

### Определение возмущённых орбит визуально-двойных звёзд по позиционным наблюдениям

Методы определения орбит визуально-двойных звёзд разрабатываются с XIX века. Первые методы были графическими, то есть требовали построения видимого эллипса, например, метод Тиля-Иннеса-ван ден Боса [12, 13], Анрото-Стьюарта [5], Цвирса [5], Млодзеевского [12], или требовали наложения дополнительных условий на наблюдения – метод противоположных точек Данжона [13]. Это связано с тем, что в общем виде аналитическая обработка всех серий наблюдений представляет очень громоздкую задачу [2]. Современные методы определения орбит двойных звёзд связаны с обработкой наблюдений на коротких дугах широких пар, но требуют дополнительных данных – метод ПВД [9].

Число известных визуально-двойных звезд в настоящее время приближается к 100000 [14], число рассчитанных орбит много меньше. Обновлённый шестой каталог орбит визуально-двойных звёзд [21] на 30 июня 2006 года содержит 2024 определённых орбит из 1888 систем (разные авторы получают различные результаты). Четверть века назад Куто [13] подчёркивал, что основные трудности в определении орбит связаны с ошибками наблюдений и для произвольного состава наблюдений двойной звезды никогда не удастся привлечь к определению её орбиты вычислительную технику. Двойные звёзды – единственный источник прямых методов определения масс звёзд. Для этого, кроме элементов орбиты, необходимо знать параллакс и собственное движение звезды. Параллакс является очень малой величиной, что затрудняет его точное определение, а определение собственного движения требует длительных наблюдений обеих звёзд относительно далёких звёзд фона, поэтому количество рассчитанных масс звёзд исчисляется десятками.

Точность оптических наблюдений в последние десятилетия растёт. Так, в каталоге Эйткена [25] (если исключить грубые ошибки в наблюдениях) разделение между компонентами в среднем определяется с погрешностью  $\pm 0''.1$ , а компоненты с разделением меньше данной величины не измерялись. Дейч в статье “Роль и значение фотографической астрометрии” [1] для фотографических измерений двойных звёзд среднюю ошибку в определении расстояния между компонентами оценивает  $\pm 0''.02$ . В современную эпоху среднеквадратичная ошибка фотографических наблюдений оценивается  $0''.006-0''.020$  (<http://www.puldb.ru>). Точность определения относительных положений компонент спекл-интерферометрическим методом достигает  $0''.003$  [4]. Тербиж [16] в результате численного моделирования получил предельное разрешение телескопов умеренного размера  $0''.001-0''.1$ . В настоящее время некоторые наблюдения за двойными ведутся из космоса с разрешением до  $0''.00001$  [22]. Намечаются запуски космических аппаратов “SIM” NASA, “NGST” NASA, “KEPLER” ESA, “EDDINGTON” ESA [24], происходит переход к измерению углов с микросекундной точностью – проект “GAIA” ESA [24].

Повышение точности наблюдений требует создания новых точных методов определения орбит для различных случаев движения (это окружность, эллипс, парабола, гипербола) или различных случаев возмущенного движения – вековые и периодические возмущения. В общем виде можно дать любую функцию  $\theta(T)$ , сильно отличающуюся от функций конических сечений при сильно возмущенном движении, и получить совершенно новый метод, главное, чтобы найденная функция хорошо описывала наблюдения. Например, Дейч [8] для исключения орбитального движения на коротких дугах использовал  $x = x_0 + a\Delta T + b\Delta T^2$  и аналогично по второй координате. Большое количество имеющихся в наши дни данных также требует от новых методов высокой скорости обработки.

В настоящее время для некоторых двойных систем накоплено большое количество наблюдений высокой точности на дугах в несколько оборотов [22], что позволяет определять возмущенные орбиты. Можно найти около 500 систем, совершивших более оборота за двести лет наблюдений, в этом случае определяется вековое движение периастра. Но элементы возмущенного движения при определении орбит визуально-двойных звёзд рассматриваются в настоящее время очень редко.

