

## ОРБИТЫ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД КАТАЛОГА П. КУТО, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ С УЧЕТОМ ДАННЫХ GAIA DR2 И GAIA EDR3

© 2021 г. А. Э. Киссер<sup>1\*</sup>, В. Г. Кречет<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, Москва, Россия

Поступила в редакцию 22.10.2021 г.

После доработки 02.11.2021 г.; принята к публикации 02.11.2021 г.

Впервые определены орбиты десяти звезд, открытых П. Куто: COU 99, 357, 610, 850, 1346, 1531, 1642, 1752, 1845, 2459. У двух из них (COU 850 и 1752) наблюдениями охвачена дуга более половины оборота, орбиты остальных звезд определялись по коротким дугам (5–50°). Орбиты COU 99, 610, 1346, 1531 и 1845 вычислены с использованием сумм масс компонент, оцененных по фотометрическим данным и тригонометрическим параллаксам каталогов Gaia, Hipparcos и Tycho. Кроме того, произведено уточнение орбит COU 66, 169, 773, 1006 и 1897.

*Ключевые слова:* визуально-двойные звезды, орбиты.

DOI: 10.31857/S0320010821110036

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе исследуются визуально-двойные звезды, открытые П. Куто и вошедшие в составленный им каталог (Куто, 1995). Ранее нами были опубликованы 20 орбит звезд этого каталога (Байдин, Кречет, 2021). В настоящий момент мы представляем десять орбит, определенных впервые: COU 357, 850, 1642, 1752, 2459 вычислены без использования фотометрических сумм масс, остальные (COU 99, 610, 1346, 1531, 1845) получены с учетом фотометрических данных. Кроме того, мы производим уточнение пяти орбит (COU 66, 169, 773, 1006, 1897), вычисленных ранее другими исследователями (Харткопф, Мэйсон, 2021).

Для определения орбит использовался метод (Байдин, 2015; Байдин и др., 2018), который позволяет вычислить орбиту по наблюдениям, распределенным на короткой дуге. Этот метод можно отнести к одной из модификаций метода Харткопфа и др. (1989). В последнем для определения трех величин ( $P$ ,  $T_p$ ,  $e$ ) использовался метод подбора, мы же применяем генетический алгоритм. Также для повышения точности результатов наш метод позволяет использовать дополнительные данные: относительные лучевые скорости ( $V_{rBA}$ ) и суммы масс компонент ( $M_{AB(ph)}$ ), оцененные по фотометрическим данным и спектральным классам. Одним из наиболее известных методов определения орбит

по коротким дугам является метод параметров видимого движения (ПВД) (Киселев, Кияева, 1980; Быков, Холшевников, 2013; Кияева, Романенко, 2020), для его работы необходимо знать относительные лучевые скорости и суммы масс. В нашем методе в зависимости от особенностей имеющихся данных можно как использовать  $V_{rBA}$  и  $M_{AB(ph)}$ , так и не использовать.

Первоначально делается попытка определить орбиту без дополнительных данных ( $V_{rBA}$  и  $M_{AB(ph)}$ ). Если после вычислений динамическая и фотометрическая суммы масс или вычисленная и измеренная относительные лучевые скорости не согласуются, орбита вычисляется с использованием дополнительных данных. У представленных в данной работе звезд измерения относительных лучевых скоростей не проводились. Для пяти звезд не удалось получить орбиты с динамическими массами, удовлетворяющими данным каталогов Gaia (Браун и др., 2018, 2021), Hipparcos и Tycho (ESA, 1997), поэтому мы использовали фотометрические массы для уточнения элементов орбит. Еще для одной звезды (COU 66) представлены две орбиты: первая вычислена без использования фотометрической суммы масс, вторая — с учетом значения суммы масс.

Применение фотометрических сумм масс при определении орбит долгопериодических пар ( $P > 500$  лет) можно считать вынужденной мерой. Достаточно надежные орбиты подобных объектов встречаются очень редко, так как для этого пара

\*Электронный адрес: [al.baidin@yandex.ru](mailto:al.baidin@yandex.ru)

должна находиться на малом расстоянии от Солнца ( $\pi_t \sim 100$  мсд) и наблюдаться около 200 лет, в качестве примера можно привести STT 547 (Кияева и др. 2001, 2020; Измайлов, 2019). В работе (Байдин и др., 2018) орбита этой пары вычислена тремя способами: описанным ниже методом без использования дополнительных данных, с использованием относительной лучевой скорости, взятой из работы А.А. Токовинина (1994), и модифицированным методом ПВД (Байдин, 2018). Орбиты STT 547, полученные разными авторами и различными методами, мало отличаются друг от друга. В большинстве случаев для долгопериодических пар вычисляются предварительные орбиты, использование фотометрических масс в ходе вычислений позволяет повысить точность результатов. Полученные предварительные орбиты долгопериодических пар можно использовать для проведения статистических исследований (Токовинин, 1998, 2020; Токовинин, Кияева, 2016; Кияева и др., 2018).

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРБИТ

Основные уравнения метода следующие:

$$x = AX + FY, \quad y = BX + GY, \quad (1)$$

$$X = \cos E - e, \quad Y = (1 - e^2)^{1/2} \sin E, \quad (2)$$

$$E - e \sin E - n(T - T_p) = 0, \quad (3)$$

где  $x$  и  $y$  — декартовы координаты звезды-спутника относительно главной компоненты в картинной плоскости,  $X$ ,  $Y$  — приведенные координаты,  $E$  — эксцентрисическая аномалия.

В качестве неизвестных (элементов орбит) у нас выступают  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$  — элементы Тиле–Иннеса,  $P$  — период (он связан со средним движением  $n = 2\pi/P$ ),  $e$  — эксцентриситет,  $T_p$  — момент прохождения периастра. От перечисленных элементов с помощью стандартного алгоритма (Куто, 1981) можно перейти к элементам орбит ( $P$ ,  $a$ ,  $i$ ,  $\Omega$ ,  $T_p$ ,  $e$ ,  $\omega$ ), которые входят в современный каталог орбит двойных звезд (Харткопф, Мэйсон, 2021).

