

НОВАЯ ОРБИТА И ОЦЕНКА МАССЫ ЗВЕЗДЫ 61 CYGNI НА ОСНОВЕ ЕЕ НАБЛЮДЕНИЙ В 1819-2019гг.

И.С.ИЗМАЙЛОВ, Н.А.ШАХТ, Е.В.ПОЛЯКОВ,
Д.Л.ГОРШАНОВ, М.А.ПОГОДИН

Поступила 5 января 2021

Принята к печати 3 мая 2021

Настоящая статья является продолжением наших работ, посвященных определению орбиты и массы звезды 61 Лебеда и изменений фотометрических характеристик ее компонентов. Целью работы было уточнение орбитальных элементов, оценка массы и поиск возможного проявления периодических составляющих в отклонениях от орбитального движения. В работе использовались результаты наблюдений в Пулковской обсерватории на двух инструментах: нормальном астрографе в 1895-1919гг. и на 26-дюймовом рефракторе в 1957-2019гг., а также наиболее ранние микрометрические наблюдения В.Я.Струве в 1819-1837гг. Относительные положения компонентов, определенные по наблюдениям, выполненным с помощью нормального астрографа в 1895-1999гг., публикуются впервые. Из-за близости к Солнцу, а также спектрального класса компонентов - K5V и K7V, 61 Cyg считается вероятным кандидатом в качестве родительской звезды экзопланеты. В сочетании с наблюдениями 26-дюймового рефрактора и преобразованием всех данных в единую систему был заполнен пробел в наблюдениях начала двадцатого века. Использованы современные астрофизические параметры этой звезды и данные, опубликованные в Gaia DR2. Для контроля орбиты, по нашим данным, вычислено лучевое орбитальное ускорение W , которое показало хорошее согласие с ускорением, полученным другими авторами на основе спектральных наблюдений. Обсуждаются также возможные периодические отклонения от орбитального движения звезды.

Ключевые слова: *двойные звезды; масса; орбиты; 61 Cygni; экзопланеты; лучевое ускорение*

1. *Введение.* Двойная звезда 61 Cyg (ADS 14636 = WDS 21069 + 3845 = Gliese 820 = HR 8085 + HR 8086 = HD 201091 + HD 201092) является одной из наиболее близких к Солнцу и в течение многих десятков лет представляет большой интерес для астрономов-наблюдателей. Она относится к астрометрическим двойным звездам и представляет собой широкую пару с близкими по блеску компонентами ($\rho \approx 30''$, $V = 5^m.2$ и $6^m.0$, соответственно).

61 Cyg известна как одна из первых звезд, для которых был определен параллакс $\pi = 0''.314$ [1]. С 1819г. ее, как двойную звезду, начал наблюдать В.Я.Струве в Дерпте, а потом и О.В.Струве в Пулковской обсерватории [2,3].

61 Cyg является одним из наиболее перспективных объектов в качестве родительской звезды для экзопланет. Как следует из последних публикаций (см., например, Agney [4]), у этой звезды возможно обнаружение биомаркеров,

т.е. выявление в атмосфере планеты элементов, подобных составляющим земной атмосферы, а именно кислорода, метана, углекислого газа и др. Как подчеркивают авторы [4], наиболее многообещающими в этом смысле являются звезды, принадлежащие к среднему или позднему подклассам К-карликов – как, например, компоненты 61 Cyg, имеющие спектральный класс K5V и K7V. Надежда, естественно, возлагается на телескопы будущего с апертурой порядка 15 м.

Среди изученных карликов позднего К-класса наиболее соответствующими роли целевых объектов для поисков биосигналов считаются 61 Cyg A и B, а также ϵ Indi, Groombridge 1618 и HD 156026. Они являются подходящими для наблюдений методами транзитной фотометрии, так как при обнаружении планеты у таких объектов, как у 61 Cyg A/B, есть свои преимущества. У них предполагается лучшее соотношение контрастности: планета-звезда, улучшающее отношение сигнал/шум (S/N), более продуктивное, чем, например, при соответствующих наблюдениях звезд солнечного типа класса G2V.

В течение ряда лет продолжалась дискуссия по поводу возможного спутника у одного из компонентов 61 Cyg, заподозренного по систематическим отклонениям от орбитального движения (см. исследования Стрэнда и Дейча [5,6]). Долгое время наличие спутника не подтверждалось дополнительными экспериментальными данными, в частности, спектральными наблюдениями лучевых скоростей или другими возможными проявлениями его присутствия. Известно, что анализ собственного движения, полученного по наблюдениям Hipparcos и Gaia, показал возможность присутствия возмущающего вторичного объекта у компонента 61 Cyg B (т.е. третьего тела в системе двойной звезды – см. Kervela и др., [7]).