До недавнего времени о возмущениях судили по различию предсказанных и наблюдаемых положений звёзд или по обработке наблюдений, произведённых в разные эпохи. В настоящее время появилась возможность вычислять орбиты аналитически, задавая в начальной модели движение по эллипсу и произвольные функции, описывающие вращение эллипса в пространстве

(сделать графически это невозможно). Основные трудности данной модели: 1) при малом эксцентриситете орбиты одновременные операции  $n \pm const$  и  $\dot{\omega} \mp const$  слабо изменяют вид движения двойной системы; 2) при малых углах наклона одинаковое влияние на положение звезды-спутника имеют движение линии узлов и движение периастра. Появляются эти трудности из-за ошибок в наблюдениях или сильно-возмущённого движения, которое не описывается предлагаемой моделью (на идеальные смоделированные случаи эти трудности не распространяются).

Наличие возмущений в движении визуально-двойных говорит о присутствии невидимых тел (планет, звёзд слабой светимости) в данной системе. Поиск малых тел в звёздных системах вызывает большой интерес у исследователей. В работах Тутукова [18-20] рассматривается ряд факторов, свидетельствующих о существовании внесолнечных планетных систем, сообщаются основные успехи в данной области. Изучение звёзд, имеющих невидимые спутники, по оптическим наблюдениям ведётся в ГАО РАН (<http://www.puldb.ru>) [7, 23].

В современную эпоху исследованиям динамики и кинематики визуально-двойных звёзд уделяется большое внимание [4, 7-11, 15, 17, 21]. Некоторые звёзды вызывают особенный интерес. Например, элементы орбиты ADS 14636 (61 Cyg) определялись во многих работах [9-11], а А.Н. Дейч, О.Н. Орлова [8], Д.Л. Горшанов и др. [7] вычисляли параметры предполагаемых невидимых спутников этой двойной звезды.

В данной работе рассматривается метод определения возмущенной эллиптической орбиты. Исходными данными метода являются:  $T_k$  – эпоха наблюдения,  $\theta_k$  – угол между прямой, соединяющей компоненты пары, и направлением на северный полюс мира. Количество наблюдений  $N \geq 8$ . Разделение между компонентами  $\rho_k$  используется только для определения большой полуоси. Искомыми величинами являются  $P$  – период,  $n$  – среднее движение,  $T_p$  – эпоха прохождения периастра,  $e$  – эксцентриситет,  $a$  – большая полуось,  $i$  – наклонение орбиты,  $\Omega$  – позиционный угол линии узлов,  $\dot{\Omega}$  – вековое движение линии узлов,  $\omega$  – угол между линией узлов и периастром,  $\dot{\omega}$  – вековое движение периастра.

Основные уравнения.

Уравнение Кеплера, связывающее эксцентрическую аномалию ( $E_k$ ) со средней аномалией ( $M_k = n(T_k - T_p)$ )

$$E_k - e \sin(E_k) - n(T_k - T_p) \approx 0. \quad (1)$$

Знак приближённого равенства показывает, что точного равенства для наблюдательного материала при расчетах получить невозможно.

Уравнение, выражающее эксцентрическую аномалию через истинную аномалию ( $v_k$ )

$$E_k = 2 \arctg(\sqrt{(1-e)/(1+e)} \operatorname{tg}(v_k/2)). \quad (2)$$

Формула связи наблюдаемых углов  $\theta_k$  видимого эллипса с истинными аномалиями истинного эллипса

$$v_k = \arctg(\operatorname{tg}(\theta_k - \Omega - \dot{\Omega}(T_k - T_p)) / \cos(i)) - \omega - \dot{\omega}(T_k - T_p). \quad (3)$$

Уравнение (3) подставляется в (2), а (2) в (1). После этого (1) можно представить как функцию восьми переменных

$$F_k(T_k, \theta_k, n, T_p, e, i, \Omega, \dot{\Omega}, \omega, \dot{\omega}) \approx 0. \quad (4)$$

При обработке уравнение (4) задаёт различный математический вес наблюдениям. По этой причине метод, основанный на нём, не даст минимально возможных невязок. Для исключения данного фактора уравнение (4) необходимо преобразовать

$$F_k(T_k, \theta_k, n, T_p, e, i, \Omega, \dot{\Omega}, \omega, \dot{\omega}) / (\partial F_k / \partial \theta) \approx 0, \quad (5)$$

где  $\partial F_k / \partial \theta$  – частые производные  $F_k(T_k, \theta_k, n, T_p, e, i, \Omega, \dot{\Omega}, \omega, \dot{\omega})$  по  $\theta$ .