С учетом количества наблюдений  $N$ , используя (1), можно составить  $2N$  уравнений и решить их методом наименьших квадратов. В качестве искомого величин выступают элементы орбит, уравнения получаются нелинейными, поэтому нужно задавать первые приближения, и могут возникнуть проблемы со сходимостью. Последнее затрудняет определение орбит по наблюдениям на короткой дуге и наблюдениям, неоднородно покрывающим дуги порядка или более половины оборота. Проблему со сходимостью можно решать различными

способами. В методе И.С. Измайлова (2019) задача разбита на два этапа: 1) имея первые приближения величин  $P$ ,  $T_p$ ,  $e$ , которые заранее были определены методом Тиле–Иннеса, методом наименьших квадратов вычисляются  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$ ; 2) зная  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$ , с помощью нелинейного метода наименьших квадратов уточняются  $P$ ,  $T_p$ ,  $e$ .

В работе Харткопфа и др. (1989) предложен другой подход. Если приведенные координаты известны, то уравнения (1) являются линейными относительно величин  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$ . Для вычисления приведенных координат необходимо знать  $P$ ,  $T_p$  и  $e$ , тогда с помощью (3) можно найти эксцентрисическую аномалию и подставить в (2). Харткопф и др. (1989) предложили  $P$ ,  $T_p$  и  $e$  определять подбором, а величины  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$  находить методом наименьших квадратов. В этом подходе одновременно определяются  $P$ ,  $T_p$ ,  $e$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$ , для которых сумма взвешенных квадратов невязок минимальна.

В настоящей работе орбиты определены модифицированным методом Харткопфа и др. (1989). Вместо подбора в нем используется генетический алгоритм (ГА), такой подход был предложен в работе (Байдин, 2015). Время, затрачиваемое на определение орбиты, при использовании генетического алгоритма в сравнении с методом подбора уменьшается. Еще одно преимущество использования ГА связано с тем, что вместо первых приближений задаются интервалы возможных значений  $P$ ,  $T_p$  и  $e$ , одинаковые для всех исследуемых звезд. Для вычисления орбит, представленных в данной работе, наиболее удобными являются следующие интервалы:  $P \in [10; 10\,000]$ ,  $T_p \in [1800; 11\,800]$ ,  $e \in [0.001; 0.95]$ .

Как правило, наблюдениям, распределенным на малой дуге, могут одинаково хорошо удовлетворять заметно отличающиеся друг от друга орбиты (Киселев, 1989; Байдин, 2018). Исключение из этого правила составляют только орбиты, определяемые по современным высокоточным наблюдениям, например, звездного интерферометра РТИ (Колавита и др., 1999). В наших исследованиях используются в основном визуальные и спеклинтерферометрические наблюдения, имеющие более низкую точность. Поэтому в случае обработки наблюдений на малых дугах при повторных запусках ГА получаются различные орбиты. Проблема повторяемости результатов исследования решена посредством многократного запуска ГА (обычно 20 повторений) и выбора орбиты с элементами, наиболее близкими к средним. Кроме средних значений элементов орбиты было принято решение определять среднеквадратичные отклонения элементов орбит. Последние характеризуют “разброс” орбит, хорошо удовлетворяющих используемой совокупности относительных положений.

Эксперименты с модельными и реальными данными (Байдин, 2018) показали, что при работе с наблюдениями, распределенными на малых дугах ( $20\text{--}50^\circ$ ) и имеющими погрешность  $\sigma_\rho/\rho \in (0.01\text{--}0.1)$ , довольно часто вычисленные орбиты сильно отличаются от истинных. Такие результаты сопровождаются более чем на порядок завышенными динамическими суммами масс и завышенными значениями эксцентриситетов, которые устремляются к верхнему граничному значению (в программе задано 0.95). Эти два критерия хорошо подходят для оценки качества получаемых орбит: фотометрические и динамические суммы масс должны быть примерно равны, и значения эксцентриситета не должны устремляться к заданной верхней границе (вместо 0.95 можно задать 0.99 или более).

Если по наблюдениям относительных положений орбиту, удовлетворяющую описанным выше двум критериям, получить не удается, то для уточнения элементов орбит можно применить дополнительные данные: фотометрические суммы масс  $M_{AB(\text{ph})}$  и относительные лучевые скорости  $V_{rBA}$ . В работе (Байдин и др. 2018) предложено изменить условие отбора решений в генетическом алгоритме, минимумы сумм квадратов невязок умножить на коэффициенты

$$k_M = 1 + \frac{|M_{AB(\text{ph})} - M_{AB(\text{d})}|}{M_{AB(\text{ph})}}, \quad (4)$$

$$k_V = 1 + \frac{|V_{rBA(\text{obs})} - V_{rBA(\text{cal})}|}{V_{BA}},$$

где  $M_{AB(\text{ph})}$  — фотометрическая сумма масс,  $M_{AB(\text{d})}$  — динамическая сумма масс,  $V_{rBA(\text{obs})}$  и  $V_{rBA(\text{cal})}$  — наблюдаемая и вычисленная по элементам орбит относительная лучевая скорость,  $V_{BA} = \sqrt{\mu_{BA}^2 + V_{rBA(\text{obs})}^2}$  — скорость звезды-спутника относительно главной компоненты,  $\mu_{BA}$  — проекция относительной скорости на картинную плоскость (вычисляется с помощью разложений относительных координат по времени).

Основное условие для выбора элементов орбит с учетом коэффициентов (4) следующее

$$\chi^2 = \chi_{\text{int}}^2 + \chi_{\text{vis}}^2 = \min, \quad (5)$$

где

$$\chi_{\text{int}}^2 = k_M k_V \sum p_{i(\text{int})} ((x_{i(\text{obs})} - x_{i(\text{cal})})^2 + (y_{i(\text{obs})} - y_{i(\text{cal})})^2), \quad (6)$$

$$\chi_{\text{vis}}^2 = k_M k_V \sum p_{i(\text{vis})} ((\rho_{i(\text{obs})} - \rho_{i(\text{cal})})^2 + 4 * \rho_{i(\text{cal})}^2 (\theta_{i(\text{obs})} - \theta_{i(\text{cal})})^2). \quad (7)$$

Веса наблюдений ( $p_i$ ) определялись по формулам (Байдин, Кречет, 2021)

$$p_{\text{int}} = 50D^{1.5}\sqrt{N}, \quad p_{\text{vis}} = D^{0.5}\sqrt{N}, \quad (8)$$

где  $D$  — апертура телескопа,  $N$  — количество измерений, с помощью которых определены средние относительные координаты звезды-спутника,  $p_{\text{vis}}$  — веса визуальных наблюдений разделения (веса позиционных углов в четыре раза больше).

