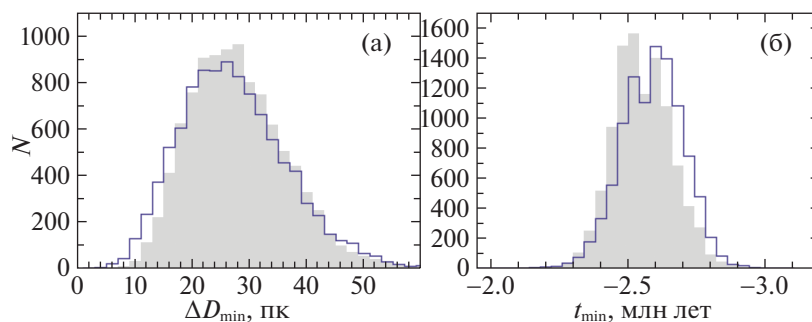


Рис. 6. Гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} (а) и моментов тройных сближений t_{\min} (б) между звездами АЕ Ауг, μ Сол и каждой из звезд НР 28133 (серая заливка) или ТУС 5368-1541-1 (темный контур).

в разрушенную кратную систему. Результат отражен на рис. 6. Можно сделать вывод о том, что все указанные звезды около 2.5 млн лет назад находились на среднем расстоянии друг от друга около 25 пк. Таким образом, они находились в одном родительском скоплении, но очень тесных (менее 1–2 пк) сближений как между тройкой из НР 28133 АЕ Ауг и μ Сол, так и тройкой ТУС 5368-1541-1 АЕ Ауг и μ Сол нет.

Мы также нашли, что звезды НР 28133 и ТУС 5368-1541-1 имеют высокую вероятность того, что вылетели из области радиусом 10 пк от центра Трапедии Ориона около 2.5 млн лет назад. Так, для звезды НР 28133 найдено 92 события при расстоянии до Трапедии Ориона $\Delta d_{\min} < 2$ пк и 2406 событий при $d_{\min} < 10$ пк (24%). Для звезды ТУС 5368-1541-1 скромнее — 831 событие при расстоянии до центра Трапедии Ориона $\Delta d_{\min} < 10$ пк (8%).

При изучении парных сближений этих звезд найдено, что около 2 млн лет назад между ними было расстояние менее 2 пк в 16 случаях, менее 4 пк — в 69 случаях, хотя максимум соответствующего распределения приходится на расстояние $\Delta d_{\min} \sim 35$ пк. Таким образом, хотя сценарий распада двойной системы с участием этих двух звезд имеет не очень большую вероятность, исключать его нельзя.

Gaia EDR3 3021115184676332288 и Gaia EDR3 2983790269606043648. Характеристики этих звезд даны в двух последних строках табл. 2. Это звезды из списка Фариаса и др. (2020). На рис. 5 положения этих звезд отмечены голубыми кружками. Как можно видеть из рис. 5б, проекции их орбит на плоскость $t-z$ пересекаются примерно 1 млн лет назад, затем сильно расходятся. Поэтому они даны короче остальных проекций.

Анализ парных сближений показал, что эти звезды имеют довольно высокую вероятность того, что примерно 1.1 млн лет назад они распались как двойная система. Так, при $\Delta d_{\min} < 2$ пк было

найдено 49 событий (0.5%). Гистограммы парных сближений между двумя этими звездами даны на рис. 7а и 7б. Сравнивая эти результаты, например, с распределениями парных сближений между звездами АЕ Ауг и μ Сол на рис. 2 (максимум распределения расположен вблизи 30 пк на рис. 2а) видим, что на рис. 7а (максимум в районе 20 пк) сближения более тесные. Таким образом, гипотеза о распаде двойной в этом случае лучше подкреплена данными моделирования.

Обе эти звезды довольно слабые, наблюдения имеются только в каталогах Gaia DR2 и Gaia EDR3. У обеих $G \sim 12^m$, иная информация о них пока отсутствует.

На рис. 7в и г даны гистограммы минимального расстояния Δd_{\min} и моментов парных сближений t_{\min} между центром Трапедии Ориона и каждой из звезд Gaia EDR3 3021115184676332288 или Gaia EDR3 2983790269606043648. Можно видеть, что звезда Gaia EDR3 3021115184676332288 находилась довольно близко ($\Delta d_{\min} < 10$ пк) к центру Трапедии Ориона около 1 млн лет назад. Здесь вероятность тесных сближений составляет около 16%.

