

УДК 524.382

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ В СИСТЕМЕ ИЕРАРХИЧЕСКОЙ ТРОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ ADS 48 НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ GAIA DR2 И 26-ДЮЙМОВОГО РЕФРАКТОРА ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2020 О. В. Кияева^{1*}, Р. Я. Жучков², И. С. Измайлов¹¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия² Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 27 августа 2019 года; после доработки 18 мая 2020 года; принята к публикации 18 мая 2020 года

По данным каталога Gaia DR2 о точных положениях и собственных движениях трех компонентов звезды ADS 48, их параллаксах и лучевых скоростях на эпоху 2015.5 определены мгновенные относительные положения и движения компонентов. Только по наблюдениям Gaia DR2 методом параметров видимого движения вычислено семейство орбит пары АВ, из которого выбраны те, что лучше всего согласуются с пулковскими данными. Сравнение с первыми наблюдениями XIX века позволило независимо оценить сумму масс компонентов в диапазоне $1.15 < M_{A+B} < 1.4 M_{\odot}$. Вычислены орбиты внешней пары: с минимальным периодом 79×10^3 лет и наиболее вероятным — около 3×10^5 лет. Сделан вывод о том, что система устойчива для наиболее вероятного значения относительной лучевой скорости $\Delta V_r = 0.7 \text{ км с}^{-1}$ и может быть нестабильна вблизи границ возможной разницы скоростей. При детальном анализе однородных пулковских наблюдений выявлено возмущение с периодом 11 лет. Показано, что данное возмущение связано не со звездой, а с периодическим климатическим процессом, изменяющим условия наблюдений. Сравнение мгновенного и среднего относительного движения не исключает наличие спутника планетной массы у одного из компонентов.

Ключевые слова: двойные; общее — звезды: индивидуальные: ADS 48

1. ВВЕДЕНИЕ

Кратная звездная система ADS 48, открытая Отто Струве в 1876 году, неоднократно исследовалась разными авторами (см., например, Güntzel-Lingner 1955, Нортманн 1964), но их внимание привлекала в основном внутренняя пара АВ. Физически связаны (общим параллаксом и собственными движениями) три звезды: А, В и F, согласно идентификации в каталоге WDS (Mason et al. 2016). Для внутренней пары АВ имеется длинный ряд наблюдений с момента ее открытия, а компонент F не наблюдался почти столетие.

На 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории система наблюдается с 1961 г., но регулярные однородные фотографические наблюдения проводились с 1968 по 1995 г. Всего имеется 137 фотопластинок (см. Kiselev et al. 2014), все три компонента измерены на 115 пластинках на приборе «Фантазия» (Kiyeva et al. 2001). С 2003 г. ведутся ПЗС-наблюдения пары АВ, а результаты

наблюдений за период с 2003 по 2012 гг. опубликованы Izmailov et al. (2010), Izmailov and Roshchina (2016) и используются в данной работе.

В шестом каталоге орбит Hartkopf and Mason (2016) для пары АВ приводятся две разные орбиты: с периодом 1550 лет (Popović and Pavlović 1996) и определенная нами с периодом 510 лет (Kiyeva et al. 2001). Она была получена методом параметров видимого движения (ПВД) (Kiselev and Kiyeva 1980) по однородному ряду фотографических наблюдений 1968–1995 гг., выполненных на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории. Использовались ПВД, вычисленные на эпоху 1980.0, параллакс из каталога Hipparcos версии 1997 г., равный 85 мсд, и лучевые скорости из каталога Tokovinin (1990). До 2012 г., когда появились первые незначительные отклонения (см. Hartkopf and Mason 2015, Mason et al. 2013), эта орбита отлично удовлетворяла наблюдениям, но соответствующая ей сумма масс компонентов А и В ($1.4 M_{\odot}$) превосходила ожидаемую согласно спектральным классам (К6 и М0), равную $1.1 M_{\odot}$. Однако в работе Neves et al. (2013), посвященной

*E-mail: kiyeva@list.ru

изучению физических свойств М-карликов, для масс компонентов данной звезды приведены следующие значения: $M_A = 0.66 M_\odot$, $M_B = 0.65 M_\odot$, $M_F = 0.53 M_\odot$. Таким образом, превышение массы в подсистеме АВ оправдано.

В каталоге Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al. 2018) для всех трех компонентов приводятся данные о положении, движении, лучевой скорости и параллаксе, соответствующие одному моменту времени.

Этих данных достаточно для того, чтобы только по ним определить семейство орбит внутренней пары АВ методом ПВД. Для всех орбит семейства неизвестные свободные параметры — это сумма масс компонентов и угол β между пространственным вектором положения спутника в момент наблюдения и его проекцией на картинную плоскость. Остальные наблюдения служат для того, чтобы из семейства выделить лучшее решение и независимо оценить сумму масс компонентов. Использование однородных пулковских данных позволяет сделать это точнее.

Кроме того, мы можем сравнить ПВД, полученные по наблюдению Gaia на момент 2015.5, и решения по однородным пулковским наблюдениям на средний момент этих наблюдений. Такое сравнение позволяет судить о наличии возмущений в системе.

Эта идея не нова. Астрометрические двойные были предсказаны в работе Gontcharov et al. (2000) на основании сравнения собственных движений звезд из астрометрических каталогов с мгновенными собственными движениями из каталога Hipparcos, а затем для некоторых звезд были вычислены астрометрические орбиты (см. Gontcharov and Kiyeva 2002; 2010).

Также по разности оценок собственных движений из разных источников в работе Khovrichiev et al. (2016) была установлена двойственность некоторых звезд.

В данной работе мы реализуем такую возможность на примере одной системы.

2. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИДИМОГО ДВИЖЕНИЯ

Исторически принято представлять наблюдения двойных звезд в полярных координатах (ρ , θ). В каталоге Gaia DR2 приведены экваториальные координаты и собственные движения компонентов, а также их ошибки на средний момент наблюдений 2015.5. Параметры видимого движения — расстояние между компонентами ρ в секундах дуги, позиционный угол θ в градусах, видимое относительное

движение μ в миллисекундах дуги в год и позиционный угол направления видимого движения ψ в градусах вычисляем по следующим формулам:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \arctan \frac{x}{y}$$

$$\mu = \sqrt{\mu'_x{}^2 + \mu'_y{}^2}, \quad \psi = \arctan \frac{\mu'_x}{\mu'_y}.$$

Здесь

$$x = (\alpha_B - \alpha_A) \cos \delta \times 3600,$$

$$y = (\delta_B - \delta_A) \times 3600,$$

$$\delta = (\delta_A + \delta_B)/2,$$

$$\mu'_x = \mu_{xB} - \mu_{xA}, \quad \mu'_y = \mu_{yB} - \mu_{yA}.$$

В таблице 1 представлены ПВД, вычисленные по наблюдениям Gaia DR2 и многолетним рядам наблюдений пулковского 26-дюймового рефрактора. Для пары АВ мы проводим сравнение только с ПЗС-наблюдениями 2003–2012 гг. Для этой пары обнаружено систематическое расхождение по ρ , которое хорошо заметно на рис. 1.

На этом рисунке обозначены координаты пулковских наблюдений, наблюдения Gaia, а также направления скорости изменения координат пулковских рядов и Gaia. Соответствующие значения $\dot{\rho} = \mu \cos(\psi - \theta)$ и $\dot{\theta} = \mu \sin(\psi - \theta)/\rho$ также представлены в таблице 1. С поправкой $\Delta\rho = 0''.03$ наблюдение Gaia переведено на систему наземных наблюдений. В таблице 1 дано исправленное значение. ПВД Gaia служат основой для определения орбиты пары АВ.

Для того чтобы вычислить ПВД компонента F относительно центра масс пары АВ (обозначим его С), надо знать отношение масс компонентов и либо орбиту внутренней пары, либо измерения АВ и АF в один и тот же момент времени. В Пулково все три звезды наблюдались на одних и тех же пластинках, в каталоге Gaia также приведены наблюдения всех компонентов на момент 2015.5. Поэтому вычисляем вектор $\mathbf{CF} = \mathbf{AF} - q\mathbf{AB}$, где $q = M_B/(M_A + M_B)$, M_A и M_B — массы компонентов. Мы используем значение $q = 0.496$ с массами из работы Neves et al. (2013).