Целью нашей настоящей работы было уточнение орбитальных элементов, оценка массы компонентов и поиски возможных проявлений периодических составляющих в отклонениях от орбитального движения.

2. Результаты наблюдений. История наблюдений звезды и ее физические свойства представлены вкратце в наших работах [8,9]. Ранее нами был исследован ряд позиционных наблюдений на пулковском 26-дюймовом ($D = 65$ см, $F = 1040$ см) рефракторе, а также изменение блеска компонентов двойной звезды по фотометрическим наблюдениям на нормальном астрографе ($D = 33$ см, $F = 346$ см) [10].

В данной статье использованы все фотографические и ПЗС- позиционные наблюдения в Пулкове за более, чем 100 лет, а также более ранние микрометрические наблюдения В.Я.Струве. Временное поведение относительных координат X , Y за этот период приведено на рис.1, 2. При обработке была вычислена объединенная орбита по пяти рядам наблюдений:

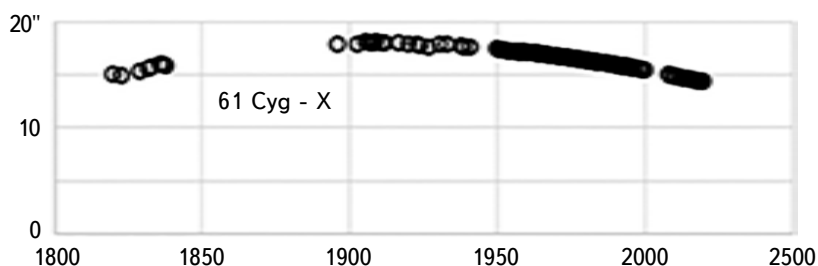


Рис.1. 61 Cyg. Ход со временем относительных координат $X = \rho \sin \theta$.

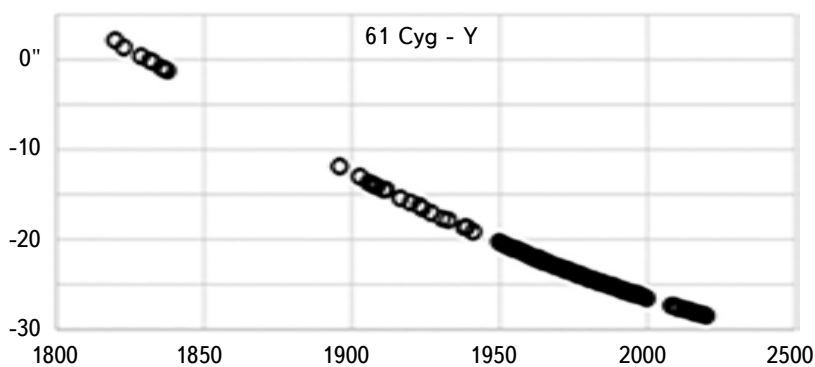


Рис.2. 61 Cyg. Ход со временем относительных координат $Y = \rho \cos \theta$.

- 1) наблюдения В.Я.Струве (1819-1837) с весом, равным 0.145;
- 2) ряд нормального астрографа (NA), фотографический 1895-1940гг. с весом, равным 0.226;
- 3) ряд нормального астрографа, фотографический 1949-1999гг., с весом 0.661;
- 4) ряд 26-дюймового рефрактора (Ref), фотографический 1957-1996гг., с весом 1.127;
- 5) ряд 26-дюймового рефрактора, ПЗС, 2007-2019гг. с весом 3.575.

Точность оценивалась в соответствии с ошибками относительных расстояний и позиционных углов, а также со сравнительной длиной ряда. Поскольку ряды имеют разную точность, им были назначены веса в соответствии с ошибкой единицы веса при аппроксимации каждого ряда квадратичным многочленом.

Впервые публикуемые относительные позиционные положения, определенные по наблюдениям, выполненным с помощью нормального астрографа в 1895-1999гг., все исходные таблицы, которые использовались для определения орбит, а также набор возможных орбит можно загрузить с сайта Страсбургского центра данных (<http://cds.u-strasbg.fr>), либо из системы

баз данных Пулковской обсерватории (<http://izmccd.puldb.ru/vds.htm>).