При использовании условия (5) совместно с (4), (6)–(8) завышенные динамические суммы масс получаются редко, эксцентриситеты также редко устремляются к верхнему граничному значению. Требования к точности определения фотометрических сумм масс и точности значений тригонометрических параллаксов (они используются для определения динамической и фотометрической суммы масс) при этом возрастают, так как эти величины теперь, наравне с относительными положениями, влияют на сумму квадратов невязок (5).

Описанный метод с коэффициентами (4) позволяет определить эллиптическую орбиту независимо от качества наблюдений и реальных особенностей движения пары, т.е. в отдельных случаях может получиться эллиптическая орбита с удовлетворительной динамической суммой масс, хотя пара является оптической. Подобные результаты необходимо исключить из рассмотрения. Для этого в ходе наших исследований определялись элементы прямолинейного движения (Харткопф и др., 2006.5) всех звезд, у которых наблюдениями охвачены дуги менее  $100^\circ$ , и форма этих дуг близка к прямолинейной. Из вычисленных величин использовались видимая относительная скорость и среднеквадратичное отклонение, определяемое с учетом весов

$$\mu_{BA} = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}, \quad S_{(p)\text{lin}} = \sqrt{\chi^2/N}, \quad (9)$$

где  $\dot{x}$ ,  $\dot{y}$  — проекции относительной скорости,  $N$  — количество наблюдений, используемых в вычислениях,  $\chi^2$  — сумма взвешенных квадратов невязок (5) для модели прямолинейного движения.

О наличии физической связи говорит выполнение хотя бы одного из неравенств

$$\mu_{BA} < \mu, \quad S_{(p)\text{el}} < S_{(p)\text{lin}}, \quad (10)$$

где  $\mu_{BA}$  — видимая скорость звезды-спутника относительно главной компоненты (9),  $\mu$  — собственное движение пары,  $S_{(p)\text{el}}$  и  $S_{(p)\text{lin}}$  — среднеквадратичные отклонения (9), определенные с учетом весов наблюдений, для моделей эллиптического и прямолинейного относительных движений. Условие  $\mu_{BA} < \mu$  может выполняться и для оптической пары, поэтому вывод о наличии физической связи можно сделать, если  $\mu_{BA}$  как минимум в несколько раз меньше  $\mu$ . Выполнение условия  $S_{(p)\text{el}} < S_{(p)\text{lin}}$  показывает, что модель

Таблица 1. Элементы орбит

COU	66	66*	99*	169	357	610*	773	850
$P$ , год	255.6	143.2	321.3	92.7	393.8	361.1	165.3	48.00
$\sigma_P$	21.4	3.3	38.0	4.2	42.8	76.8	7.7	0.07
$a$ , ''	0.930	0.727	0.599	0.457	0.369	0.826	0.232	0.2774
$\sigma_a$	0.050	0.011	0.048	0.005	0.027	0.118	0.007	0.0005
$i$ , °	155.9	147.0	146.2	134.1	123.0	100.5	76.5	45.3
$\sigma_i$	2.8	0.4	5.1	0.9	0.9	3.2	0.2	0.1
$\Omega$ , °	132.8	12.0	39.7	50.2	128.9	26.9	45.2	101.6
$\sigma_\Omega$	5.4	5.1	4.0	4.6	1.4	2.5	0.1	0.5
$T_p$ , год	2025.9	2031.3	1902.0	1964.5	2360.8	1943.0	2019.5	1944.75
$\sigma_{T_p}$	1.0	3.8	13.1	0.4	46.4	0.7	2.1	0.07
$e$	0.493	0.497	0.128	0.676	0.253	0.780	0.213	0.495
$\sigma_e$	0.017	0.019	0.052	0.033	0.050	0.054	0.008	0.004
$\omega$ , °	102.2	25.5	58.6	259.7	316.0	66.5	86.6	60.3
$\sigma_\omega$	9.9	4.0	29.0	1.8	7.1	8.8	7.2	0.6
COU	1006	1346*	1531*	1642	1752	1845*	1897	2459
$P$ , год	221.0	139.6	203.5	433.8	71.4	619.2	82.3	633.6
$\sigma_P$	44.7	28.6	40.8	52.8	8.0	109.1	1.7	98.6
$a$ , ''	0.743	0.212	0.448	0.247	0.182	1.000	0.138	1.833
$\sigma_a$	0.083	0.030	0.057	0.020	0.019	0.120	0.001	0.140
$i$ , °	52.2	119.2	123.8	59.3	50.3	64.5	31.7	120.9
$\sigma_i$	1.6	6.3	1.3	1.0	3.4	3.3	1.1	1.1
$\Omega$ , °	16.6	62.9	11.9	101.3	125.6	178.2	133.0	95.9
$\sigma_\Omega$	2.7	5.6	3.8	1.0	7.6	0.4	0.5	1.7
$T_p$ , год	1980.2	2029.9	2024.3	2026.0	2006.4	1932.8	2017.3	2586.0
$\sigma_{T_p}$	3.0	0.8	0.7	5.8	0.3	1.7	0.2	103.5
$e$	0.384	0.479	0.758	0.277	0.477	0.663	0.408	0.445
$\sigma_e$	0.083	0.096	0.013	0.055	0.051	0.036	0.001	0.039
$\omega$ , °	201.1	109.2	70.3	11.9	83.6	56.0	200.9	223.6
$\sigma_\omega$	8.5	13.8	2.4	6.9	10.8	10.6	1.6	12.3

\* Орбита определена с учетом фотометрической суммы масс.

эллиптического движения лучше согласуется с имеющимися наблюдениями, чем модель прямолинейного.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения орбит использовались наблюдения относительных положений с сайта обсерватории в Ницце (Контэль и др., 2001), из четвертого интерферометрического каталога (Харткопф и др., 2020), каталогов Gaia DR2 (Браун и др., 2018) и Gaia EDR3 (Браун и др., 2021) и из работ последних лет, имеющих в свободном доступе<sup>1</sup>. В случае данных Gaia относительные координаты вычислялись при наличии координат обеих компонент пары.