Тот факт, что вычисленные ПВД, определяющие направление движения (ψ , таблица 1), для внешней пары заметно расходятся, явился поводом проанализировать однородный фотографический ряд CF более подробно. Координаты F относительно центра масс АВ, полученные по фотографическим наблюдениям 1968–1995 гг., представлены на рис. 2. Были вычислены средние положения в скользящем окне пяти лет, которые также представлены на рис. 2. Визуально заметно, что сглаженный ряд, проявившийся из шума (амплитуда колебаний по

Таблица 1. Сравнение ПВД, вычисленных по длинным рядам 26-дюймового рефрактора на момент T_0 и по наблюдению Gaia DR2

Пара	AB	AB	AB-F	AB-F	AB-F
Инструмент	26", ПЗС индивидуальные	GAIA	26", фото индивидуальные	26", фото сглаженные	GAIA
Параметры					
$T_1 - T_2$	2003–2012	–	1968–1995	1971–1992	–
T_0	2008.6	2015.5	1981.5	1981.5	2015.5
n	48	–	115	30	–
ρ , угл. сек.	6.0534 ± 0.0012	6.00768* ± 0.00008	327.3322 ± 0.0023	327.3339 ± 0.0010	327.1754 ± 0.0002
θ_{2000} , град.	185.3604 ± 0.0059	188.2084 ± 0.0010	254.2942 ± 0.0017	254.2943 ± 0.0005	254.25739 ± 0.00001
μ , мсд/год	43.1 ± 0.3	44.94 ± 0.18	4.3 ± 0.5	3.9 ± 0.2	5.4 ± 0.1
ψ_{2000} , град.	283.09 ± 0.7	288.06 ± 0.16	86.4 ± 19.6	73.2 ± 7.4	37.8 ± 1.1
$\dot{\rho}$, мсд/год	–6.4 ± 0.5	–7.7 ± 0.1	–4.2 ± 0.4	–3.9 ± 0.2	–4.4 ± 0.1
$\dot{\theta}$, град./год	0.4034 ± 0.0024	0.4202 ± 0.0017	–0.0002 ± 0.0003	–0.0000 ± 0.0001	–0.00056 ± 0.00001

Здесь n — число индивидуальных или сглаженных наблюдений,

* — приводится значение ρ с учетом поправки Gaia–ПЗС = $+0''.03$.

ρ равна 10 мсд, по θ — $0''.003$), содержит волну в обеих координатах. Подробно это рассмотрено в разделе 7.

3. ОРБИТА ВНУТРЕННЕЙ ПАРЫ АВ

Для определения орбиты пары АВ методом ПВД мы используем данные из каталога Gaia: параметры видимого движения, полученные с высокой точностью (таблица 1), среднее значение параллакса, равное 86.90 ± 0.05 мсд, относительную лучевую скорость $\Delta V_r = -3.4 \pm 0.27$ км с $^{-1}$. Этих данных достаточно для того, чтобы определить семейства орбит при заданных массах. Из этих семейств выбраны те орбиты, которые хорошо согласуются с наземными наблюдениями пулковского 26-дюймового рефрактора, к которым для надежности добавлены два удаленных положения, усредненные по наблюдениям из каталога WDS,

на эпохи 1945 и 1908. Остальные наблюдения используются только для контроля.

Сравнение орбит с наблюдательными данными представлено на рис. 3. Так как первые наблюдения XIX века имеют большой разброс по ρ , получаем, что сумма масс компонентов попадает в диапазон $1.15 < M_{A+B} < 1.4 M_\odot$. Таким образом, мы независимо получили диапазон для суммы масс компонентов и углы β между картинной плоскостью и пространственным вектором положения спутника на орбите, которые однозначно определяют единственное решение из семейства орбит.

В таблице 2 мы приводим орбиты, соответствующие $M_{A+B} = 1.2 M_\odot$ и $M_{A+B} = 1.3 M_\odot$ (согласно оценке Neves et al. (2013)). Ошибки орбит определяются большой ошибкой наблюдений относительной лучевой скорости.

Для сравнения в таблице 2 приведены также наша орбита (Kiyeva et al. 2001) и усредненная с весами орбита из статьи Izmailov (2019).

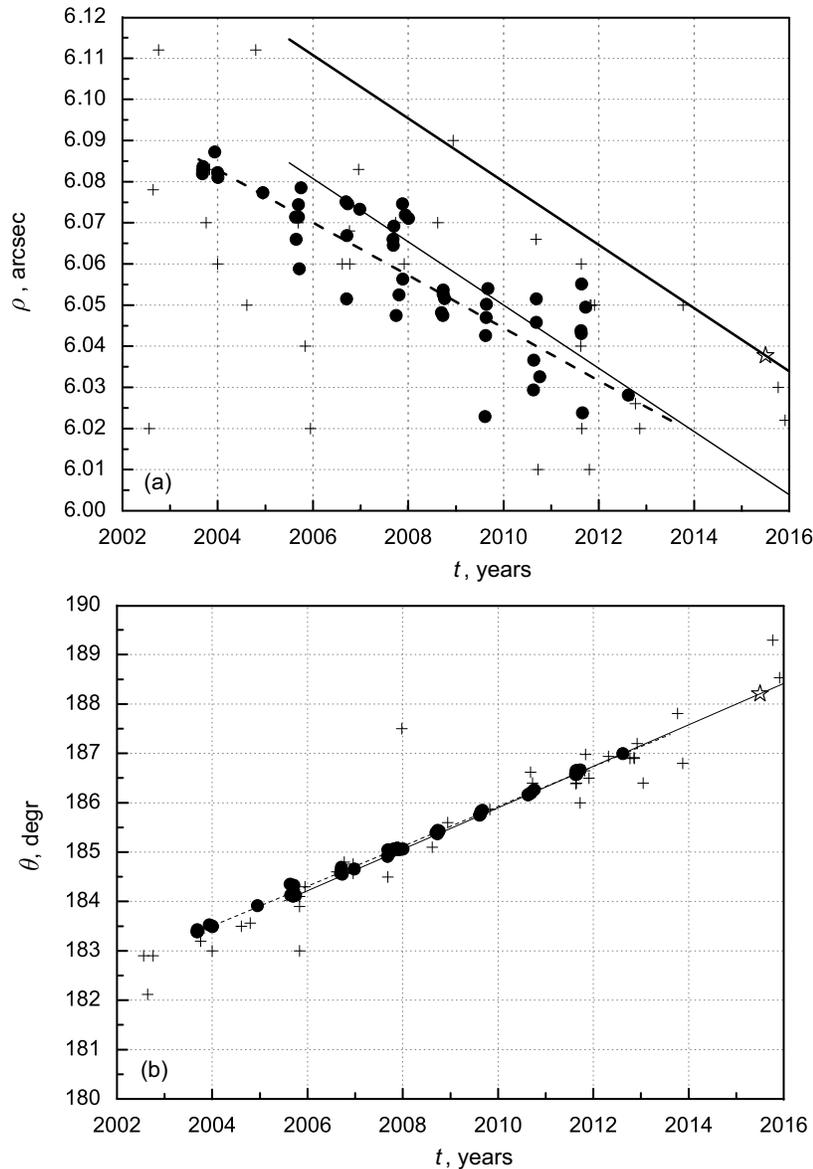


Рис. 1. Пара АВ. Сравнение пулковских ПЗС-наблюдений (черные кружки) и наблюдения Gaia (открытая звездочка): (a) — $\rho(t)$, (b) — $\theta(t)$. Жирная сплошная линия отражает движение по наблюдению Gaia до внесения поправки, тонкая — после ее внесения, штриховая — движение по ПЗС-наблюдениям. Крестики — разнородные наблюдения из каталога WDS.