Уравнения (5) представляют систему  $N$  уравнений с восьмью неизвестными. Для её решения используется метод наименьших квадратов

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial n}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & \quad \sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial T_p}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & \quad \sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial e}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & \quad \sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial i}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; \\
\sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial \Omega}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & & & \\
\sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial \dot{\Omega}}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & \quad \sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial \omega}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0; & \quad \sum_{k=1}^N \frac{\partial F_k^2 / \partial \dot{\omega}}{(\partial F_k / \partial \theta)^2} = 0. & \quad (6)
\end{aligned}$$

Система уравнений (6) решается методом касательных [6]. Точность определения элементов орбит задаётся в зависимости от поставленных задач и надёжности данных. В работе  $|(n_{j+1} - n_j) / n_{j+1}| < 10^{-5}$ ;  $|(T_{p,j+1} - T_{p,j})| < 10^{-5}$ ;  $|(e_{j+1} - e_j)| < 10^{-5}$ ;  $|(i_{j+1} - i_j)| < 10^{-5}$ ;  $|\Omega_{j+1} - \Omega_j| < 10^{-5}$ ;  $|\dot{\Omega}_{j+1} - \dot{\Omega}_j| / \dot{\Omega}_{j+1} < 10^{-3}$ ;  $|\omega_{j+1} - \omega_j| < 10^{-5}$ ;  $|\dot{\omega}_{j+1} - \dot{\omega}_j| / \dot{\omega}_{j+1} < 10^{-3}$ .

Большая полуось находится из уравнений

$$\rho_k \approx \frac{a(1-e^2) \cos(\nu_k + \omega + \dot{\omega}(T_k - T_p))}{1 + e \cos \nu_k \cos(\theta_k - \Omega - \dot{\Omega}(T_k - T_p))},$$

после применения метода наименьших квадратов

$$a = \frac{\sum_{k=1}^N \rho_k \frac{(1-e^2) \cos(\nu_k + \omega + \dot{\omega}(T_k - T_p))}{1 + e \cos \nu_k \cos(\theta_{ck} - \Omega - \dot{\Omega}(T_k - T_p))}}{\sum_{k=1}^N \left( \frac{(1-e^2) \cos(\nu_k + \omega + \dot{\omega}(T_k - T_p))}{1 + e \cos \nu_k \cos(\theta_{ck} - \Omega - \dot{\Omega}(T_k - T_p))} \right)^2},$$

где  $\nu_k$  и  $\theta_{ck}$  определены по найденным элементам орбиты и моментам наблюдений. Это сделано для того, чтобы исключить случайные ошибки наблюдений по  $\theta_k$  при расчете большой полуоси.

Период обращения звезды спутника вокруг главного компонента  $P = 2\pi / n$ .

Средние отклонения рассчитанных  $\theta_{ck}$  и  $\rho_{ck}$  от наблюдаемых  $\theta_k$  и  $\rho_k$  находились по

$$\text{формулам } \sigma_\rho = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\rho_k - \rho_{ck})^2 / N} \text{ и } \sigma_\theta = \sqrt{\sum_{k=1}^N (\theta_k - \theta_{ck})^2 / N}.$$

Модельные орбиты.

**Программа с движением периастра.** Начальные величины для расчета эталонной орбиты:  $N = 8$ ;  $n = 2^\circ / \text{год}$ ;  $T_p = 1910 \text{ год}$ ;  $e = 0.35$ ;  $a = 0''.9$ ;  $i = 50^\circ$ ;  $\Omega = 65^\circ$ ;  $\omega = 140^\circ$ ;  $\dot{\omega} = 0.001^\circ / \text{год}$ ;  $T_1 = 1855$ ;  $T_2 = 1867$ ;  $T_3 = 1889$ ;  $T_4 = 1901$ ;  $T_5 = 1922$ ;  $T_6 = 1935$ ;  $T_7 = 1946$ ;  $T_8 = 1966$ . Программа определяет  $\theta_k$  и  $\rho_k$ . Первое приближение  $n = 0.6^\circ / \text{год}$ ;  $T_p = 1900 \text{ год}$ ;  $e = 0.3$ ;  $i = 35^\circ$ ;  $\Omega = 50^\circ$ ;  $\omega = 120^\circ$ ;  $\dot{\omega} = 0^\circ / \text{год}$ . Рассчитанные величины представлены в табл. 1 и обозначены (1). Точность определения элементов эталонной орбиты в данном случае связана с погрешностью эксцентрической аномалии ( $\Delta E_k < 10^{-6} \text{ рад}$ ), определяемой при расчете эталонной орбиты, и также зависит от точности, задаваемой при работе метода касательных.