Фотометрические данные и параллаксы брались из каталогов Gaia DR2 (Браун и др., 2018) и Gaia EDR3 (Браун и др., 2021), при отсутствии этих данных использовались каталоги Hipparcos и Tycho (ESA, 1997; Фабрициус, Макаров, 2000; Фабрициус и др. 2002; Ван Лейвен, 2007). Для определения фотометрических масс звезд осуществлялся переход к фотометрической системе ( $UBV$ ) с помощью отношений, представленных в работах Буссо и др. (2019), Риелло и др. (2021), затем использовались эволюционные треки (Жирарди и др., 2000) и зависимость масса—светимость.

В табл. 1 представлены вычисленные элементы орбит. У звезд COU 99, 357, 610, 850, 1346, 1531, 1642, 1752, 1845, 2459 орбиты определены впервые. У пяти из них (COU 357, 850, 1642, 1752, 2459) фотометрические и динамические суммы масс получились близкими по величине, поэтому мы не производили уточнение элементов орбит с учетом фотометрических сумм масс, остальные (COU 99, 610, 1346, 1531, 1845) определены с учетом фотометрических сумм масс. Также мы произвели уточнение пяти орбит (COU 66, 169, 773, 1006, 1897), полученных ранее другими исследователями, у COU 66 представлены две орбиты, отличие этих орбит в том, что в одном случае фотометрическая сумма масс использовалась, в другом — не использовалась.

На рис. 1 изображены орбиты звезд COU 66, 169, 610, 850, 1752 и 1897 в картинной плоскости. Эти звезды, по нашему мнению, являются наиболее актуальными для исследования в ближайшие годы. У COU 66, 169, 850, 1752 и 1897 при наличии современных точных наблюдений через два или три десятилетия можно определить надежные орбиты, а COU 610 является довольно яркой звездой (видимая звездная величина примерно равна 4),

к настоящему моменту накоплено большое количество спекл-интерферометрических наблюдений этой пары.

В табл. 2 и 3 представлены следующие величины:  $N_{\text{int}}$  и  $N_{\text{vis}}$  — количество спекл-интерферометрических и визуальных наблюдений, используемых для окончательного определения орбиты (после исключения с помощью правила  $3\sigma$ ),  $T_1$  и  $T_N$  — моменты первого и последнего используемых наблюдений,  $\rho$  — разделение, вычисленное на эпоху 2022 г.,  $\Delta\theta$  — угол поворота с момента открытия по 2022 г.,  $\pi_t$  — тригонометрический параллакс,  $M_{AB(d)}$  и  $M_{AB(ph)}$  — фотометрическая и динамическая суммы масс в единицах  $M_{\odot}$ , величины  $\mu_{BA}$ ,  $\mu$ ,  $S_{(p)el}$  и  $S_{(p)lin}$  были введены выше. Погрешности  $\mu_{BA}$  и  $\mu$  в табл. 3 не указаны, в большинстве случаев они невелики (менее 1 мсд/год), исключение составляют COU 169 и 1642, у первой собственное движение взято из каталога Hipparcos, стандартные ошибки собственных движений по прямому восхождению и склонению  $\sigma_{\mu_{\alpha^*}} = 3.08$  мсд/год,  $\sigma_{\mu_{\delta}} = 3.19$  мсд/год, у второй — из каталога Gaia DR2,  $\sigma_{\mu_{\alpha^*}} = 1.740$  мсд/год,  $\sigma_{\mu_{\delta}} = 1.618$  мсд/год. Дуги, охваченные наблюдениями, у COU 169, 773, 850 и 1897 заметно отличаются от прямолинейных, поэтому элементы прямолинейного движения для этих звезд не вычислялись, и в табл. 3 отсутствуют значения  $\mu_{BA}$  и  $S_{(p)lin}$ .

Разделение ( $\rho$ ), представленное в табл. 2, показывает, насколько сложна пара для наблюдения в настоящий момент, угол поворота ( $\Delta\theta$ ) — насколько она перспективна для исследования в ближайшем будущем. Примерное равенство фотометрических и динамических сумм масс говорит, что имеющиеся данные о паре (эпохи и наблюдаемые относительные координаты, тригонометрические параллаксы и фотометрические данные) не находятся в противоречии, величины ( $\mu_{BA}$ ,  $\mu$ ,  $S_{(p)el}$  и  $S_{(p)lin}$ ) используются для доказательства того, что пара физическая.

В каталоге Gaia EDR3 у нескольких изучаемых пар (COU 66, 99, 169, 610, 850, 1845, 2459) имеются координаты обеих компонент на эпоху 2016, аналогичные данные в каталоге Gaia DR2 на эпоху 2015.5 представлены у COU 169, 2459. У перечисленных звезд были вычислены относительные координаты звезд-спутников, полученные наблюдения использовались для определения орбит.

Фотометрические данные отдельно для каждой компоненты в каталоге Gaia EDR3 имеются у следующих объектов: COU 66, 99, 169, 610, 850. У остальных звезд имеется либо фотометрия главной компоненты (A), либо объединенная фотометрия пары (AB). Фотометрия AB использовалась