ПВД для орбиты 2001 г. были получены только по фотографическим наблюдениям 26-дюймового рефрактора, а орбита Измайлова является средним решением из 200 орбит, полученных методом Тиле–Иннеса по всем имеющимся наблюдениям. Тот факт, что все орбиты в пределах ошибок согласуются между собой, говорит о надежности решения.

Так как ошибки пулковских фотографических и ПЗС-наблюдений известны, мы вычислили с учетом весов их среднеквадратические значения невязок σ_ρ и σ_τ , а также невязки $(O - C)_{G\tau}$ и

$(O - C)_{G\tau}$ относительно наблюдения Gaia. Они тоже приведены в таблице 2.

4. ОРБИТА ВНЕШНЕЙ ПАРЫ АВ-F

Движение внешней пары происходит по направлению ρ , и мы можем определенно утверждать, что для всех орбит семейства наклон орбиты $i \approx 90^\circ$, а долгота восходящего узла $\Omega \approx \theta - 180^\circ$. Поэтому можно вычислить угол между плоскостями внешней и внутренней орбит. В результате получаем, что плоскости орбит некомпланарны. Для всех внутренних орбит, представленных в таблице 2, угол между плоскостями превышает 67° .

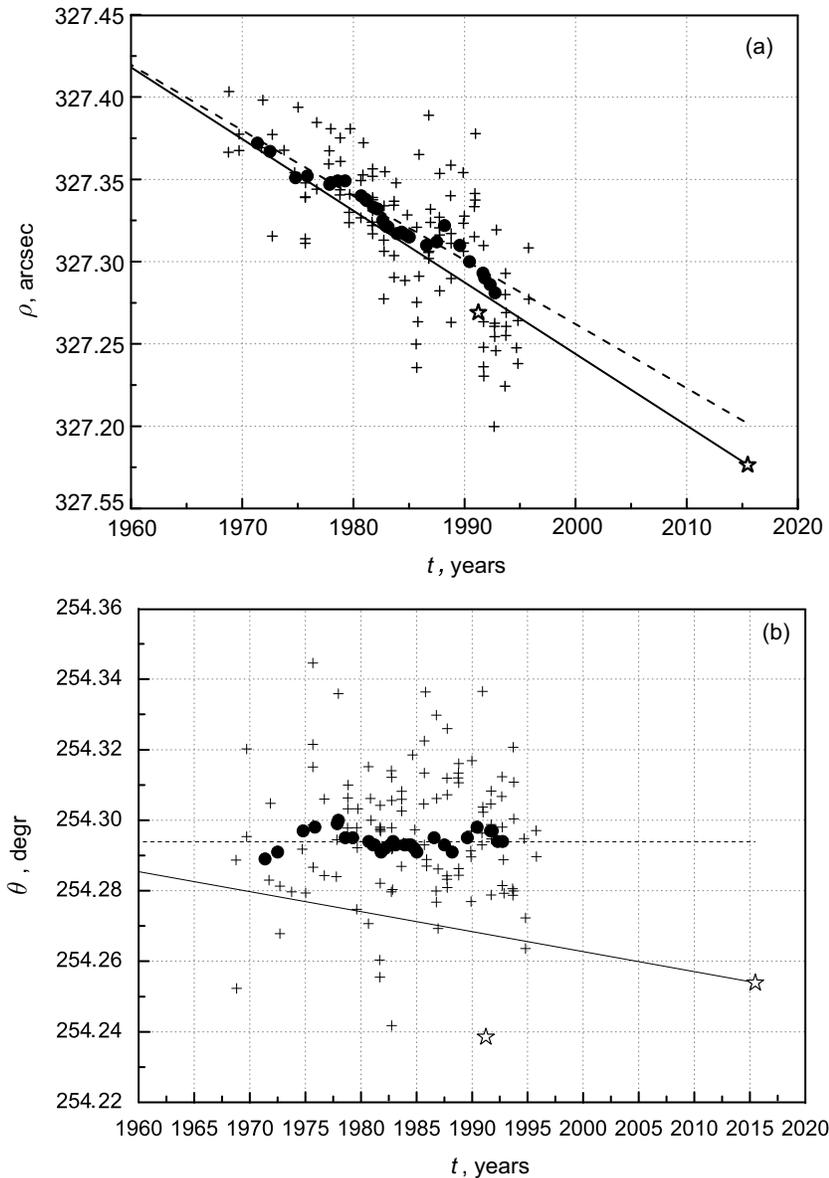


Рис. 2. Пара АВ–F. Сравнение пулковских фотографических наблюдений до сглаживания (крестики), после сглаживания (черные кружки) и наблюдений Hipparcos и Gaia (открытые звездочки): (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$. Сплошная линия отражает движение по наблюдению Gaia, штриховая — движение по фотографическим наблюдениям.

Для определения семейства орбит мы используем ПВД, вычисленные по сглаженным наблюдениям (см. таблицу 1), так как они более точные, чем индивидуальные. Принимаем параллакс равным 87.0 ± 0.1 мсд, $M_{A+B+F} = 1.84 M_{\odot}$. Относительная лучевая скорость из каталога Gaia DR2

$$\Delta V_{r,CF} = \Delta V_{r,AF} - q\Delta V_{r,AB} = -0.7 \pm 0.4 \text{ км с}^{-1}.$$

Согласно работе Tokovinin (1990),

$$\Delta V_{r,CF} = -0.3 \pm 0.4 \text{ км с}^{-1}.$$

Разность эпох 25 лет для медленно движущейся пары не существенна. Результаты согласуются

в пределах ошибки. Орбита эллиптическая, если $|\Delta V_{r,CF}| \leq 0.89 \text{ км с}^{-1}$.

В таблице 3 приведены элементы орбит, соответствующие трем значениям $\Delta V_{r,CF}$ и трем значениям β : $\beta = 0^\circ$ (орбита соответствует минимальному периоду) и средние значения $\beta = \pm\beta_{\text{mid}}$, где $\sin \beta_{\text{mid}} = 0.5 \sin \beta_{\text{max}}$, β_{max} — максимальное значение β для эллиптической орбиты.

Нас интересует, на какое минимальное расстояние R_{min} возможно сближение пар АВ и АВ–F в периастре внешней орбиты. На рис. 4 представлены зависимости $e(\beta)$ и $\lg R_{\text{min}}(\beta)$.