HD 30112, HD 43112 и Сол 69. На рис. 8 даны пространственные траектории звезд HD 30112, HD 43112 и Сол 69, построенные назад в прошлое. Построены эти траектории с использованием номинальных кинематических данных. При этом можем видеть, что в момент времени $t = -1.06$ млн лет взаимное расстояние между звездами HD 30112 и HD 43112 не превышало 10 пк, и обе они находились в окрестности центра скопления Сол 69 радиусом 10 пк. Статистическое моделирование сближений с учетом ошибок в измерительных данных показывает, что сближения между рассматриваемыми объектами могли быть и более тесными. Для построения модельных орбит звезд было сделано 10 000 реализаций методом Монте-Карло. Результаты моделирования отражены на рис. 9.

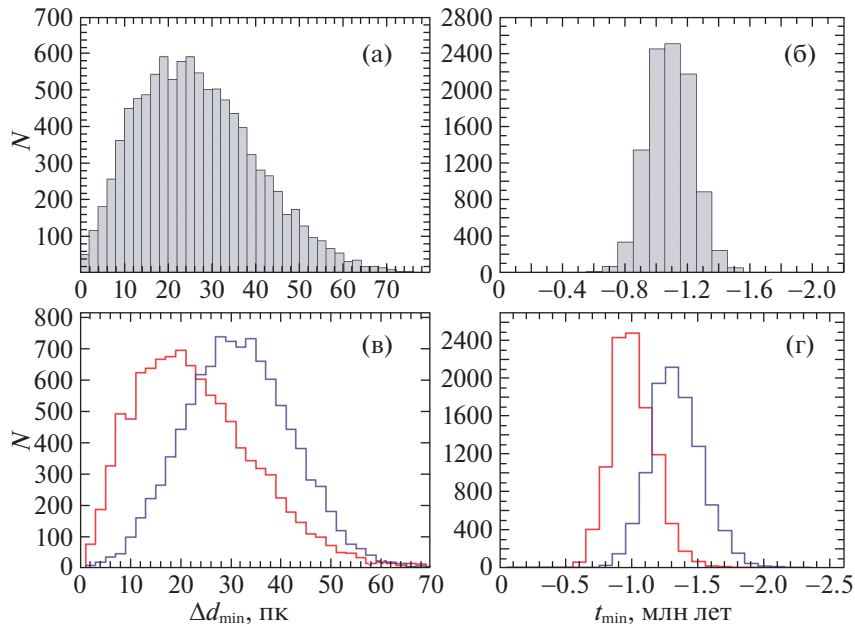


Рис. 7. Гистограммы минимального расстояния Δd_{\min} (а) и моментов парных сближений t_{\min} (б) между двумя звездами Gaia EDR3 3021115184676332288 и Gaia EDR3 2983790269606043648, гистограммы минимального расстояния Δd_{\min} (в) и моментов парных сближений t_{\min} (г) между центром Трапеции Ориона и каждой из звезд Gaia EDR3 3021115184676332288 (красный контур) или Gaia EDR3 2983790269606043648 (темный контур).

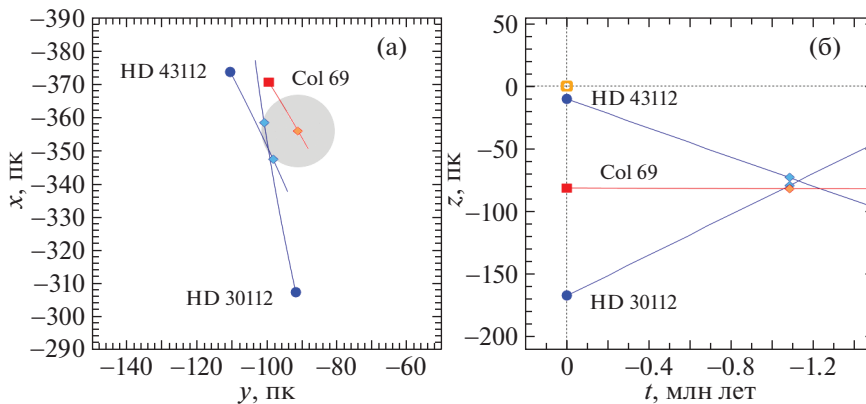


Рис. 8. Траектория звезд HD 30112, HD 43112 и скопления Col 69 в проекции на галактическую плоскость xy , построенные назад в прошлое (а), координаты z в зависимости от времени интегрирования t (б), современные положения звезд обозначены синими кружками, красным цветом даны положение и траектория центра скопления Col 69, ромбики отмечают положение объектов на момент наиболее их тесного сближения, серым кругом обозначена окрестность радиусом 10 пк с центром в скоплении Col 69 на момент минимального сближения со звездами, желтым кольцом отмечено положение Солнца.