**Программа с движением периастра и линии узлов.** Начальные величины для расчета эталонной орбиты:  $N = 10$ ;  $n = 8^\circ / \text{год}$ ;  $T_p = 1920 \text{ год}$ ;  $e = 0.5$ ;  $a = 1''.4$ ;  $i = 45^\circ$ ;  $\Omega = 55^\circ$ ;  $\dot{\Omega} = -0.02^\circ / \text{год}$ ;  $\omega = 170^\circ$ ;  $\dot{\omega} = 0.03^\circ / \text{год}$ ;  $T_1 = 1830$ ;  $T_2 = 1845$ ;  $T_3 = 1855$ ;  $T_4 = 1889$ ;  $T_5 = 1915$ ;  $T_6 = 1927$ ;  $T_7 = 1944$ ;  $T_8 = 1965$ ;  $T_9 = 1988$ ;  $T_{10} = 2005$ . Первое приближение  $n = 6^\circ / \text{год}$ ;  $T_p = 1870 \text{ год}$ ;  $e = 0.4$ ;  $i = 50^\circ$ ;  $\Omega = 40^\circ$ ;  $\dot{\Omega} = 0^\circ / \text{год}$ ;  $\omega = 155^\circ$ ;  $\dot{\omega} = 0^\circ / \text{год}$ . Рассчитанные величины в табл. 1 обозначены (2). Погрешность эксцентрической аномалии при расчете эталонной орбиты  $\Delta E_k < 10^{-6} \text{ рад}$ . Повышение точности определения элементов по

сравнению с первым примером связано с тем, что увеличилось число эталонных наблюдений и длина дуги.

Современные наблюдения дают невязки  $(o - c)_{\text{ок}} \sim 1^\circ$ . Был произведён численный эксперимент: из точных эталонных данных  $(\theta_k)$  с нечётными номерами ( $k$ ) вычитался произвольный угол, а к чётным номерам он же прибавлялся. Отмечено, что для рассматриваемых десяти эталонных наблюдений ситуация резко ухудшается, когда угол начинает превосходить  $2^\circ$ . В табл. 1 рассчитаны элементы орбиты для этого случая (обозначено 3). Очевидно, что с увеличением числа наблюдений точность определения элементов орбит увеличивается. В настоящее время для многих звёзд число современных спекл-интерферометрических наблюдений приближается к ста, поэтому для звёзд, совершивших несколько оборотов, можно определить движение периастра и линии узлов с погрешностью менее  $\pm 0.01^\circ/\text{год}$ .

Таблица 1

Модельные орбиты						
	$P$ , год	$T_p$ , год	$a$ , "	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$\sigma_\theta$ , °
	$n$ , °/год	$e$	$i$ , °	$\dot{\Omega}$ , °/год	$\dot{\omega}$ , °/год	$\sigma_\rho$ , "
(1)	180.0002	1910.0000001	0.90000026	64.99999992	140.0000003	$1.47 \times 10^{-7}$
	1.999998	0.3500003	50.0000002	-	0.0010009	$7.28 \times 10^{-8}$
(2)	45.000000001	1920.0000000	1.3999999996	54.99999993	170.0000001	$4.50 \times 10^{-8}$
	7.9999999999	0.4999999998	45.000000015	-0.019999997	0.029999997	$8.91 \times 10^{-10}$
(3)	44.882	1919.8485	1.44433	51.5119	170.8445	$5.57 \times 10^{-2}$
	8.0210	0.48884	55.1004	-0.02234	0.02245	$8.60 \times 10^{-2}$

Реальная орбита (51 Тау) **041823.14+213445.8 HR 1331 MCA 14Aa HD 27176 HIP 20087 04184+2135** впервые разрешена Макалистером в 1975 г. Один из первых определил орбиту Балега в 1985 г., когда наблюдения охватывали 3/4 оборота, после чего в 1988 г. по 41 наблюдению орбита была уточнена [4]. Одно из последних определений, представленное в шестом каталоге [21], произведено Поурбаиксом (Pourbaix D) в 2000 г. В настоящее время в четвёртом интерферометрическом каталоге имеется 77 наблюдений за период 1975.716 – 1998.7776 гг. [22], равномерно распределенных вдоль двух оборотов эллипса видимого движения, что позволяет определить вековые возмущения периастра и линии узлов.