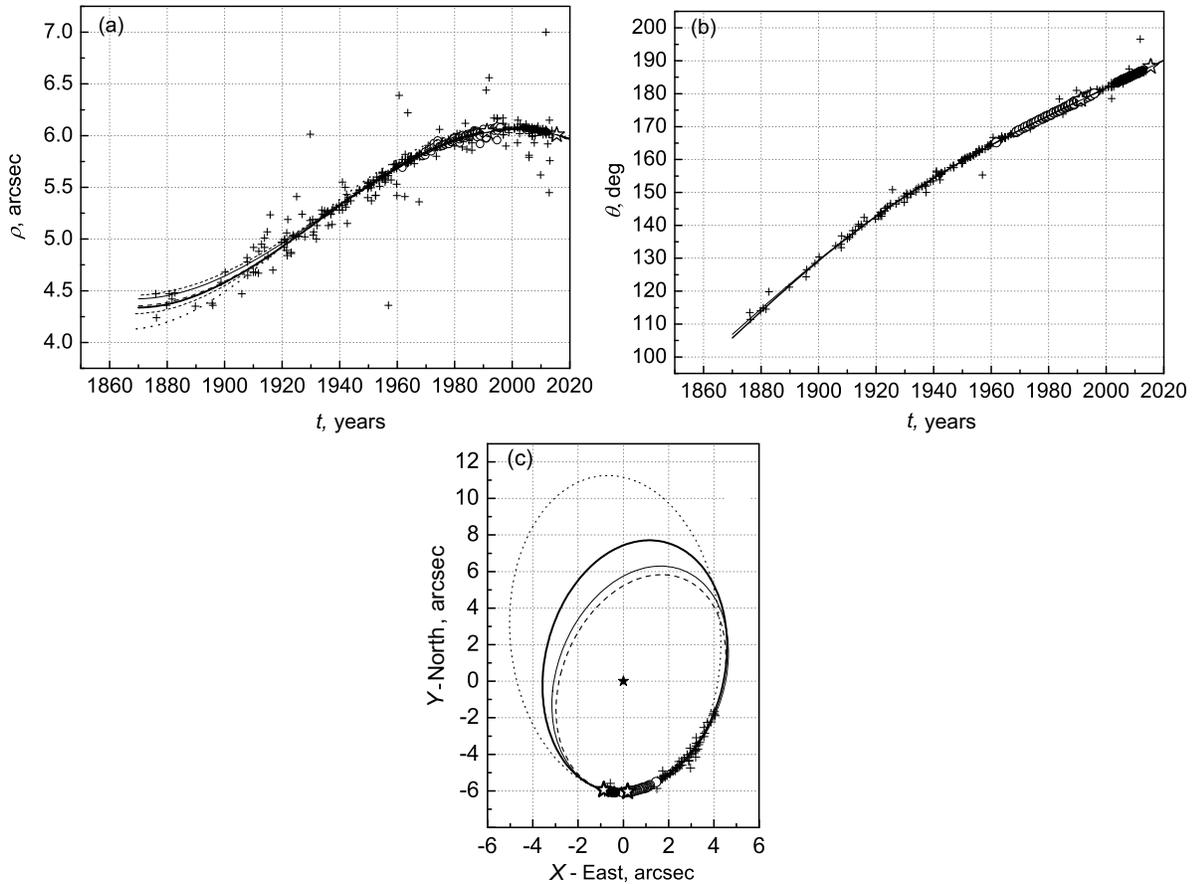


Рис. 3. Сравнение ПВД-орбит пары АВ с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (b) — $\theta(t)$, (с) — орбита в картинной плоскости. Обозначения: крестики — данные из WDS, открытые и заполненные кружки — фотографические и ПЗС-наблюдения соответственно, открытые звездочки — Hipparcos и Gaia. Жирная и тонкая сплошные линии обозначают орбиты, соответствующие массам $1.2 M_{\odot}$ и $1.3 M_{\odot}$, пунктир — массе $1.1 M_{\odot}$, толстая штриховая линия — орбита из нашей работы Kiyeva et al. (2001). Тонкие штриховые линии на панели (а) — эфемериды орбит, ограниченных массами 1.15 и $1.4 M_{\odot}$, черная звездочка на панели (с) — главный компонент.

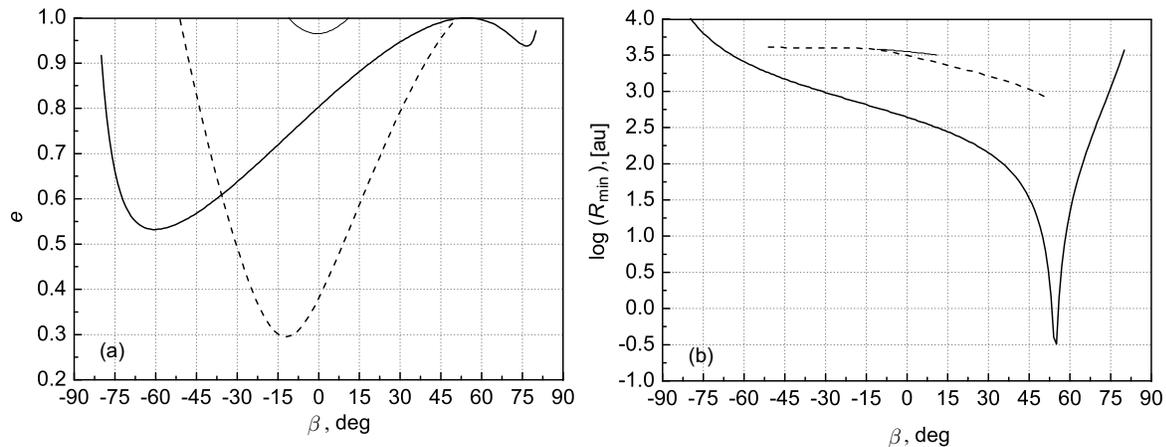


Рис. 4. Характеристика семейств орбит внешней пары АВ-F: (а) $e(\beta)$ и (b) $\lg R_{\min}(\beta)$. Жирная сплошная линия соответствует $\Delta V_r = -0.3 \text{ км с}^{-1}$, штриховая — $\Delta V_r = -0.7 \text{ км с}^{-1}$, тонкая сплошная — $\Delta V_r = -0.89 \text{ км с}^{-1}$.

Таблица 2. Орбиты пары АВ

Параметры	Ссылки			
	Эта работа	Эта работа	Кияева и др., 2001	Измайлов, 2019
M_{A+B}, M_{\odot}	1.2	1.3	1.40*	1.34*
$\beta_{2015.5}$, град.	-1 ± 1	$+6 \pm 2$	—	—
a , угл. сек.	6.96 ± 1.18	6.39 ± 0.89	6.21 ± 0.77	6.17 ± 0.65
a , а.е.	80.1 ± 13.6	73.5 ± 10.2	$71.5 \pm 8.9^*$	$71.0 \pm 7.5^*$
P , год	654.9 ± 173.5	553.5 ± 120.3	509.6 ± 97.0	516.3 ± 121.7
e	0.16 ± 0.11	0.19 ± 0.08	0.22 ± 0.04	0.18 ± 0.11
i , град.	54.6 ± 2.3	54.3 ± 2.3	54.9 ± 2.4	54.2 ± 3.4
ω , град.	217.8 ± 46.4	256.8 ± 31.4	267.2 ± 27.4	267.7 ± 36.6
Ω , град.	7.4 ± 2.8	12.5 ± 2.8	13.5 ± 2.3	11.7 ± 6.8
T	2063.75 ± 63.4	2112.0 ± 28.8	2115.8 ± 19.4	2119.2 ± 42.9
σ_{ρ} , мсд	21.8	11.3	11.1	12.7
σ_{τ} , мсд	15.2	18.4	8.4	40.4
$(O - C)_{G\rho}$, мсд	0.0	0.0	+4.6	-1.4
$(O - C)_{G\tau}$, мсд	0.0	0.0	-11.7	-44.6

* — для вычисления использовался параллакс Gaia DR2 86.90 ± 0.05 мсд.

Таблица 3. Сравнение орбит внешней пары АВ–F в зависимости от лучевой скорости

ΔV_r , км с ⁻¹	β , град.	a , угл. сек.	a , а.е.	P , год	e	ω , град.	i , град.	Ω , град.	T , год	R_{\min} , а.е.
-0.3	-29.6	230.2	2646.3	101466	.64	26.7	90.6	74.0	49463	953.431
	.0	194.6	2236.3	78822	.80	349.2	90.8	74.3	29114	440.157
	29.6	230.2	2646.3	101466	.94	321.9	91.3	75.0	27937	145.248
-0.7	-22.9	557.3	6406.3	382185	.38	180.8	90.3	74.2	374166	4003.154
	.0	439.3	5049.5	267448	.38	247.0	90.3	74.3	25550	3130.834
	22.9	557.3	6406.3	382185	.70	263.5	90.4	74.4	28025	1930.648
-0.89	-5.5	11715.8	134664.0	36833330	.97	201.7	90.3	74.3	7430	3706.202
	.0	8807.3	101233.4	24007640	.96	207.4	90.3	74.3	10910	3554.443
	5.5	11715.8	134664.0	36833330	.98	213.0	90.3	74.3	13990	3374.888

Сумма масс равна $1.84 M_{\odot}$, параллакс — 87 мсд.

5. ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМЫ ADS 48

Для имеющихся орбитальных решений мы проанализировали устойчивость исследуемой системы. Применяемый метод описан в наших предыдущих работах (Orlov and Zhuchkov 2005, Zhuchkov

and Orlov 2005) и основан на численном моделировании с помощью программы С. Арсета TRIPLE в рамках задачи трех тел.