На рис. 9а и 9б даны гистограммы минимального расстояния Δd_{\min} (а) и моментов парных сближений t_{\min} между звездами HD 30112 и HD 43112. Здесь обнаруживаются очень тесные сближения — 35 событий при $\Delta d_{\min} < 1$ пк и 148 событий при $\Delta d_{\min} < 2$ пк (вероятность события составит 1.5%).

В работе Бобылева, Байковой (2009) при использовании данных из каталога Hipparcos (ван Лювен, 2007) при моделировании этой пары звезд была определена вероятность 6% парных сближений до расстояний $\Delta d_{\min} \leq 10$ пк. Согласно гистограмме рис. 9а, вероятность парных сближений звезд HD 30112 и HD 43112 до расстояний $\Delta d_{\min} \leq$

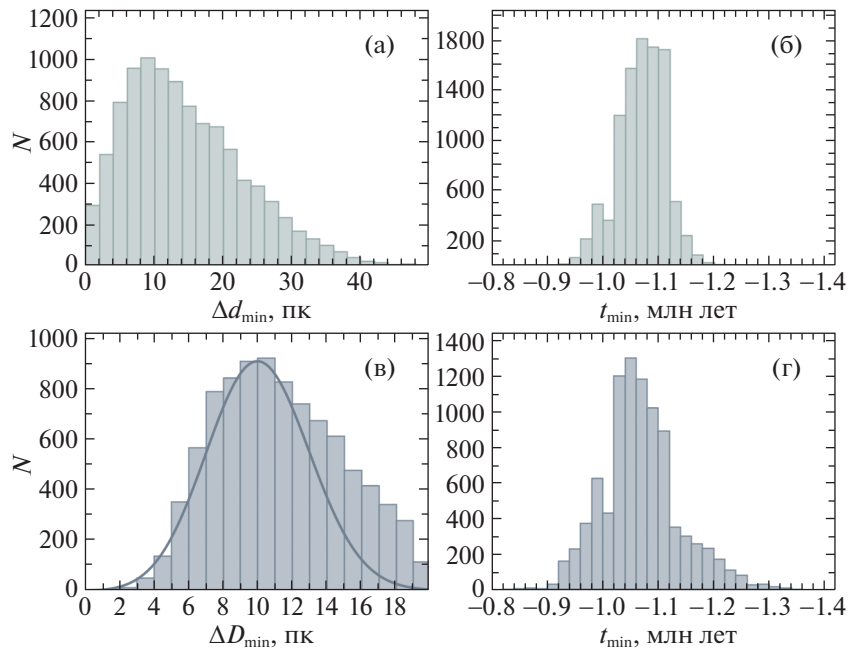


Рис. 9. Гистограммы минимального расстояния парного сближения Δd_{\min} (а) и моментов сближений t_{\min} (б) между звездами HD 30112 и HD 43112, минимального расстояния тройного сближения ΔD_{\min} (в) и моментов сближений t_{\min} (г) между звездами и Col 69, которые отбирались при условии $\Delta D_{\min} < 20$ пк.

≤ 10 пк составляет 11%. Отметим, что в настоящей работе использованы данные, у которых ошибки собственных движений и параллакса звезд HD 30112 и HD 43112 на порядок меньше по сравнению с ошибками этих звезд в каталоге ван Лювена (2007).

На рис. 9в и 9г даны гистограммы минимального расстояния ΔD_{\min} (а) и моментов тройных сближений t_{\min} между звездами HD 30112, HD 43112 и центром скопления Col 69, которые отобраны при условии $\Delta D_{\min} < 20$ пк. Экспонента на рис. 9в вписана согласно выражению (2) с матожиданием $\mu = 9$ пк и среднеквадратическим отклонением $\sigma = 2.2$ пк. Видно, что имеются очень тесные тройные сближения, например, 10 событий при $\Delta D_{\min} < 4$ пк. Кроме того, при $\Delta D_{\min} < 10$ пк имеется 3569 событий тройного сближения, что составляет 36% от 10 000 модельных реализаций. Таким образом, результаты моделирования подтверждают гипотезу о том, что скопление Col 69 (λ Ori) могло быть родительским скоплением для пары звезд HD 30112 и HD 43112, которая распалась 1.1 млн лет назад внутри этого скопления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено статистическое моделирование траекторий ряда убегающих звезд с использованием значений их параллакса и собственных движений, взятых из каталога Gaia EDR3.