3. *Орбита двойной звезды 61 Cyg, лучевое ускорение.* Заданные рядом наблюдений веса были учтены в процедуре определения элементов орбиты. Решение находилось по алгоритмам, приведенным в работе Измайлова [11], посвященной вычислению орбит 451 широкой пары двойных звезд. Таким же образом, как в [11], был получен набор возможных орбит, который, в частности, позволил оценить ошибки вычисляемых из орбиты параметров.

Кроме того, для определения орбиты использован ряд измерений лучевой скорости, опубликованных в работе [12] по наблюдениям, выполненным в 1977-1994гг. После аппроксимации данного ряда линейным многочленом мы получили для значения разности лучевых скоростей компонентов В-А величину $\Delta V_r = 1.017 \pm 0.87$ км/с. Вычисленный набор орбит учитывал также ошибку лучевой скорости.

Мы полагали, что надежной проверкой орбиты может быть контроль с помощью лучевого ускорения W . По набору орбит можно вычислить лучевое ускорение W_{orb} с ошибкой, которую дает орбита. Таким образом было получено орбитальное лучевое ускорение $W_{\text{orb}} = 7.23 \pm 0.93$ км/с год, на эпоху 2008.92. В то же время по данным из статьи Trifonov et al. [13], определенное из наблюдений значение лучевого ускорения на ту же самую эпоху составило $W_{\text{obs}} = 7.22 \pm 0.18$ км/с год. Отметим, что данные спектральные наблюдения [13] были выполнены с целью поиска экзопланет, а значение ускорения является побочным результатом.

В табл.1 приведены значения элементов орбиты, вычисленные по взвешенному ряду наблюдений с новым параллаксом Gaia, причем сумма масс при решении являлась свободным, определяемым параметром.

В табл.1 мы приводим элементы новой орбиты, в табл.2 - орбиты для сравнения с предыдущими результатами, т.е. с пулковскими орбитами, опубликованными в 1997, 2006 и 2017гг., а также сравнение с орбитой Джостиса [15].

Видно, что все орбиты не имеют существенных различий, и совпадение улучшается при использовании нового параллакса Gaia. Ошибки элементов,

Таблица 1

НОВАЯ ОРБИТА И СУММА МАСС КОМПОНЕНТОВ ЗВЕЗДЫ 61 CYGNI

a (а.е.)	P (годы)	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	T_p , (год)	π_{tr} (")	$M_{\odot}$
85.9 ± 1.00	704.858 ± 40.221	0.435 ± 0.044	52.018* ± 0.443	154.044 ± 6.821	174.56 ± 2.514	1696.004 ± 6.742	0.286	1.286 ± 0.107

Таблица 2

СРАВНЕНИЕ ОРБИТ ЗВЕЗДЫ 61 CYGNI

a (а.е.)	P (годы)	e	i (°)	ω (°)	Ω (°)	T_p , (год)	π_{tr} (")	$M_\odot$	Ссылки
82.4 ± 2.4	659 ± 17	0.48 ± 0.03	126 ± 1	146 ± 3	176 ± 1	1697 ± 12	0.296	1.3	Kiselev et al. [14], 1997
82.00 ± 2.10	677.81 ± 33.92	0.487 ± 0.035	129.07 ± 2.36	149.31 ± 6.30	178.37 ± 2.14	1708.90 ± 15.55	0.296	1.3	Горшанов и др. [8], 2006
85.18 ± 1.65	664.37 ± 26.84	0.457 ± 0.034	126.71 ± 1.87	149.32 ± 5.97	174.88 ± 1.80	1700.37 ± 12.95	0.286	1.4	Шахт и др. [9], 2017
83.88	722	0.40	51.85*	158.0	172.3	1689.17	0.294	1.13	Josties [15], 1983

Примечания к табл.1 и 2.

1) В двух случаях, отмеченных звездочкой (*), мы, согласно нашему алгоритму вычисления эфемериды, использовали величину наклонности как $180^\circ - i$, т.е. $127^\circ.98$ и $128^\circ.15$, соответственно.

2) Оценки масс приведены в ссылках. Использованы значения параллаксов Hipparcos ($0''.296$), параллакс из работы ван де Кампа, [16] ($0''.294$) и параллакс Gaia ($0''.286$).

приведенные в таблице, получены из набора орбит так, как это было выполнено и изложено в работе Измайлова [11].

Лучевая скорость и параллакс также варьировались, т.е. ошибки орбиты включают ошибки параллакса и лучевой скорости.