Оценка вероятности распада проводилась методом Монте-Карло для 1001 варианта реализации

системы с учетом неопределенности параметров орбит обеих подсистем.

Для внутренней подсистемы АВ орбитальное решение было зафиксировано (использовалось наиболее вероятное решение с суммой масс компонентов $1.3 M_{\odot}$ при полной массе системы $1.84 M_{\odot}$, погрешность определения массы принималась равной $0.1 M_{\odot}$ для каждого из компонентов), элементы варьировались в пределах утроенной ошибки измерений (см. таблицу 2).

Для внешней подсистемы динамическая эволюция рассчитывалась для всех девяти орбит из таблицы 3. При этом время эволюции принималось равным 10^8 лет для наиболее короткопериодического решения при $\Delta V_r = -0.3 \text{ км с}^{-1}$ и 10^9 лет в будущее для остальных семейств орбит. Таким образом, во всех случаях время эволюции превышало 100 оборотов внешней пары P_{ex} (распад происходит, как правило, на временах $30 \dots 100 P_{\text{ex}}$), что позволяет выявить большую часть неустойчивых реализаций и, главное, сделать верный вывод об устойчивости системы в целом (подробнее см. в работе Zhuchkov and Orlov 2005, раздел 5).

Как и следовало ожидать (см. рис. 4), по результатам моделирования лишь вариант с $\Delta V_r = -0.3 \text{ км с}^{-1}$ показал тенденцию к неустойчивости. Вероятности распада составили 0.5% для параметра $\beta = -29^\circ 6$ с $e = 0.64 \pm 0.1$, 10% для $\beta = 0^\circ$ и 98% для $\beta = 29^\circ 6$ и $e = 0.94 \pm 0.1$.

Для двух других вариантов ΔV_r вероятность распада составила менее 0.5%.

Результат вполне ожидаемый, поскольку именно для $\beta = 0^\circ$ значение периода минимально, что вместе с высоким эксцентриситетом создает значительные возмущения в момент прохождения широкой парой периастра и приводит к разрушению тройной. Для $\beta = 29^\circ 6$ экстремально высокий эксцентриситет на уровне 0.96...0.98, конечно, приведет к неустойчивости, если с учетом ошибок его определения рассматривать динамику реализации с $e = 0.995$ и более (для расчетов методом Монте-Карло принималось значение погрешности эксцентриситета 0.05).

В любом случае, поскольку граничные значения β изначально соответствуют крайним возможным периодическим решениям, переходящим далее в параболическую траекторию, рассмотрение устойчивости для предельных случаев бессмысленно: орбита становится параболической в кеплеровом приближении. Поэтому тот факт, что мы получили для крайних β в случае $\Delta V_r = -0.89 \text{ км с}^{-1}$ устойчивое решение, говорит лишь о том, что система может сохранять стабильность вплоть до экстремально высоких значений эксцентриситета внешней орбиты.

Отметим, что параллаксы $p_{t,F} > p_{t,B} > p_{t,A}$ и, следовательно, можно считать $\beta \leq 0^\circ$, поэтому в данном случае мы, скорее всего, имеем дело хоть и с весьма широкой, но тем не менее вполне устойчивой иерархической системой, как следует из моделирования для наиболее вероятного значения $\Delta V_r = 0.7 \text{ км с}^{-1}$.

6. ОЦЕНКА МАССЫ ВОЗМОЖНОГО СПУТНИКА

Мы предполагаем, что разность в движении широкой пары (см. таблицу 1) определяется присутствием маломассивного спутника у одного из компонентов тройной звезды. Оценим минимальную массу возможного невидимого спутника m_2 при условии, что орбита спутника круговая в картинной плоскости. Тогда скорость видимого компонента на этой орбите:

$$v_1 = \sqrt{\frac{4\pi^2 m_2^2}{r(m_1 + m_2)}}.$$

Полагая $m_2 \ll m_1$, получим

$$m_2 = v_1 \times \sqrt{\frac{m_1}{4\pi^2 r}},$$

$$\vec{v}_1 = f \times (\vec{\mu}_G - \vec{\mu}_{\text{ph}}) / p_t,$$

где $\vec{\mu}_{\text{ph}} = (\mu_{\text{ph}} \sin \psi_{\text{ph}}, \mu_{\text{ph}} \cos \psi_{\text{ph}})$ — среднее орбитальное движение, полученное по длинному ряду фотографических наблюдений; $\vec{\mu}_G$ — мгновенное орбитальное движение, определенное по наблюдению Gaia; $p_t = 87$ мсд — параллакс; f — коэффициент перехода от относительной скорости орбитального движения к скорости относительно центра масс иерархической тройной системы, который можно считать неподвижным. Если имеется спутник у компонента F, то

$$f_F = M_{A+B} / M_{A+B+F}.$$

Если колеблется центр масс системы АВ, тогда

$$\begin{aligned} f_C &= M_F / M_{A+B+F}, \\ f_A &= f_C (M_{A+B} / M_A), \\ f_B &= f_C (M_{A+B} / M_B). \end{aligned}$$

Если использовать значения μ_{ph} согласно сглаженному ряду, то

$$m_{2,F} / \sqrt{r} = 0.0030 \pm 0.0006 M_{\odot},$$

$$m_{2,A} / \sqrt{r} = m_{2,B} / \sqrt{r} = 0.0027 \pm 0.0006 M_{\odot};$$

если использовать значения μ_{ph} согласно индивидуальным наблюдениям, то

$$m_{2,F} / \sqrt{r} = 0.0039 \pm 0.0017 M_{\odot},$$

$$m_{2,A}/\sqrt{r} = m_{2,B}/\sqrt{r} = 0.0035 \pm 0.0015 M_{\odot}.$$

Данный результат отличается от того, который получен в работе Kervella et al. (2019), где таким же образом сравниваются аномалии в собственных движениях по данным каталогов Hipparcos и Gaia DR2 и для спутника F получена масса

$$m_{2,F}/\sqrt{r} = 8 \times 10^{-5} M_{\odot}.$$

Наш результат представляется более вероятным, так как в качестве среднего движения используется более длинный ряд.

7. АНАЛИЗ ВОЗМУЩЕНИЙ В ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Проверим, можно ли возмущения, обнаруженные в многолетнем ряду, полученном на 26-дюймовом рефракторе, объяснить присутствием спутника у одного из компонентов.

Определяя орбиту фотоцентра по сглаженному ряду пулковских фотографических наблюдений внешней пары, мы использовали два подхода, реализованные в программе Кияевой и в программе Измайлова.

В первом случае сначала исключается движение внешней пары, невязки $d\rho$ и $d\theta$ переводятся из подвижной системы полярных координат в неподвижную, ориентированную по прямому восхождению и склонению (dx , dy). Отдельно определяется период возмущений, и с заданным периодом методом наименьших квадратов определяются постоянные Тиле–Иннеса и элементы орбиты. Период возмущений определялся по программе Горанского¹ (версия 2014 г.). Независимо были использованы методы Диминга и Лафлера–Кинмана для выявления периодической составляющей невязок по обеим координатам. Во всех случаях присутствовали гармоники с периодом 11.2 ± 0.5 или 22.4 ± 1.0 года, что дало основание в первом приближении принять период равным 11.2 года с ошибкой, не превышающей 0.5 года. Рассматривались периоды в пределах ошибки и в результате выбрано решение с периодом 11.0 года. На рис. 5 (в свертке относительно фазы периода) представлены эфемериды орбиты и невязки, по которым она получена.