<sup>1</sup><https://ui.adsabs.harvard.edu>

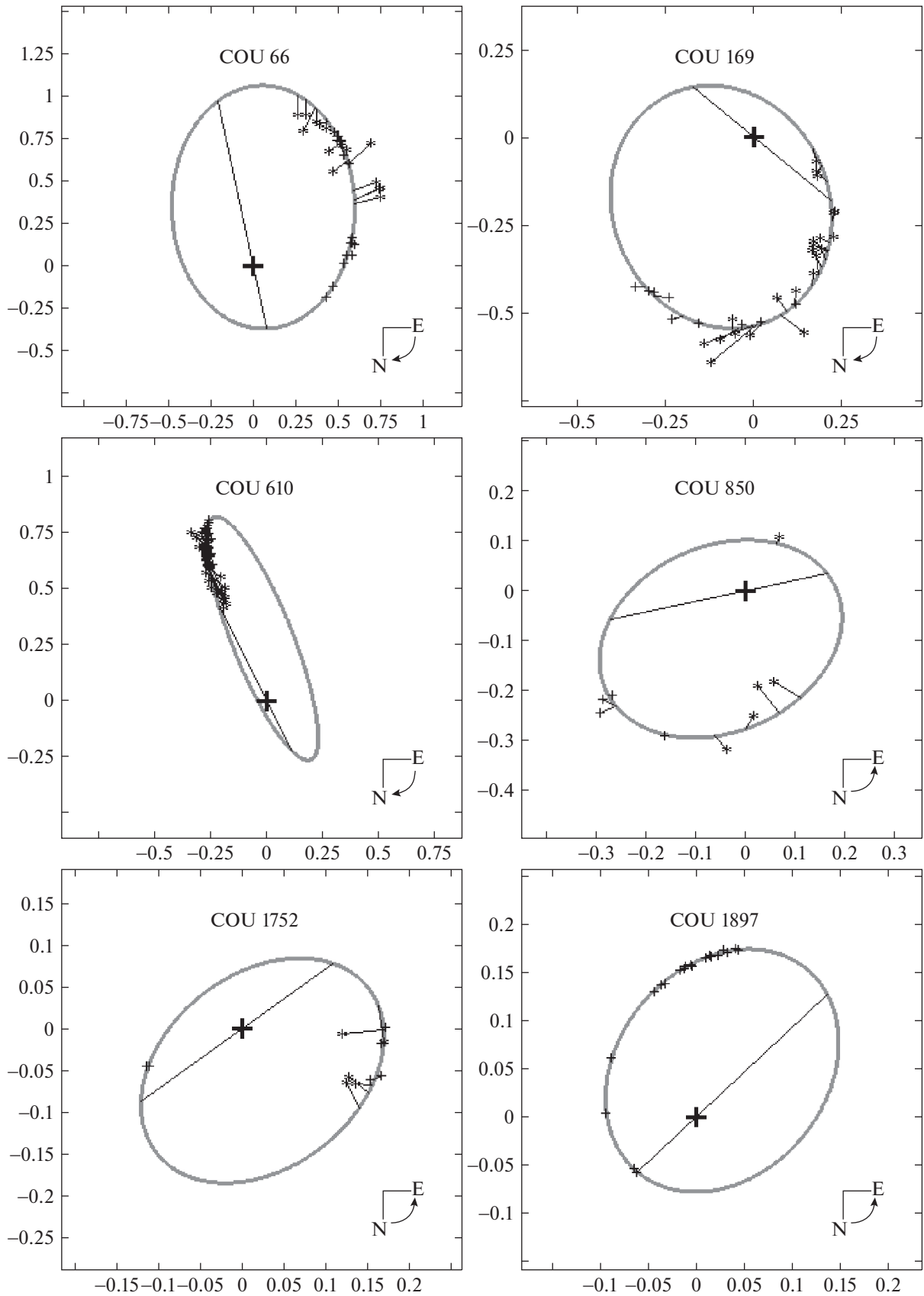


Рис. 1. Орбиты звезд в картинной плоскости: \* — визуальные наблюдения, + — спекл-интерферометрические наблюдения и наблюдения Hipparcos и Gaia.

Таблица 2. Вспомогательная информация об исследуемых парах

COU	WDS	$N_{\text{int}}$	$N_{\text{vis}}$	$T_1$	$T_N$	$\rho, ''$	$\Delta\theta, ^\circ$
66	15465 + 1957	20	15	1965.47	2018.2362	0.429	115.7
99	14432 + 2246	3	8	1966.32	2016.296	0.642	48.9
169	10140 + 2227	9	22	1967.24	2018.288	0.511	119.8
357	02250 + 2529	8	9	1968.99	2013.805	0.290	44.8
610	15329 + 3122	69	20	1971.523	2016.520	0.842	7.0
773	08539 + 1958	26	14	1972.16	2006.310	0.046	121.6
850	00360 + 3708	4	5	1972.97	2016.0	0.290	364.2
1006	18130 + 3318	5	8	1973.45	2009.4404	0.611	150.6
1346	23239 + 3456	5	6	1974.74	2009.7505	0.096	66.0
1531	05085 + 3755	7	2	1978.02	2010.8925	0.111	98.9
1642	22268 + 4033	9	6	1977.89	2011.858	0.178	38.6
1752	12017 + 4728	6	5	1980.09	2012.1000	0.184	273.3
1845	23267 + 4103	16	6	1978.73	2016.8712	0.991	12.4
1897	08585 + 3548	20	0	1984.0554	2015.1851	0.079	220.5
2459	04245 + 5051	14	1	1989.07	2016.0	1.117	43.8

Таблица 3. Вспомогательная информация об исследуемых парах

COU	$\pi_t$ , мсд	$M_{AB(d)}, M_\odot$	$M_{AB(ph)}, M_\odot$	$\mu_{BA}$ , мсд/год	$\mu$ , мсд/год	$S_{(p)el}, ''$	$S_{(p)lin}, ''$
66	25.7243	1.1	1.1	27.0	165.6	0.111	0.556
99	11.2753	1.45	1.45	9.3	64.5	0.085	0.095
169	12.83	5.3	1.5	—	117.7	0.075	—
357	5.7226	1.7	$\approx 2$	3.9	9.7	0.049	0.073
610	8.2139	7.8	7.8	5.3	23.8	0.105	0.182
773	4.7733	4.2	4.2	—	20.6	0.047	—
850	16.5902	2.0	1.3	—	90.5	0.062	—
1006	15.8418	2.1	1.6	24.9	126.2	0.068	0.117
1346	5.5825	2.8	2.8	4.1	36.5	0.051	0.055
1531	10.0395	2.15	2.15	8.1	40.3	0.080	0.117
1642	3.3171	2.2	$\approx 4$	2.6	9.3	0.063	0.069
1752	5.8047	6.0	2.2	10.5	78.7	0.081	0.505
1845	10.0066	2.6	2.6	8.5	36.8	0.160	0.172
1897	4.4505	4.4	4.9	—	9.9	0.048	—
2459	20.3228	1.8	1.9	24.3	65.4	0.108	0.115

для проверки данных других каталогов (сравнивалась светимость  $L_{\text{bol}AB}$ , определенная по данным Gaia, со светимостью  $L_{\text{bol}A} + L_{\text{bol}B}$ , определенной по данным других каталогов).

Для определения фотометрических и динамических сумм масс использовались параллаксы каталога Gaia EDR3. У двух звезд (COU 169 и COU 1642) параллакс в Gaia EDR3 отсутствует, параллакс и собственное движение COU 169 взяты из каталога Hipparcos (Ван Лейвен, 2007), параллакс и собственное движение COU 1642 — из каталога Gaia DR2.

Ниже мы даем комментарии по некоторым парам, связанные с особенностями определения их орбит.