4. *Оценка точности О-С и преимущество новой орбиты.* Из графиков на рис.3 видно, что все орбиты очень близкие, от новой орбиты немного отличается старая орбита [14], в которой использовался короткий

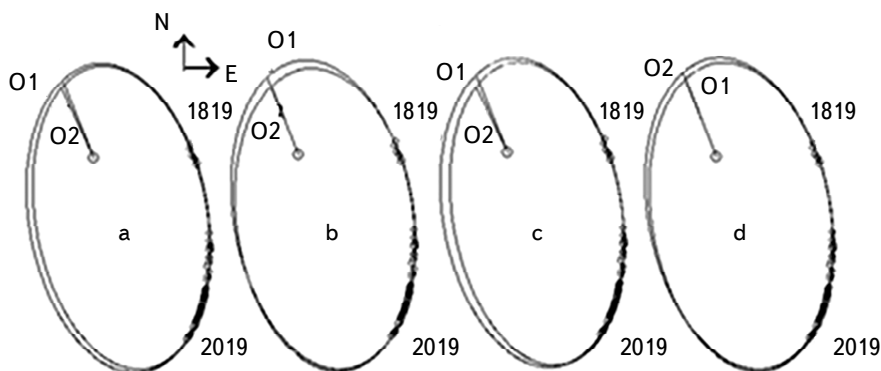


Рис.3. Сравнение относительной орбиты компонентов 61 Cуг, построенной в настоящей работе, (O1) с орбитами из других работ: *a* - орбита по пулковским данным 2017г. [9], *b* - орбита по пулковским данным 2006г. [8], *c* - орбита по пулковским данным, 1997г. [14], *d* - орбита Джостиса, 1983г. [15].

ряд и параллакс Hipparcos.

Преимущество новой орбиты, построенной по объединенному ряду 1819-2019гг. с использованием весов, проявилось в том, что уменьшилась ошибка σ , вычисляемая по О-С из сравнения наблюдений (О) общего ряда 1819-2019гг. с эфемеридой (С), вычисленной по орбите, полученной по этому ряду, равная:

$$\sigma_{(O-C)} = \sqrt{\rho_0^2 \sin^2(\theta_0 - \theta_C) + (\rho_0 - \rho_C)^2}.$$

Ошибка σ , вычисляемая по наиболее короткому ряду наблюдений, менее 20 лет [14], оказалась равной 0".334. Эта же ошибка уменьшилась в среднем до 0".065 для орбит [8,9], которые вычислялись уже по 40-летнему, а также по более протяженному ряду, и составила 0".051 для орбиты, построенной в настоящей работе.

Следует отметить, что соответствующая ошибка оказывается значительно меньше, если орбита получена только на одном инструменте и эфемерида вычислена по этим же наблюдениям. Такая ошибка составила 0".019 для рефрактора [9], 0".023 - для орбиты, полученной на нормальном астрографе по наблюдениям 1949-1999гг. и 0".048 - по довоенному ряду фотографических наблюдений 1895-1940гг. Соответствующая ошибка по нашим ПЗС наблюдениям составила 0".006.

Из сравнения орбиты Джостиса [15] с наблюдениями, используемыми нами, а также с наблюдениями, используемыми для орбиты [15], (ряд наблюдений с 1834 по 1989гг.), следует, что ошибки составляют 0".069 и 0".013, соответственно.

На рис.4-8 дан ход со временем величин О-С для рефрактора (Ref) и нормального астрографа (NA).

Различие точности рядов, как основание для назначения разных весов,

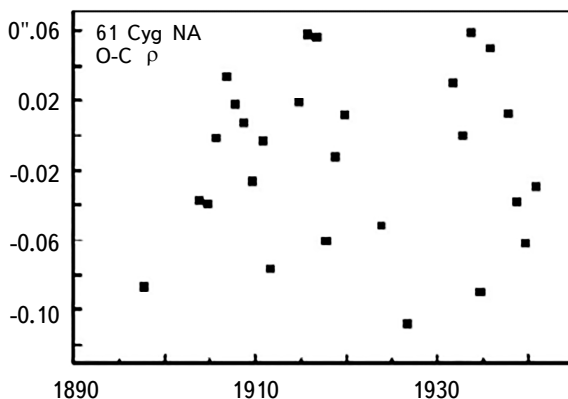


Рис.4. Ход со временем разностей О-С ряда NA 1895-1940гг. в относительных расстояниях ρ между В и А.