Ошибки, обозначенные на рис. 5, определяются внешней сходимостью наблюдений, попадающих в скользящее окно $\Delta\varphi = 0.05P$. Для $\varphi = 0.35$, $\varphi = 0.50$ и $\varphi = 0.56$ в окно попадает только одно наблюдение. Результат представлен в таблице 4 под номером 1. Здесь a_{ph} — большая полуось орбиты фотоцентра; a_1 , a_2 , M_1 и M_2 — большие полуоси орбит и массы видимой звезды и темного

Таблица 4. Гипотетические орбиты фотоцентров

Параметры	Орбиты			
	1	2	3	4
a_{ph} , мсд	15.0	14.3	8.2	4.0
P , год	11.0	11.04	9.52	10.97
e	0.2	0.24	0.53	0.3
i , град.	97.0	96.3	179.98	44
ω , град.	235.0	258.6	79.8	56.2
Ω , град.	147.2	143.2	12.0	217.1
T , год	1980.0	1980.56	1988.15	1982.8
$V_{r\gamma}$, м с ⁻¹	—	—	-0.7	—
p_t , мсд	87.0	87.0	87.0	86.9
M_1 , M_{\odot}	0.5	0.5	0.5	0.65
a_1 , а.е.	0.17	0.16	0.094	0.046
M_2 , M_{\odot}	0.023	0.022	0.013	0.007
a_2 , а.е.	3.82	3.82	3.50	4.28
σ_x , мсд	2.2	2.0	3.6	5.1
σ_y , мсд	12.3	12.0	13.5	5.4
σ_{V_r} , мсд/год	—	—	0.078	—

спутника при заданном параллаксе p_t ; σ_x и σ_y — среднеквадратичные значения невязок по x и y . Параметры ω и Ω определены с точностью до 180° .

Во втором случае орбитальное движение внутренней и внешней пар рассматривается совместно в прямоугольных координатах и из множества случайно заданных периодов выбирается решение, наилучшим образом удовлетворяющее наблюдениям. Решается система уравнений:

$$x(t) = x_0 + \dot{x}(t - t_0) + BX_{\varphi} + GY_{\varphi}, \quad (1)$$

$$y(t) = y_0 + \dot{y}(t - t_0) + AX_{\varphi} + FY_{\varphi}, \quad (2)$$

где $x = \rho \sin \theta$, $y = \rho \cos \theta$; фаза $\varphi = (t - t_0)/P$; $X_{\varphi} = \cos(E_{\varphi}) - e$, $Y_{\varphi} = \sqrt{1 - e^2} \sin(E_{\varphi})$ — орбитальные координаты, соответствующие динамическим элементам орбиты P , T и e ; x_0 и y_0 — координаты центра масс в момент t_0 ; A , B , F и G — элементы Тиле–Иннеса, по которым получаем геометрические элементы орбиты (a , i , ω , Ω). В таблице 4 эта орбита представлена под номером 2.

В обоих случаях эксцентриситет e и момент прохождения через периастр T получают перебором и соответствуют орбите, которая наилучшим образом согласуется с наблюдениями. Оба подхода

¹<http://vgoranskij.net/software/>

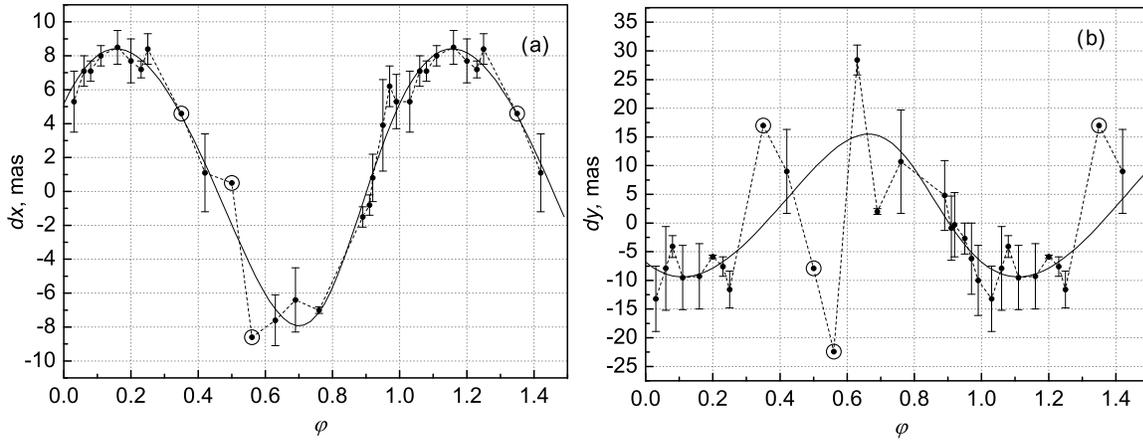


Рис. 5. Сравнение гипотетической орбиты фотоцентра 1 с наблюдениями относительно периода: (a) — невязки по прямому восхождению, (b) — по склонению. Невязки dx и dy сглажены по фазе в скользящем окне $\Delta\varphi = 0.05P$; $\varphi = 0$ соответствует моменту 1982.0. Если в окно попадает только одно наблюдение, оно выделено кружком.

показали один и тот же результат, несмотря на то, что во втором случае период заранее не определялся. Это служит косвенным доказательством того, что возмущение фотоцентра с периодом 11 лет (или кратным ему) не случайно.

Однако объяснение возмущения наличием спутника у какого-либо компонента, орбиту которого мы получили, противоречит наблюдениям лучевой скорости, в течение 20 лет проводившимся на телескопе Keck I со спектрографом HIRES (см. Butler et al. 2017, Tal-Or et al. 2019). Согласно данным работам, для компонента F максимальное отклонение лучевой скорости равно 62 мс^{-1} (см. рис. 6а), а по нашей орбите полуамплитуда лучевой скорости $K = 0.5 \text{ км с}^{-1}$.

С учетом имеющихся опубликованных Tal-Or et al. (2019) наблюдений лучевой скорости была определена гипотетическая орбита 3, ориентированная вблизи картинной плоскости. Эта орбита была получена по той же схеме, что и в работе Izmailov (2019), в результате улучшения орбиты 2 последовательными приближениями с помощью нелинейного метода наименьших квадратов по следующим формулам:

$$\sum \frac{\partial x_c}{\partial p_j} \Delta p_j = x_{oi} - x_{ci}, \quad (3)$$

$$\sum \frac{\partial y_c}{\partial p_j} \Delta p_j = y_{oi} - y_{ci}, \quad (4)$$

$$\sum \frac{\partial v_c}{\partial p_j} \Delta p_j = v_{oi} - v_{ci}, \quad (5)$$

где p_j — динамические орбитальные элементы (P , T , e), x_{oi} , y_{oi} , v_{oi} — ряды наблюдений, x_{ci} , y_{ci} , v_{ci} — эфемериды улучшаемой орбиты. Процесс

повторяется до тех пор, пока поправки Δp_j не станут малозначимыми. При выводе окончательного решения назначаются веса, соответствующие ошибкам.

Нам не удалось получить орбиту с периодом 11 лет. Если все же предположить, что спутник имеется у компонента F, то это будет коричневый карлик с массой $0.015 M_{\odot}$, расположенный на расстоянии 3.6 а.е., обращающийся с периодом 9.52 года.

Несмотря на малую амплитуду, в наблюдениях лучевой скорости, представленных в работе Tal-Or et al. (2019), нами на грани шума обнаружена ее возможная модуляция с периодом около $P_2 = 1006$ дней = 2.754277 года и амплитудой 6 мс^{-1} . Период выявляется как методом Лафлера–Кинмана, так и методом Диминга. Но однозначно говорить о наличии такого периода нельзя, так как ошибка измерений скорости близка к указанной величине. Исходный ряд наблюдений лучевой скорости и те же наблюдения (без последнего) в зависимости от фазы относительно данного периода представлены на рис. 6а и 6б соответственно.

И хотя сама по себе модуляция в наблюдениях скорости статистически незначима, все же интересен тот факт, что период 11 лет ровно в четыре раза больше периода, скрытого в наблюдениях скорости. Следовательно, возможна общая причина вариаций и позиционных параметров, и скорости, подтвержденная независимыми исследованиями.