Вначале была рассмотрена известная пара звезд AE Aug и μ Col и проведено моделирование как их парных сближений, так и тройных сближений с участием скопления Трапедия Ориона. Показано, что звезды AE Aug и μ Col могут являться продуктом распада кратной системы около 2.5 млн лет назад, а родительским скоплением для этой пары звезд может являться Трапедия Ориона. Таким образом, подтверждена гипотеза Блау, Моргана (1954) о возможном месте вылета этих убегающих звезд.

Данные из каталога Gaia EDR3 для звезды ι Ori, главным образом, значение параллакса, не позволяют говорить о совместном происхождении звезд AE Aug, μ Col и ι Ori. Таким образом согласно данным каталога Gaia EDR3, ι Ori находится слишком далеко от Солнца, а также далеко от места возможного разрушения в прошлом кратной системы звезд AE Aug и μ Col. Звезда ι Ori очень яркая, $G = 2.74^m$. Возможно, что значение параллакса для нее лучше измерено в каталоге Hipparcos. Тогда остаются справедливыми выводы Хугерверфа и др. (2001) о совместном происхождении кратной системы звезд AE Aug, μ Col и ι Ori.

Была рассмотрена пара звезд HD 30112 и HD 43112, которые связаны со скоплением Col 69. Подтверждено наличие тесных парных сближений между этими звездами 1.1 млн лет назад. Тесные тройные сближения подтверждают гипотезу о

том, что 1.1 млн лет назад звезды HD 30112 и HD 43112 вылетели из родительского скопления Col 69. Здесь ошибки собственных движений и параллаксов исследуемых звезд из каталога Gaia EDR3 оказались на порядок меньшими по сравнению с ошибками этих звезд, которые использовались прежде. А найденные вероятности указанных гипотез оказались в два раза большими прежних оценок, полученных аналогичным путем.

Совершенно новыми являются два результата, которые связаны с анализом движения убегающих звезд в области Трапедии Ориона.

Во-первых, показано, что звезды HIP 28133 (Gaia EDR3 2998537847270106240) и TYC 5368-1541-1 (Gaia EDR3 3003060825792025088) имеют ненулевую вероятность вылета из области радиусом 10 пк от центра Трапедии Ориона и вероятность около 8% того, что обе они находились на расстояниях менее 20 пк от центра Трапедии Ориона примерно 2.5 млн лет назад. Из анализа парных сближений этих звезд найдена ненулевая вероятность того, что около 2 млн лет назад они образовались в результате распада двойной системы.