можно проиллюстрировать графиками (рис.4-8) для О-С, для довоенного (1895-1940гг.) ряда NA, пластинки которого оказались в трудных условиях

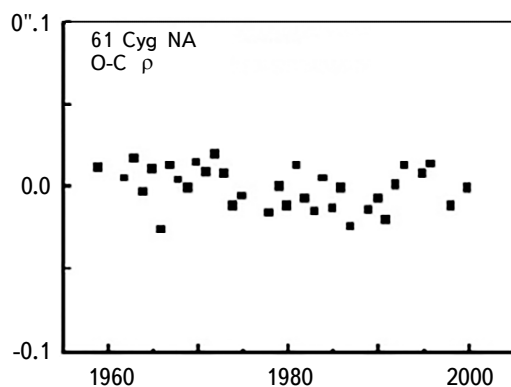


Рис.5. То же, что на рис.4, но для части ряда NA 1958-1999гг.

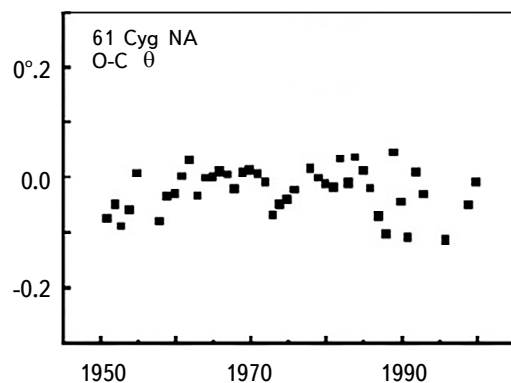


Рис.6. Ход со временем разностей О-С в позиционных углах θ по наблюдениям на NA в 1949-1999гг.

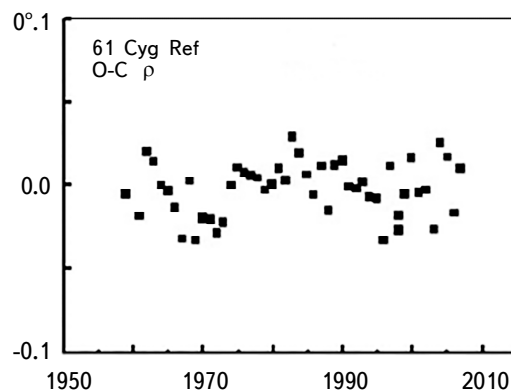


Рис.7. Ход со временем разностей О-С в относительных расстояниях ρ между компонентами В и А по наблюдениям на рефракторе.

хранения во время ВОВ 1941-1945гг., и однородными рядами НА и рефрактора, полученными во второй половине XX века. Заметно также ухудшение качества фотоматериалов и необходимость перехода на ПЗС.

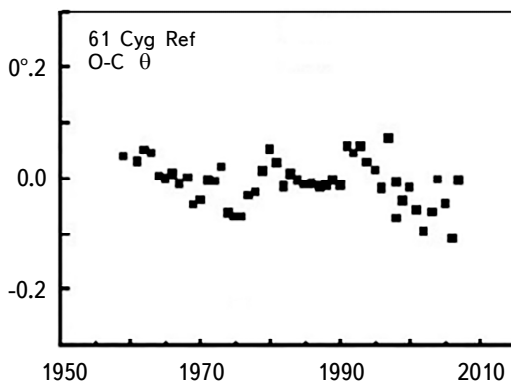


Рис.8. Ход со временем разностей О-С в в позиционных углах θ по наблюдениям на рефракторе.

5. Поиски периодических колебаний в движении 61 Cyg. При исследовании долговременных рядов в некоторых случаях можно заметить периодические колебания в величинах О-С (см. рис.9). В связи с этим мы произвели поиск периодических колебаний с помощью частотного анализа, применив методы, использованные ранее в нашей работе [10]:

1) Был использован метод Скаргла, изложенный в работах Скаргла [17] и Блэка и Скаргла [18]. Применение его к нашим данным для фотометрического пулковского ряда и краткое его описание приводится в работе [10].

2) Мы воспользовались также методом синусоидальной аппроксимации (МСА), примененным нами ранее в работе [10] и использующим одну из упрощенных версий известного LNP-метода (Lomb Normalized Periodogram Method), см. [19].

Ранее данный метод поиска периодов был также опробован и применен для диагностики магнитосфер у Ae/Be-звезд Хербига [20,21].