Первое приближение в работе определено геометрическим методом [3] (Табл. 2). Метод использует зависимость  $\rho(\theta)$ , которая после применения метода наименьших квадратов даёт систему линейных уравнений, но полученные уравнения не содержат моментов времени наблюдений, которые определяются гораздо точнее разделения и позиционных углов. Недостатки геометрического метода описаны Дейчем [12]. Для рассматриваемой двойной геометрический метод даёт орбитальные элементы, хорошо согласующиеся с наблюдениями: среднеквадратичные ошибки  $\sigma_\theta = 3^\circ.37$  и  $\sigma_\rho = 6''.36 \times 10^{-3}$ .

Звезда вращается в обратном направлении. В работе положительная величина среднего вращения и вековых возмущений периастра и линии узлов определяется направлением отсчета позиционных углов. Элементы орбиты, вычисленные описанным методом, даны в табл. 2. Рассмотрены случаи: 1) Невозмущенная орбита; 2) Орбита с учетом движения периастра; 3) Орбита с учетом движения периастра и линии узлов. Для сравнения также определены среднеквадратичные отклонения  $\sigma_\rho$  и  $\sigma_\theta$  для всех рассмотренных случаев и для элементов орбиты, представленных в шестом каталоге орбит Харткопфа и Мэйсона [21] (Табл. 2). Элементы орбиты, вычисленные автором и Поурбаиксом, имеют близкие значения, внешнее отличие связано с тем, что рассмотренный метод определяет наклонение и угол периастра так же, как в случае прямого движения [13], а Поурбаикс отсчитывал эти углы в обратном направлении.

Таблица 2

Элементы орбиты (51 Тау)						
HR 1331	$P$ , год	$T_p$ , год	$a$ , "	$\Omega$ , °	$\omega$ , °	$\sigma_\theta$ , °
	$n$ , °/год	$e$	$i$ , °	$\dot{\Omega}$ , °/год	$\dot{\omega}$ , °/год	$\sigma_\rho, \times 10^{-3}$ "
Геом	11.3426	1977.4566	0.1330	170.7730	209.6603	3.37

	-31.7388	0.1642	53.1567	-	-	6.36
(1)	11.3376	1966.4630	0.1334	172.1089	197.9973	2.22
	-31.7527	0.1662	56.0858	-	-	6.61
(2)	11.3304	1966.4759	0.1334	172.0995	197.5514	2.22
	-31.7730	0.1661	56.1002	-	0.0225	6.60
(3)	11.3742	1966.4164	0.1333	166.6204	204.2256	2.13
	-31.6506	0.1667	55.9593	0.2767	-0.3467	6.60
Pbx, [21]	11.35	1977.74	0.1329	350.7	339	2.40
	-	0.167	125.5	-	-	6.38

Предлагаемый метод определения орбит двойных звёзд позволяет обрабатывать произвольное количество наблюдений ( $N \geq 8$ ), находить вековые возмущения периастра и линии узлов. В работе определена орбита HR 1331 (51 Tau). Элементы орбиты, определённые рассмотренным методом, хорошо согласуются с современными данными и не уступают в точности элементам орбиты шестого каталога [21]. Одинаковые среднеквадратичные ошибки для невозмущенного метода и метода, учитывающего движение периастра, можно объяснить малостью эксцентриситета орбиты. Метод с учётом движения периастра и линии узлов даёт в данном случае наилучшее согласие с наблюдениями.

В заключение автор выражает благодарность Николаю Ивановичу Перову за внимание к работе.