Чтобы проверить, не является ли причиной возмущения колебание барицентра системы АВ, мы аналогично рассмотрели ряд фотографических наблюдений пары АВ 1968–1995 гг. Этот ряд представлен на рис. 7. В сглаженном ряду проявился

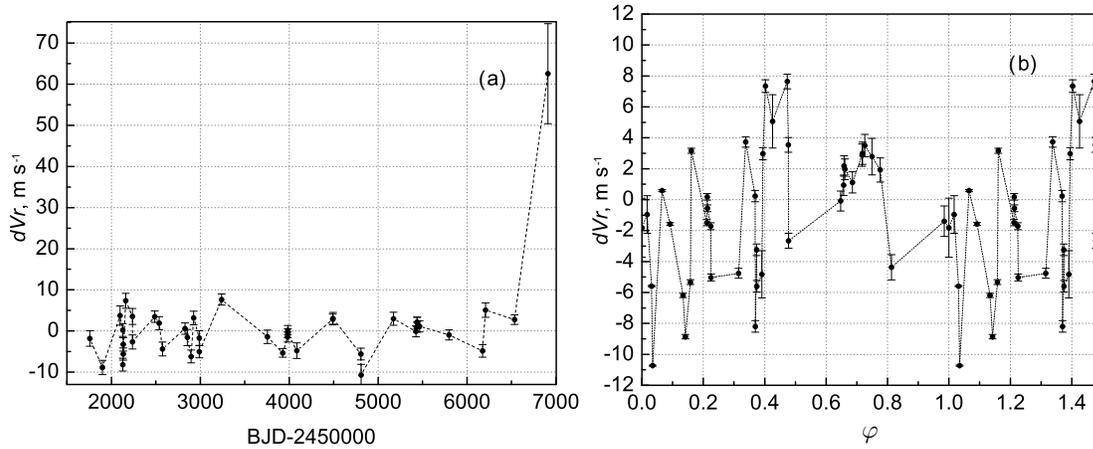


Рис. 6. Изменения лучевой скорости звезды F в зависимости от времени (a) и от фазы периода $P = 1006$ дней (b). Использованы результаты опубликованных наблюдений (Tal-Or et al. 2019).

скрытый период $10.97 \approx 11.0$ лет, причем более уверенно в ρ . Также была вычислена гипотетическая орбита фотоцентра, соответствующая звезде A или B. Эта орбита 4 также помещена в таблицу 4, ее сравнение с наблюдениями проиллюстрировано на рис. 8. Колебание в лучевой скорости компонентов A или B после учета орбитального движения в паре AB должно достигать 91 м с^{-1} , что не наблюдается. Угловые параметры ориентации орбит, представленных в таблице 4, сильно различаются, но период у орбиты 4 такой же, как у орбит 1 и 2.

Мы учли линейный тренд в наблюдениях лучевых скоростей звезд A и B, опубликованных в работе Tal-Or et al. (2019), и получили ускорение по лучу зрения в орбитальном движении пары AB для каждой звезды на момент 2007.0: $+2.27 \pm 0.29 \text{ м с}^{-1} \text{ год}^{-1}$ для A и $-2.23 \pm 0.35 \text{ м с}^{-1} \text{ год}^{-1}$ для B. Это еще раз подтверждает тот факт, что массы звезд одинаковые. Периодические возмущения в остаточных скоростях не обнаружены.

Сравнение всех полученных результатов ведет к выводу, что разность в относительном движении, которая позволяет заподозрить существование спутника планетной массы, не может быть объяснена возмущением с периодом 11 лет. Остается единственная причина данного возмущения — условия наземных наблюдений.

8. О ПРИЧИНЕ ВОЗМУЩЕНИЙ В ФОТОГРАФИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

Характерно то, что период, обнаруженный в движениях внутренней и внешней пар, одинаков. Это можно объяснить влиянием аномальной рефракции, которое тем сильнее, чем больше расстояние между компонентами. Такой вывод напрашивается, если учесть, что обработка фотографи-

ческих наблюдений проводилась методом «след-масштаб» (см. Kiselev et al. 2014) без использования опорных каталогов. Ориентировка учитывалась по суточному следу. Для учета дифференциальной рефракции и перехода от измеренных координат к ρ и θ для всех пластинок использовалось одно значение среднего масштаба 26-дюймового рефрактора $19.8078 \text{ угл.сек./мм}$. В середине XX века это было оправдано, так как исключались ошибки недостаточно точных опорных каталогов. Однако при использовании опорных звезд с координатами из каталога масштаб и ориентировка учитываются при обработке каждого наблюдения методом шести постоянных. Периодические изменения в атмосфере (возможно, связанные с солнечной активностью) могут влиять на масштаб, вызывая колебания около среднего значения.

Для тесных звезд эффект практически незаметен, а проявился только для пары с расстоянием между компонентами $327''$ (самая широкая пара в программе наблюдений 26-дюймового рефрактора). В ПЗС-наблюдениях пары AB такой период не наблюдается, так как обработка выполняется с опорным каталогом UCAC4.

Следует отметить, что именно благодаря однородным пулковским наблюдениям и измерениям пластинок на автоматическом комплексе «Фантазия» удалось обнаружить эффект, который обычно скрывается в случайных ошибках. Возможно, он будет интересен климатологам.

Предлагаемая гипотеза нуждается в проверке, но это выходит за рамки данной работы.

9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе демонстрируется возможность определения орбиты методом ПВД, опираясь

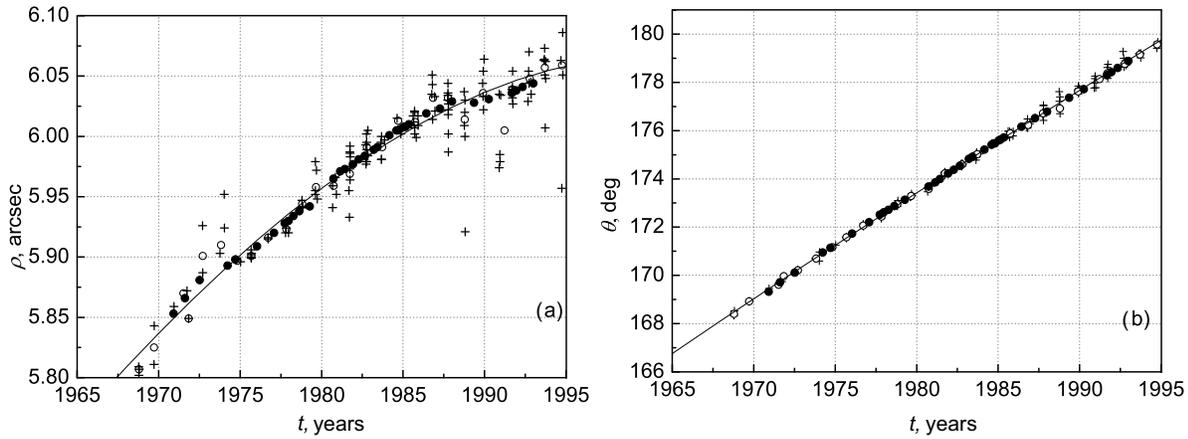


Рис. 7. Ряд фотографических наблюдений внутренней пары на 26-дюймовом рефракторе. Обозначения: крестики — индивидуальные наблюдения, открытые кружки — среднегодовые положения, черные кружки — сглаженные в скользящем окне 5 лет, линия — эфемерида орбиты внутренней пары.