Анализу были подвергнуты различные выборки. При этом большинство полученных периодов оказались ниже уровня значимости, за исключением длительных периодов, в среднем около 35 лет, выявляемых как способом Скаргла, так и методом МСА, по разным выборкам, с использованием как наблюдений нормального астрографа, так и 26-дюймового рефрактора. При этом значения периода менялись в пределах $30 \div 40$ лет в зависимости от выборки.

Для примера мы выбрали наиболее точную часть наших данных - однородный и протяженный ряд наблюдений 26-дюймового рефрактора с

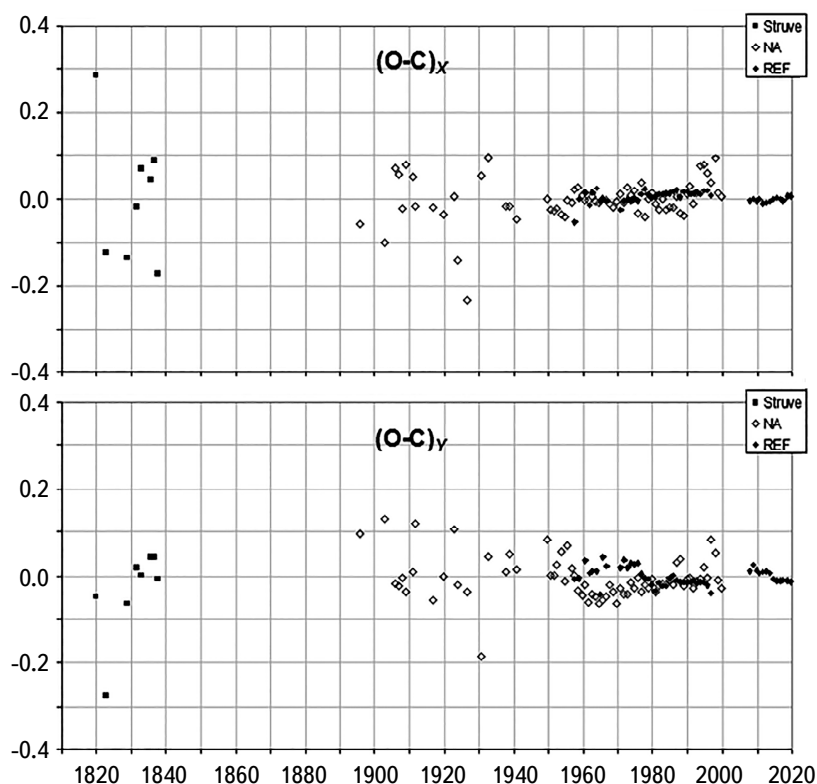


Рис.9. Уклонения О-С данных, по которым строилась орбита в настоящей работе, от этой орбиты по прямоугольным координатам X (верхняя панель) и Y (нижняя панель).

1957 по 2019гг., где данный период заметно проявился в проекции на прямоугольные оси координат X и Y . На рис.10 приведены соответствующие периодограммы, построенные методом Скаргла по О-С.

Для обеих координат выделяется высокий пик, значительно превосходящий уровень достоверности и соответствующий периоду около 39 лет.

Два меньших пика справа от него, возможно, являются его искаженными гармониками. Однако на периодограмме для Y обращает на себя внимание один из них, соответствующий периоду 12.1 г. и близкий к уровню достоверности. Следует отметить, что в предыдущих наших исследованиях, проводившихся по более коротким наблюдательным рядам, таким как [8], также выявлялись пики с периодами $11 \div 13$ лет. Длительные периоды проявились, когда мы получили возможность расширить диапазон частот в связи с увеличением продолжительности наблюдений.

Также обращает на себя внимание наличие небольших пиков с периодом 4.6-4.8г. на периодограммах для обеих координат.