Во-вторых, показано, что звезды Gaia EDR3 3021115184676332288 и Gaia EDR3 2983790269606043648 имеют ненулевую вероятность того, что примерно 1.1 млн лет назад они распались как двойная система. Так, было найдено 21 модельное событие (из 10 000 реализаций), при которых расстояние между этими двумя звездами составляло менее 1 пк. Звезда Gaia EDR3 3021115184676332288 имеет вероятность 16% того, что она вылетела из Трапедии Ориона, так как находилась близко ($\Delta d_{\min} < 10$ пк) к ее центру около 1 млн лет назад.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен и др. (C. Allen, R. Costero, A. Ruelas-Mayorga, and L.J. Sánchez), *MNRAS* **466**, 4937 (2017).
2. Байкова А.Т., Бобылев В.В., Письма в Астрон. журн. **42**, 625 (2016) [A.T. Bajkova and V.V. Bobylev, *Astron. Lett.* **42**, 567 (2016)].
3. Блау, Морган (A. Blaauw and W.W. Morgan), *Astrophys. J.* **119**, 625 (1954).
4. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **35**, 440 (2009) [V.V. Bobylev, A.T. Bajkova, *Astron. Lett.* **35**, 396 (2009)].
5. Бобылев В.В., Байкова А.Т., Письма в Астрон. журн. **42**, 3 (2016) [V.V. Bobylev, et al., *Astron. Lett.* **42**, 1 (2016)].
6. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), *Astron. Astrophys.* **616**, 1 (2018).
7. Браун и др. (Gaia Collaboration, A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, M. Biermann, O.L. Creevey, D.W. Evans, et al.), arXiv: 2012.01533 (2020).
8. Гис, Болтон (D.R. Gies and C.T. Bolton), *Astrophys. J. Suppl.* **61**, 419 (1986).
9. Гончаров Г.А., Письма в Астрон. журн. **32**, 844 (2006) [G.A. Gontcharov, *Astron. Lett.* **32**, 759 (2006)].
10. Кантат-Гудин и др. (T. Cantat-Gaudin, C. Jordi, A. Vallenari, A. Bragaglia, L. Balaguer-Nuñez, C. Soubiran, D. Bossini, A. Moitinho, et al.), *Astron. Astrophys.* **618**, 93 (2018).
11. Карера и др. (R. Carrera, A. Bragaglia, T. Cantat-Gaudin, A. Vallenari, L. Balaguer-Nuñez, D. Bossini, L. Casamiquela, C. Jordi, et al.), *Astron. Astrophys.* **623**, 80 (2019).
12. Кун и др. (M.A. Kuhn, L.A. Hillenbrand, A. Sills, E.D. Feigelson, and K.V. Getman), *Astrophys. J.* **870**, 32 (2019).
13. Линдерген и др. (Gaia Collaboration, L. Lindegren, S.A. Klioner, J. Hernández, A. Bombrun, M. Ramos-Lerate, H. Steidelmüller, U. Bastian, M. Biermann, et al.), arXiv: 2012.03380 (2020).
14. Лутц, Келкер (T.E. Lutz and D.H. Kelker), *PASP* **85**, 573 (1973).
15. Ван Лювен (F. van Leeuwen), *Astron. Astrophys.* **474**, 653 (2007).
16. Маис-Апельянис и др. (J. Maiz-Apellániz, M.P. González, R.H. Barbá, S. Simón-Díaz, I. Negueruela, D.J. Lennon, A. Sota, and E. Trigueros Páez), *Astron. Astrophys.* **616**, 149 (2018).
17. Маис-Апельянис, Барба (J. Maiz-Apellániz and R.H. Barbá), *Astron. Astrophys.* **636**, 28 (2020).
18. Макбрайд, Кункель (A. McBride and M. Kunkel), *Astrophys. J.* **884**, 6 (2019).
19. Марченко и др. (S.V. Marchenko, G. Rauw, E.A. Antokhina, I.I. Antokhin, D. Ballereau, J. Chauville, M.F. Corcoran, R. Costero, et al.), *MNRAS* **317**, 333 (2000).
20. Миямото, Нагаи (M. Miyamoto and R. Nagai), *PASP* **27**, 533 (1975).
21. Наварро и др. (J.F. Navarro, C.S. Frenk, and S.D.M. White), *Astrophys. J.* **490**, 493 (1997).
22. Оливарес и др. (J. Olivares, L.J. Sanchez, A. Ruelas-Mayorga, C. Allen, R. Costero, and A. Poveda), *Astron. J.* **146**, 106 (2013).
23. Платаис и др. (I. Platais, M. Robberto, A. Bellini, V. Kozhurina-Platais, M. Gennaro, G. Strampelli, L.A. Hillenbrand, S.E. de Mink, et al.), *Astron. J.* **159**, 272 (2020).
24. Пискунов и др. (A.E. Piskunov, E. Schilbach, N.V. Kharchenko, S. Röser and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **477**, 165 (2008).

25. Рид и др. (M.J. Reid, K.M. Menten, A. Brunthaler, X.W. Zheng, T.M. Dame, Y. Xu, J. Li, N. Sakai, et al.), *Astrophys. J.* **885**, 131 (2019).
26. Да Рио и др. (N. Da Rio, J.C. Tan, and K. Jaehnig), *Astrophys. J.* **795**, 55 (2014).
27. Родригес и др. (L.F. Rodriguez, S.A. Dzib, L. Loinard, L. Zapata, L. Gómez, K.M. Menten, and S. Lizano), *Astrophys. J.* **834**, 140 (2017).
28. Тецлаф и др. (N. Tetzlaff, R. Neuhauser, and M. M. Hohle), *MNRAS* **410**, 190 (2011).
29. Фариас и др. (J.P. Farias, J.C. Tan, and L. Eyer), *Astrophys. J.* **900**, 14 (2020).
30. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, A.E. Piskunov, S. Röser, E. Schilbach, and R.-D. Scholz), *Astron. Astrophys.* **438**, 1163 (2005).
31. Харченко и др. (N.V. Kharchenko, R.-D. Scholz, A.E. Piskunov, S. Röser, and E. Schilbach), *AN* **328**, 889 (2007).
32. Хугерверф и др. (R. Hoogerwerf, J.H.J. de Bruijne, and P.T. de Zeeuw), *Astron. Astrophys.* **365**, 49 (2001).
33. Шонрих и др. (R. Schönrich, J. Binney and W. Dehnen), *MNRAS* **403**, 1829 (2010).
34. Шоттлер и др. (C. Schoettler, J. de Bruijne, E. Vaher and R.J. Parker), *MNRAS* **495**, 3104 (2020).
35. The HIPPARCOS and Tycho Catalogues, ESA SP-1200 (1997).