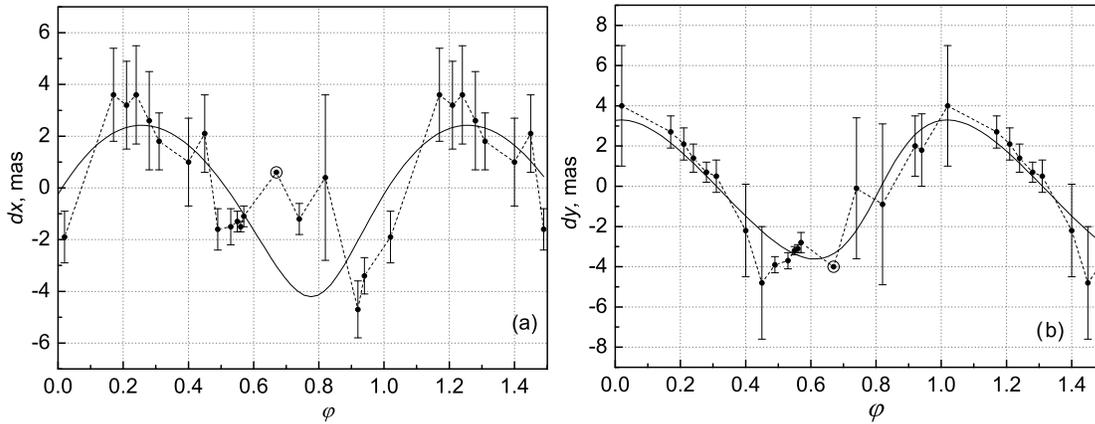


Рис. 8. Сравнение гипотетической орбиты фотоцентра 4 с наблюдениями относительно периода: (a) — невязки по прямому восхождению, (b) — по склонению. Невязки dx и dy сглажены по фазе в скользящем окне $\Delta\varphi = 0.05P$; $\varphi = 0$ соответствует моменту 1982.0. Фазе $\varphi = 0.67$ соответствует только одно наблюдение, оно выделено кружком.

на одно высокоточное наблюдение из каталога Gaia DR2. Таким образом, метод ПВД можно использовать более эффективно, получая квазимгновенные точные параметры, а не из короткой дуги, охватывающей десятки лет наблюдений.

Замечателен тот факт, что три орбиты внутренней пары, полученные по однородным фотографическим наблюдениям 1961–1995 гг. (ПВД на эпоху 1980.0 (Киуева et al. 2001)), по наблюдению Gaia (ПВД на эпоху 2015.5) и совершенно другим модифицированным методом Тиле–Иннеса (Izmailov 2019) хорошо согласуются между собой.

Элементы орбиты внешней пары существенно зависят от принятого значения относительной лучевой скорости, которое в настоящее время определено неуверенно. Минимальный орбитальный период — 79 000 лет. Анализируя устойчивость тройной системы ADS 48ABF, мы можем констатировать, что система устойчива вблизи

наиболее вероятного значения разности лучевых скоростей подсистем.

В результате данного исследования по однородным пулковским наблюдениям на 26-дюймовом рефракторе обнаружены возмущения с одним и тем же периодом 11 лет в наблюдениях как внутренней, так и внешней пары. В работе показано, насколько легко дать ошибочное объяснение такому эффекту, предполагая наличие невидимого спутника. Мы считаем, что это возмущение обусловлено периодическим изменением масштаба телескопа, связанным с переменными климатическими условиями наблюдений. Кратность 11-летнего периода периоду, проявившемуся в наблюдениях лучевых скоростей компонента F, указывает на то, что причина, вероятно, глобальная для всей Земли. Однако такой вывод невозможно сделать уверенно на основе исследования только одной системы, это

требует проверки на других объектах и выходит за рамки данной работы.

Показано, что обнаруженную разность в мгновенном (Gaia DR2) и среднем (26-дюймовый рефрактор) относительном движении можно объяснить присутствием малого спутника планетной массы у одного из компонентов тройной системы.

Подчеркнем, что данное исследование еще раз доказывает ценность однородных многолетних наблюдений, выполненных на одном телескопе.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны создателям каталогов WDS и Gaia, результаты которых используются в данной работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 20-02-00563А). Работа частично выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. G. A. Brown et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **616**, A1 (2018).
2. R. P. Butler, S. S. Vogt, G. Laughlin, et al., *Astron. J.* **153** (5), 208 (2017).
3. G. A. Gontcharov, A. A. Andronova, and O. A. Titov, *Astron. and Astrophys.* **355**, 1164 (2000).
4. G. A. Gontcharov and O. V. Kiyayeva, *Astron. and Astrophys.* **391**, 647 (2002).
5. G. A. Gontcharov and O. V. Kiyayeva, *New Astronomy* **15** (3), 324 (2010).
6. U. Güntzel-Lingner, *Astronomische Nachrichten* **282** (4), 183 (1955).
7. W. I. Hartkopf and B. D. Mason, *Astron. J.* **150** (4), 136 (2015).
8. W. I. Hartkopf and B. D. Mason, USNO, Washington, version 2016 (2016).
9. J. Hopmann, *Annalen der K.K. Sternwarte Wien* **26**, 1 (1964).
10. I. S. Izmailov, *Astronomy Letters* **45** (1), 30 (2019).
11. I. S. Izmailov, M. L. Khovricheva, M. Y. Khovrichev, et al., *Astronomy Letters* **36** (5), 349 (2010).
12. I. S. Izmailov and E. A. Roshchina, *Astrophysical Bulletin* **71** (2), 225 (2016).
13. P. Kervella, F. Arenou, F. Mignard, and F. Thévenin, *Astron. and Astrophys.* **623**, A72 (2019).
14. M. Y. Khovrichev, A. M. Kulikova, E. N. Sokov, et al., *Astronomy Letters* **42** (10), 686 (2016).
15. A. A. Kiselev and O. V. Kiyayeva, *Astron. Zh.* **57**, 1227 (1980).
16. A. A. Kiselev, O. V. Kiyayeva, I. S. Izmailov, et al., *Astronomy Reports* **58** (2), 78 (2014).
17. O. V. Kiyayeva, A. A. Kiselev, E. V. Polyakov, and V. B. Rafal'skii, *Astronomy Letters* **27**, 391 (2001).
18. B. D. Mason, W. I. Hartkopf, and H. M. Hurowitz, *Astron. J.* **146** (3), 56 (2013).
19. B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, et al., *VizieR Online Data Catalog B/wds* (2016).
20. V. Neves, X. Bonfils, N. C. Santos, et al., *Astron. and Astrophys.* **551**, A36 (2013).
21. V. V. Orlov and R. Y. Zhuchkov, *Astronomy Reports* **49** (3), 201 (2005).
22. G. M. Popović and R. Pavlović, *Bulletin Astronomique de Belgrade* **153**, 57 (1996).
23. L. Tal-Or, T. Trifonov, S. Zucker, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **484** (1), L8 (2019).
24. A. A. Tokovinin, *Catalogue of stellar radial velocities. Catalogue of proper motions* (Moscow State Univ., Moscow, 1990).
25. R. Y. Zhuchkov and V. V. Orlov, *Astronomy Reports* **49** (4), 274 (2005).

Relative Motion in the Hierarchical Triple System ADS 48 on the Basis of Gaia DR2 and 26-Inch Refractor of Pulkovo Observatory Data**O. V. Kiyayeva¹, R. Ya. Zhuchkov², and I. S. Izmailov¹**¹Central (Pulkovo) Astronomical Observatory RAS, St. Petersburg, 196140 Russia²Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

According to the exact positions and proper motions of the three components of the star ADS 48 from Gaia DR2, their parallax and radial velocities for the epoch 2015.5 the instantaneous relative positions and motions of the components were determined. Only from the Gaia DR2 observations, the family of orbits of the AB pair was calculated by the method of apparent motion parameters, from which those that best agree with the Pulkovo data were selected. Comparison with the first observations of the 19th century made it possible to independently estimate the sum of the masses of the components in the range $1.15 < M_{A+B} < 1.4 M_{\odot}$. The orbits of the outer pair were calculated: with a minimum period of 79×10^3 years and the most probable one—about 3×10^5 years. It is concluded that the system is stable for the most probable value of the relative radial velocity $\Delta V_r = 0.7 \text{ km s}^{-1}$ and may be unstable near the boundaries of the possible velocity difference. A detailed analysis of homogeneous Pulkovo observations revealed a disturbance with a period of 11 years. It is shown that this disturbance is associated not with a star, but with a periodic climatic process that changes the observation conditions. Comparison of instantaneous and average relative motion does not exclude the presence of a planetary mass satellite in one of the components.

Keywords: *binaries: general—stars: individual: ADS 48*