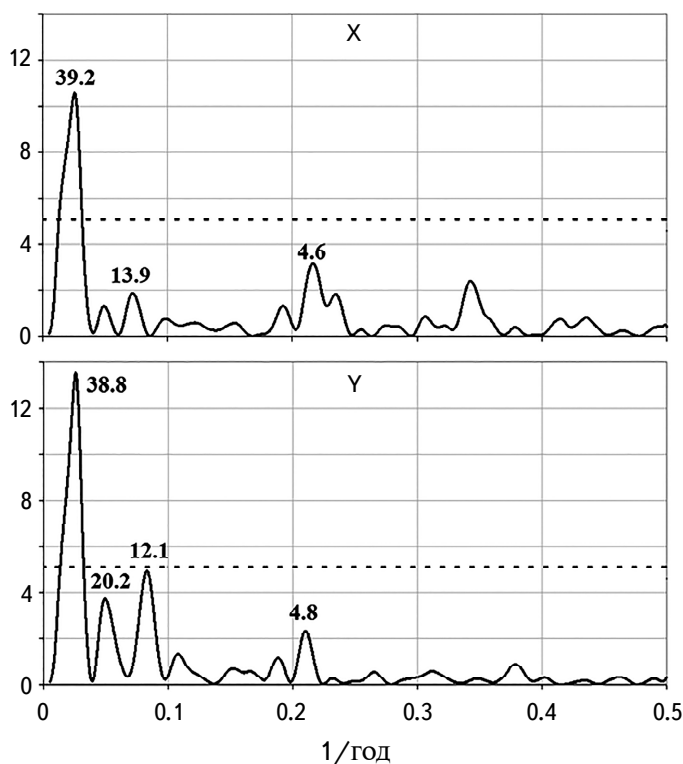


Рис.10. Периодограммы, полученные методом Скаргла, для уклонений О-С ряда наблюдений на 26-дюймовом рефракторе 1957-2019гг. от орбиты, по координатам X, Y. По оси абсцисс отложена частота в единицах 1/год, по оси ординат - мощность в относительных единицах. Пунктиром обозначен уровень 99-процентной достоверности при поиске двух периодов. Около пиков подписаны соответствующие значения периодов в годах.

Для объяснения происхождения этих периодических колебаний в положении звезды мы рассмотрели следующие возможные версии:

1) Известно, что оба компонента являются активными переменными звездами. Компонент А - переменная типа BY Draconis, звезда В - вспыхивающая с иррегулярным изменением блеска. Вековое изменение блеска составляющих, а также их переменность, связанная с происходящими в звезде циклическими процессами, были проанализированы на наблюдательном материале, также полученном на пулковском нормальном астрографе [10]. Найдены периоды изменения блеска, причем у обоих компонентов выявился период около 15 лет, а также отмечено вековое увеличение блеска у компонента В и уменьшение его у А. Возможным объяснением колебаний в координатах может быть активность в атмосфере одного из компонентов, когда меняется цвет звезды, и из-за эффектов хроматической рефракции меняется высота над горизонтом центра изображения, которая зависит от цвета, т.о. колебания

цвета коррелируют с позиционными колебаниями.

2) Возможно, могли играть роль причины, связанные с изменением условий наблюдений, а также качества фотоматериала, на длительном интервале наблюдений.

3) Если исключить астроклиматические и инструментальные причины, можно предположить, что более стабильный период имеет гравитационное происхождение. В таком случае можно допустить наличие спутника с массой 2 массы Юпитера на расстоянии от главной звезды 8.6 и 8.3 а.е для периода 30 лет (или 9.9 и 10.2 а.е. для периода 39 лет) и далеко от обитаемой зоны.

6. *Заключение.* 1) Получена новая орбита, в построении которой задействованы все пулковские наблюдения, а также старые, далеко отстоящие по времени. Произведена новая оценка суммы масс компонентов с соответствующей ошибкой. Проанализирована точность рядов наблюдений в результате оценки разных инструментов и методов. Получена наименьшая ошибка О-С по разнородным рядам, равная 0".051. Достигнута минимальная ошибка по современному ряду ПЗС, равная 0".006, притом, что наблюдения с ПЗС уже обеспечивают продолжительный 12-летний интервал однородных наблюдений на наземном длиннофокусном инструменте, и эти наблюдения продолжаются.

2) В настоящей работе применена методика определения орбиты, разработанная с помощью традиционного метода параметров видимого движения (ПВД) см. [22,11], но с его улучшением с применением нелинейных уравнений МНК. Также, для более строгого контроля орбитального решения, было вычислено с высокой точностью лучевое ускорение W_{orb} , которое близко совпало с наблюдаемым значением W_{obs} [13], полученным в результате спектральных наблюдений.

3) Дополнительно мы провели исследование разностей О-С между наблюдениями и эфемеридой, рассчитанной по полученной орбите. Применение метода частотного анализа для поисков периодических колебаний в движении приводит к неоднозначным результатам. Некоторые из выявленных периодов коррелируют с периодами негравитационного происхождения, часть их не превышает уровень значимости. Наиболее устойчивые долговременные периоды порядка 30-40 лет очень интересны для дальнейшего рассмотрения и наблюдений, а также возможного сравнения с результатами DR3 Gaia.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-02-0563А.