### Библиографический список

1. Астрометрия и небесная механика // Проблемы исследования Вселенной. Вып. 7. М.-Л.: Производственно-полиграфическое объединение №1 Ленупрполиграфиздата, 1978.
2. Байдин А.Э. Линейный метод определения орбит двойных звёзд // Труды ГАИШ. 2005. Т. LXXVIII. С. 87.
3. Байдин А.Э. Постановка лабораторной работы “Расчёт невозмущенных орбит визуально-двойных звёзд по пяти и более наблюдениям” // Методика преподавания астрономии / Под ред. А.Ю. Румянцева). Магнитогорск: МаГУ, 2005. С. 66.
4. Балега И.И., Балега Ю.Ю. Интерферометрические орбиты восьми двойных звёзд // Письма в Астрон. журн. 1988. Т. 14. № 10. С. 927.
5. Воронцов-Вельяминов Б.А. Курс практической астрофизики. М.-Л.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1940.
6. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. М.: Наука, 1975.
7. Горшанов Д.Л., Шахт Н.А., Поляков Е.В., Киселёв А.А., Канаев И.И. Предварительные результаты обработки пулковского ряда фотографических наблюдений двойной звезды 61 Лебеда, измеренного на автоматической машине “Фантазия” // Известия ГАО. 2002. № 216. С. 100.
8. Дейч А.Н., Орлова О.Н. О невидимых спутниках двойной звезды 61 Лебеда // Астрон. журн. 1977. Т. 54. №2. С. 327.
9. Киселев А.А., Кияева О.В. Определение орбиты визуально-двойной звезды методом параметров видимого движения из наблюдений на короткой дуге // Астрон. журн. 1980. Т. 57. №6. С. 1227.
10. Киселев А.А., Романенко Л.Г. Динамическое исследование девяти широких визуально-двойных звёзд в окрестностях Солнца // Астрон. журн. 1996. Т. 73. №6. С. 875.
11. Кияева О.В. Использование далёких по времени наблюдений для уточнения орбиты визуально-двойной звезды, полученной методом параметров видимого движения по короткой дуге // Астрон. журн. 1983. Т. 60. №6. С. 1208.
12. Курс астрофизики и звёздной астрономии. Т. II. М.: Физматгиз, 1962.
13. Куто П. Наблюдения визуально-двойных звёзд. М.: Мир, 1981.
14. Мэйсон и др. (Mason B.D., Wycoff G.L., Hartkopf W.I.) Washington Double Stars Catalogue. Washington: U.S. Nav. Obs. 2001. (updated 2004).
15. Романенко Л.Г. Определение орбит широких двойных звёзд ADS 10759 (Psi Dra) и ADS 12815 (16 Cyg) методом параметров видимого движения // Астрон. журн. 1994. Т. 71. №6. С.875.
16. Терещиш В.Ю. Использование априорной информации при восстановлении изображений. Естественный предел разрешения // Астрон. журн. 1999. Т. 76. №1. С. 49.
17. Токовинин А. и др. (Tokovinin A., Balega Y. Y., Pluzhnik E. A., Shatsky N. I., Gorynya N. A., Weigelt G.) Fundamental parameters and origin of the very eccentric binary 41 Dra // Astron. and Astrophys. 2003. v. 409. p. 245.
18. Тутуков А.В. Пылевые диски около молодых звёзд в Орионе // Астрон. журн. 1995. Т. 72. №3. С. 397.
19. Тутуков А.В. Поиск планет около звёзд главной последовательности малой массы // Астрон. журн. 1995. Т. 72. №3. С. 400.
20. Тутуков А.В. Планеты и звёзды // Астрон. журн. 1998. Т. 75. №1. С. 113.

21. *Харткопф, Мэйсон* (Hartkopf W.I., Mason B.D.) Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars. Washington: U.S. Nav. Obs. 2003. (updated 2006).
22. *Харткопф и др.* (Hartkopf W.I., Mason B. D., Wycoff G. L.) Fourth Catalog of Interferometric Measurements of Binary Stars. Washington: U.S. Nav. Obs. 2001 (updated 2004).
23. *Шахт Н.А.* Исследование движения и определение кинематических параметров звёзд с невидимыми спутниками по наблюдениям в Пулковке. Результаты фотографических наблюдений  $\delta$  Близнецов // Известия ГАО. 1988. № 205. С. 5.
24. *Шнейдер* (Schneider J.). Extrasolar planets: Overview and future perspectives /Proceedings of International Conference “AstroKazan-2001” (Astronomy and geodesy in new millennium), September 24-29, 2001. Kazan State University: Publisher “DAC”, 2001. P. 313.
25. *Эйткен* (Aitken R.G.) The New General Catalogue of Double Stars within  $120^\circ$  of the North Pole. Washington: Carnegie Inst. 1932.