1. Пары, вычисленные без использования фотометрических сумм масс (COU 357, 850, 1642, 1752, 2459).

COU 357. Наблюдениями покрыта дуга менее  $40^\circ$ . Последнее наблюдение выполнено Харшоу и др. (2016). Невязки  $(o - c)_\rho$  почти всех визуальных наблюдений прошлого века положительны, поэтому окончательно орбита определялась без использования разделений ( $\rho$ ) визуальных наблюдений.

COU 850. С учетом последнего наблюдения Gaia EDR3 наблюдениями охвачен почти полный оборот, но распределены они неравномерно. Очень важным для определения орбиты является наблюдение Куто 1992.564 (Куто и др., 1993), его несложно найти на рис. 1, так как оно заметно отстоит от остальных наблюдений.

COU 1642. Наблюдениями охвачена дуга менее  $40^\circ$ , но фотометрическая и динамическая суммы масс (табл. 3) хорошо согласуются. Последние наблюдения пары выполнены Герреро и др. (2018).

COU 1752. Наблюдениями охвачена дуга более половины оборота, но распределены они неравномерно: имеются наблюдения с 1980 по 1993 г. на дуге  $30^\circ$ , два последних наблюдения Хорча и др. (2017) отстоят от них более чем на половину оборота. Невязки  $(o - c)_\rho$  всех визуальных наблюдений 80-х годов отрицательные, поэтому окончательно орбита определялась без использования разделений ( $\rho$ ) визуальных наблюдений. Завышенное значение динамической суммы масс в сравнении с фотометрической (см. табл. 3) можно объяснить наличием относительной погрешности параллакса Gaia EDR3 порядка 30%. Стоит отметить, что со значением параллакса из каталога Gaia DR2 получается динамическая сумма масс  $3.6M_\odot$ , которая неплохо согласуется с фотометрической суммой масс.

COU 2459. Наблюдениями охвачена дуга менее  $40^\circ$ , но дуга длиной  $20^\circ$  довольно плотно покрыта наблюдениями Хорча и др. (2002, 2008, 2010, 2012,

2017) и наблюдениями Gaia (DR2 с эпохой 2015.5 и EDR3 с эпохой 2016).

2. Пары, вычисленные с учетом фотометрических сумм масс (COU 99, 610, 1346, 1531, 1845).

Для перечисленных пар при вычислении орбит без использования фотометрических сумм масс были получены плохие результаты. Фотометрические и динамические суммы масс отличались значительно, а вычисленные эксцентриситеты были примерно равны верхнему граничному заданному в ГА значению. В табл. 1 представлены элементы орбит этих пяти пар, определенные с использованием значений фотометрических сумм масс. В табл. 3 представлены величины, доказывающие в силу выполнения условий (10), что все пары являются физическими.

Более подробно остановимся на звезде COU 610, так как она является достаточно яркой (видимая звездная величина около 4) и видна невооруженным глазом. Наблюдениями охвачена дуга менее  $10^\circ$ , но они покрывают значительную часть видимого эллипса (рис. 1). Невязки  $(o - c)_\rho$  всех визуальных наблюдений 70-х годов, кроме MLR 1971.56 (Контэль и др., 2001), отрицательные (из-за этого часть наблюдений оказалась внутри видимого эллипса, см. рис. 1). Окончательно орбита определялась без использования разделений визуальных наблюдений. Эта пара интенсивно наблюдалась Макалистером с 1976 по 1989 г. (в четвертом интерферометрическом каталоге представлено 48 наблюдений). Последние наблюдения пары выполнены Хорчем и др. (2020), Серо (2017) и Скардия и др. (2019). В каталоге Gaia EDR3 координаты звезды-спутника определены с заметной погрешностью ( $\sim 0.03''$ ), относительное положение, вычисленное по координатам, плохо согласуется с остальной совокупностью данных, поэтому не использовалось в вычислениях.

3. Пары, у которых производилось уточнение орбит (COU 66, 169, 773, 1006, 1897).

В табл. 4 мы описали причины, из-за которых решили уточнить орбиты из шестого каталога.

У двух пар (COU 66 и 169) замечены несоответствия между астрометрическими и фотометрическими данными, поэтому ниже даны пояснения.

COU 66. В ходе первых пробных вычислений обнаружено, что невязки  $(o - c)_\rho$  всех визуальных наблюдений 60-х и 70-х годов отрицательны, поэтому представлена орбита, вычисленная без использования разделений визуальных наблюдений. Значение динамической суммы масс получилось заниженным ( $0.72M_\odot$ ), погрешностью параллакса Gaia EDR3 ее не объяснить, так она дает  $\sigma_M \sim 0.01M_\odot$ . Фотометрическая сумма масс определена достаточно надежно, поэтому орбита была



**Таблица 4.** Информация об орбитах, которые ранее были определены другими исследователями

COU	Авторы	Причины, по которым принято решение уточнить орбиту
66	Рика Ромеро (2013)	Последние наблюдения Хорча и др. (2017), Токовина и др. (2019) и Gaia EDR3 имеют заметные невязки: $(o - c)_\rho < -0.015''$ , $(o - c)_\theta \in (-3.5^\circ; -0.8^\circ)$ .
169	Куто (1999)	Почти все наблюдения после 2000 г. имеют большие невязки: $(o - c)_\rho > 0.015''$ , $(o - c)_\theta < -2^\circ$ .
773	Куто (1999)	Наблюдения после 2000 г. имеют большие невязки: $(o - c)_\rho < -0.025''$ , $(o - c)_\theta > 2^\circ$ .
1006	Куто (1999)	Невязки спекл-интерферометрических наблюдений очень велики: $(o - c)_\rho > 0.2''$ , $(o - c)_\theta < -20^\circ$ .
1897	Докобо, Тамазян (2013)	У последних наблюдений Хорча и др. (2020) $(o - c)_\rho > 0.015''$ . С учетом данных Gaia EDR3 динамическая и фотометрическая суммы масс отличаются более чем в три раза ( $M_{AB(d)} = 17.5M_\odot$ , $M_{AB(ph)} = 4.9M_\odot$ ).

также определена с учетом фотометрической суммы масс, именно она изображена на рис. 1.