NEW ORBIT AND ESTIMATION OF THE MASS OF STAR 61 CYGNI BASED ON ITS OBSERVATIONS IN 1819-2019

I.S.IZMAILOV, N.A.SHAKHT, E.V.POLYAKOV,
D.L.GORSHANOV, M.A.POGODIN

This article continues our work on the determination of the orbit and mass of the 61 Cyg star and changing the photometric characteristics of its components. The aim of the work was to clarify the orbital elements, to estimate the mass and to search for the possible manifestation of periodic components in deviations from orbital motion. The work used the results of observations at the Pulkovo Observatory with two instruments: a normal astrograph in 1895-1919 and a 26-inch (65 cm) refractor in 1957-2019, as well as the earliest micrometric observations of V.Ja. Struve in 1819-1837. The relative positions of the components determined from observations of the normal astrograph in 1895-1999 are published for the first time. Due to its proximity to the Sun as well as the spectral types of the components, K5V and K7V, 61 Cyg is considered to be a likely candidate for the exoplanet's parent star. Combined with observations of the 26-inch refractor and the conversion of all data into a single system, the observational gap of the early twentieth century was filled. The modern astrophysical parameters of this star and data published in Gaia DR2 were used. To check the orbit, the radial orbital acceleration W was calculated according to our data. It showed good agreement with the acceleration obtained by other authors based on spectral observations. Also, possible deviations from orbital motion are discussed.

Keywords: *binary stars: mass: orbits: 61 Cygni: exoplanets*

ЛИТЕРАТУРА

1. *F.W.Bessel*, "Bestimmung der Entfernung des 61sten Sterns des Schwans/ Von Herrn Geheimen Rath und Ritter Bessel", *Astron. Nachr.*, **16**, 65, 1839.
2. *F.G.W.Struve*, *Stellarum duplicium et multiplicium mensurae*, Petropolis, 1837.
3. *O.Struve*, *Pulkova Observations*, **9**, 1878.
4. *G.N.Arney*, *Astrophys. J. Lett.*, **873**, L7, 2019.
5. *K.Aa.Strand*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **55**, 29, 1943.
6. *A.N.Deich*, *Soviet Astron.*, **21**, 182, 1977.
7. *P.Kervela, F.Arenou, F.Mignard et al.*, *Astron. Astrophys.*, **623**, A72, 2019.

8. *D.L.Gorshanov, N.A.Shakht, A.A.Kiselev*, *Astrophysics*, **49**, 386, 2006.
9. *N.A.Shakht, D.L.Gorshanov, O.O.Vasilkova*, *Astrophysics*, **60**, 507, 2017.
10. *Е.В.Поляков, О.О.Василькова, Д.Л.Горшанов и др.*, *Астрофизика*, **61**, 495, 2018, (*Astrophysics*, **61**, 444, 2018).
11. *I.S.Izmailov*, *Astron. Lett.*, **45**, 30, 2019.
12. *J.-L.Halbwegs, M.Mayor, S.Udry*, *Astron. Astrophys.*, **619**, A81, 2018.
13. *T.Trifonov, L.Tal-Or, M.Zechmeister et al.*, *Astron. Astrophys.*, **636**, A74, 2020.
14. *A.A.Kiselev, O.V.Kiyaeva, L.G.Romanenko*, in: Workshop "Visual Double Stars", Santiago de Compostela Spain, *ASSL*, **223**, 377, 1997.
15. *F.J.Josties*, *Low. Observ. Bull.*, **167**, 16, 1983.
16. *P. van de Kamp*, *Astron. J.*, **78**, 1099, 1973.
17. *J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 835, 1982.
18. *D.S.Black, J.D.Scargle*, *Astrophys. J.*, **263**, 854, 1982.
19. *W.H.Press, S.A.Teukolsky, W.T.Watterling et al.*, *Numerical Recipes. The Art of Scientific Computing (Second Edition). Section 13.8 (C)*, Cambridge University Press, 1992.
20. *M.Schöller, M.A.Pogodin, J.A.Cahuasqui et al.*, *Astron. Astrophys.*, **592**, 50, 2016.
21. *M.A.Pogodin, S.E.Pavlovskij, N.A.Drake et al.*, *ASP Conf. Ser.*, **510**, 157, 2017.
22. *А.А.Киселев, Л.Г.Романенко*, *Астрон. ж.*, **32**, 875, 1996.