COU 169. Использовалась фотометрия Gaia EDR3. Спектр пары K5 (Мэйсон и др., 2001), а абсолютная звездная величина  $M_v$  обеих компонент примерно как у звезд K0. Значение динамической суммы масс получилось завышенным (табл. 3). Возможно, все перечисленное связано с заниженным значением параллакса в каталоге Hipparcos (Ван Лейвен, 2007). Фотометрические данные Gaia EDR3 компонент пары, спектральный класс K5 и динамическая и фотометрическая суммы масс хорошо согласуются при параллаксе около 20 мсд.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе определены орбиты пятнадцати визуально-двойных звезд, открытых П. Куто. У десяти из них орбиты вычислены впервые, для пяти было произведено уточнение орбит. Представленные результаты являются предварительными. Надежные орбиты, в ближайшее время при наличии современных точных наблюдений относительных положений можно получить для COU 66, 169, 850, 1752 и 1897.

Орбиты COU 850 и 1752 были определены впервые, у первой из них наблюдениями покрыт целый оборот, у второй — более половины оборота, но в обоих случаях наблюдения распределены на дуге очень неравномерно. Орбиты COU 66, 169 и 1897 были уточнены, актуальность этих пар связана с двумя причинами: 1) COU 169 и 1897 имеют периоды обращения менее 100 лет; 2) COU 66 и 1897 проходят в настоящий момент участки на видимой орбите с наиболее быстрым относительным движением.

Вычисление орбит выполнено модифицированным методом Харткопфа и др., в котором вместо подбора для определения  $P$ ,  $T_p$  и  $e$  применяется генетический алгоритм (ГА). Основное преимущество метода подбора и ГА связано с отсутствием проблем со сходимостью. Генетический алгоритм в сравнении с методом подбора значительно уменьшает время, затрачиваемое на определение орбиты. Кроме того, появляется возможность использования некоторых особенностей ГА для повышения точности получаемых результатов, это в первую очередь актуально при работе с наблюдениями, покрывающими малые дуги или неравномерно распределенными на дуге. У таких пар имеется множество орбит, одинаково хорошо удовлетворяющих накопленным к настоящему времени данным. ГА, в силу его стохастической природы, как раз позволяет вычислить не одну, а множество орбит.

Далее, имея большую совокупность орбит, можно вычислить средние значения орбитальных элементов и выбрать орбиту, которая наилучшим образом им соответствует. Здесь, как и в любых исследованиях, справедливо то, что средние значения оказываются точнее отдельно взятого результата (ранее, работая с отдельными двойными звездами, мы доказали справедливость этого утверждения для элементов орбит).

В генетическом алгоритме можно изменить условие отбора решений в новую популяцию с учетом дополнительных данных. В представленном методе определения орбит в качестве дополнительных данных выступают относительные лучевые скорости и фотометрические суммы масс. Условие отбора изменяется таким образом, что орбиты, у которых вычисленные относительные лучевые скорости и динамические суммы масс лучше согласуются с дополнительными данными, получают

преимущество по сравнению с другими орбитами. В статье орбиты СОУ 66, 99, 610, 1346, 1531, 1845 определены с учетом фотометрических сумм масс. На примере СОУ 66 показано, что использование фотометрической суммы масс может быть полезно даже при определении орбиты достаточно хорошо изученной визуально-двойной звезды.

Представленный метод определения орбит позволяет работать с неполными данными. Это актуально, если для некоторых эпох имеются наблюдения только позиционных углов, или обнаружено, что невязки  $(o - c)_p$  всех разделений, измеренных визуально, оказываются положительными либо отрицательными. Последнее говорит о наличии систематических ошибок наблюдений (в статье подобная особенность обнаружена у СОУ 66, 357, 610, 1752). В этом случае алгоритм метода незначительно преобразуется: элементы Тиле—Иннеса ( $A$ ,  $B$ ,  $F$ ,  $G$ ) определяются без учета визуальных наблюдений, позиционные углы, измеренные визуально, используются только при выборе решений в новую популяцию.

Работа поддержана Министерством высшего образования и науки РФ, грант № 0707-2020-0025. Авторы благодарят наблюдателей двойных звезд, данные которых использовались в работе. Выбор звезд, наиболее удобных для исследования, был осуществлен благодаря данным сайта обсерватории в Ницце. Авторы благодарят создателей этого сайта.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байдин А.Э., Вестник ЮУрГУ. Сер. Математика. Механика. Физика. **7** (1), 11 (2015).
2. Байдин А.Э., Перов Н.И., Романенко Л.Г., Вестник СПбУ. Математика. Механика. Астрономия. **5** (1), 154 (2018).
3. Байдин А.Э., Дис. канд. физ.-мат. наук (ЯГПУ им. К.Д. Ушинского, Ярославль, 2018).
4. Байдин А.Э., Кречет В.Г., Астрофиз. бюлл. **76**, 100 (2021) [A.E. Baidin and V.G. Krechet, *Astrophys. Bull.* **76**, 84 (2021)].
5. Браун и др. (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**, A1 (2018).
6. Браун и др. (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.), *Astron. Astrophys.* **649**, A1 (2021).
7. Буссо и др. (G. Busso, C. Cacciari, J.M. Carrasco, et al.), *Gaia DR2 documentation release 1.2, Chapter 5: Photometry* (ESA and DPAC, 2019).
8. Быков О.П., Холщевников К.В., *Прямые методы определения орбит небесных тел* (СПб: Изд. Санкт-Петербургского университета, 2013).
9. Ван Лейвен (F. Van Leeuwen), *Astron. Astrophys.* **474**, 653 (2007).
10. Гепперо и др. (C.A. Guerrero, V.G. Orlov, M. Borges Fernandes, and F. Angeles), *MNRAS* **475**, 1725 (2018).
11. Докобо, Тамазян (J.A. Docobo and V. Tamazian), *Inf. Circ.* **179**, 1 (2013).
12. Жирарди и др. (L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
13. Измайлов И.С., Письма в Астрон. журн. **45**, 35 (2019) [I.S. Izmailov, *Astron. Lett.* **45**, 30 (2019)].
14. Киселев А.А., Кияева О.В., Астрон. журн. **57**, 1227 (1980) [A.A. Kiselev and O.V. Kiyayeva, *Sov. Astron.* **24**, 708 (1980)].
15. Киселев А.А., *Теоретические основания фотографической астрометрии* (М: Наука, 1989).
16. Кияева О.В., Киселев А.А., Поляков Е.В., Рафальский В.Б., Письма в Астрон. журн. **27**, 456 (2001) [O.V. Kiyayeva et al., *Astron. Lett.* **27**, 391 (2001)].
17. Кияева О.В., Романенко Л.Г., Калининченко О.А., Изв. ГАО в Пулковке **225**, 231 (2018).
18. Кияева О.В., Жучков Р.Я., Измайлов И.С., Астрофиз. бюлл. **75**, 478 (2020) [O.V. Kiyayeva, et al., *Astrophys. Bull.* **75**, 425 (2020)].
19. Кияева О.В., Романенко Л.Г., Письма в Астрон. журн. **46**, 590 (2020) [O.V. Kiyayeva and L.G. Romanenko, *Astron. Lett.* **46**, 555 (2020)].
20. Колавита и др. (M.M. Colavita, J.K. Wallace, B.E. Hines, Y. Gursel, F. Malbet, D.L. Palmer, X.P. Pan, M. Shao, et al.), *Astrophys. J.* **510**, 505 (1999).
21. Контэль и др. (D. Le Contel, J.-C. Valtier, and D. Bonneau), *Astron. Astrophys.* **377**, 496 (2001), <https://sidonie.oca.eu/Sidonie/Default.htm>.
22. Куто П., *Наблюдения визуально-двойных звезд* (М.: Мир, 1981) [Couteau P., *L'Observation des étoiles doubles visuelles* (Flammarion, Paris, 1978)].
23. Куто и др. (P. Couteau, J.A. Docobo, and J. Ling), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **100**, 305 (1993).
24. Куто (P. Couteau), *Catalogue of 2700 double stars* (Observatoire de la Côte d'Azur, Nice, 1995), <http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR?-source=I/209A>.
25. Куто (P. Couteau), *Catalogue de 2700 Étoiles Doubles COU* (Observatoire de la Côte d'Azur, 3rd ed., Nice, 1999).
26. Мэйсон и др. (B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, G.G. Douglass, and Ch.E. Worley), *Astron. J.* **122**, 3466 (2001).
27. Риелло и др. (M. Riello, F. De Angeli, D.W. Evans, P. Montegriffo, J.M. Carrasco, G. Busso, L. Palaversa, P.W. Burgess, et al.), *Astron. Astrophys.* **649**, A3 (2021).
28. Рика Ромеро (F.M. Rica Romero), *Inf. Circ.* **181**, 1 (2013).
29. Сепо (J. Sérot), *J. Double Star Observ.* **13**, 268 (2017).
30. Скардия и др. (M. Scardia, J.-P. Rivet, J.-L. Prieur, L. Pansecchi, R.W. Argyle, J.F. Ling, E. Aristidi, A. Zanutta, et al.), *Astron. Nachr.* **340**, 771 (2019).

31. Токовинин А.А., *Астрон. журн.* **71**, 293 (1994) [A.A. Tokovinin, *Astron. Rep.* **38**, 258 (1994)].
32. Токовинин А.А., *Письма в Астрон. журн.* **24**, 217 (1998) [A.A. Tokovinin, *Astron. Lett.* **24**, 178 (1998)].
33. Токовинин, Кияева (A.A. Tokovinin and O.V. Kiyaeva), *MNRAS* **456**, 2070 (2016).
34. Токовинин и др. (A.A. Tokovinin, B.D. Mason, R.A. Mendez, E.P. Horch, and C. Briceño), *Astron. J.* **158**, 48 (2019).
35. Токовинин (A.A. Tokovinin), *MNRAS* **496**, 987 (2020).
36. Фабрициус, Макаров (C. Fabricius and V.V. Makarov), *Astron. Astrophys.* **356**, 141 (2000).
37. Фабрициус и др. (C. Fabricius, E. Hog, V.V. Makarov, B.D. Mason, G.L. Wycoff, and S.E. Urban), *Astron. Astrophys.* **384**, 180 (2002).
38. Харшоу и др. (R. Harshaw, R. Genet, J. Hass, and K. Phung), *J. Double Star Observ.* **12**, 238 (2016).
39. Харткопф и др. (W.I. Hartkopf, H.A. McAlister, and O.G. Franz), *Astron. J.* **98**, 1014 (1989).
40. Харткопф и др. (W.I. Hartkopf, B.D. Mason, G.L. Wycoff, and D. Kang), *Catalog of Rectilinear Elements of Visual Double Stars* (USNO Double Star CD 2006.5).
41. Харткопф и др. (W.I. Hartkopf, B.D. Mason, G.L. Wycoff, and H.A. McAlister), *Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars* (US Naval Observatory, Washington, 2020), <http://www.astro.gsu.edu/wds/int4.html>.
42. Харткопф, Мэйсон (W.I. Hartkopf and B.D. Mason), *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars* (US Naval Observatory, Washington, 2021), <http://www.astro.gsu.edu/wds/orb6.html>.
43. Хорч и др. (E.P. Horch, S.E. Robinson, R. Meyer, W.F. van Altena, Z. Ninkov, and A. Piterman), *Astron. J.* **123**, 3442 (2002).
44. Хорч и др. (E.P. Horch, W.F. van Altena, W.M. Cyr, Jr., L. Kinsman-Smith, A. Srivastava, and J. Zhou), *Astron. J.* **136**, 312 (2008).
45. Хорч и др. (E.P. Horch, D. Falta, L.M. Anderson, M.D. DeSousa, C.M. Minter, T. Ahmed, and W.F. van Altena), *Astron. J.* **139**, 205 (2010).
46. Хорч и др. (E.P. Horch, L.A.P. Bahi, J.R. Gaulin, S.B. Howell, W.H. Sherry, R. Baena Galle, and W.F. van Altena), *Astron. J.* **143**, 10 (2012).
47. Хорч и др. (E.P. Horch, D.I. Casetti-Dinescu, M.A. Camarata, A. Bidarian, W.F. van Altena, W.H. Sherry, M.E. Everett, A.B. Howell, et al.), *Astron. J.* **153**, 212 (2017).
48. Хорч и др. (E.P. Horch, G.T. van Belle, J.W. Davidson, Jr., D. Willmarth, F.C. Fekel, M. Muterspaugh, D.I. Casetti-Dinescu, F.W. Hahne, et al.), *Astron. J.* **159**, 233 (2020).
49. ESA, *The Hipparcos and Tycho Catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission* (ESA Publ. Division, Noordwijk, 1997) (ESA SP Ser., No. 1200).