

УДК 521.328

УЛУЧШЕНИЕ ОРБИТ ЧЕТЫРЕХ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ GAIA DR2 И НАБЛЮДЕНИЙ 26-ДЮЙМОВОГО РЕФРАКТОРА ПУЛКОВСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

© 2021 г. Л. Г. Романенко¹*, И. С. Измайлов¹

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

*E-mail: lrom1962@list.ru

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 28.09.2020 г.

Принята к публикации 30.10.2020 г.

В данной работе используется модифицированный метод параметров видимого движения (ПВД), в котором исходными данными из каталога Gaia DR2 являются не только высокоточные координаты, параллаксы и лучевые скорости компонентов исследуемых широких двойных звезд, но и их собственные движения. Совпадение ПВД-орбит, полученных как по данным Gaia DR2, так и по данным пулковских рядов 1960–2019 гг., ведет к орбите, однозначной в смысле восходящего узла. Представлены результаты улучшения орбит таких визуально-двойных звезд Пулковской программы исследований, как ADS 246, 2757, 10386 и 12169. Получены орбиты (с периодами 1226, 1075, 4500 и 4900 лет), параметры ориентации орбит в галактической системе координат и массы этих систем (0.59 ± 0.05 , 1.7 ± 0.3 , 1.7 ± 0.4 и $2.25 \pm 0.5 M_{\odot}$). Показано, что плотные однородные ряды наземных наблюдений, таких как ПЗС-наблюдения на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории, не теряют актуальности, служат базой для выявления наилучшего решения как по данным Gaia, так и по собственным наблюдениям, и должны быть продолжены. Показано также, что метод Тиле-Иннеса не подходит для определения орбит двойных звезд с разделением более 100 а.е. Статья основана на докладе, сделанном на конференции “Астрометрия вчера, сегодня, завтра” (ГАИШ МГУ, 14–16 октября 2019 г.).

DOI: 10.31857/S0004629921030026

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время хорошо изучены тесные звездные системы с коротким периодом обращения, в то время как широкие двойные — ценный объект для исследования с точки зрения проблемы возникновения и эволюции широких пар не только для получения масс звезд, но и для понимания эволюции звездной материи и галактической динамики. Кроме того, получение (уточнение) орбит визуально-двойных звезд в окрестности Солнца способствует решению актуальной проблемы современной астрономии — изучению этих звезд как родительских для обнаружения возможных экзопланет. Так, в статье Шахт и др. [1] выполнены расчеты границ обитаемых зон вокруг избранных звезд Пулковской программы исследований и получены оценки астрометрического сигнала, зависящего от гравитационного влияния гипотетических планет.

Традиционно изучают орбитальное движение в двойных звездах для определения их масс и динамических параллаксов. Но это действительно только для тех звезд, у которых наблюдения по-

крывают большую часть орбиты. Для широких пар с периодами в сотни и тысячи лет мы имеем только короткую дугу всего эллипса. Таким образом, мы получаем обратную задачу: зная спектральные классы компонентов, мы можем оценить их массы согласно зависимости “масса–светимость” и вычислить элементы кеплеровой орбиты. С другой стороны, достаточно часто разные авторы дают разные оценки спектральной классификации компонентов исследуемых нами звезд. Кроме того, разные методы дают разные оценки их масс с отличием в 0.5 массы Солнца и более.

Известно, что долгопериодические двойные звезды с расстоянием между компонентами более 100 а.е. являются наименее изученными объектами, в 6-м каталоге орбит визуально-двойных звезд [2] они составляют всего 7%. В работе Киселева и Романенко [3] высказано подозрение, что их орбиты круто наклонены к плоскости Галактики. Возможно, это связано с еще неизученными особенностями ее строения. Чтобы изучить этот вопрос, необходимо иметь достаточный статистический материал.

Проблема преимущественного направления в распределении орбитальных полюсов визуально-двойных систем в окрестности Солнца является в настоящее время актуальной задачей. Так, в статье Агати и др. [4] проанализированы данные 6-го каталога орбит [2]. Для 20 систем до 8 пк полюса концентрируются к точке с галактическими координатами $(L, B) \sim (46^\circ, +37^\circ)$. Для полной выборки из 51 системы до 18 пк концентрация полюсов исчезает. В работе Агати и др. [4] сделан вывод, что действительность отклонения от изотропии не может быть оценена на данном этапе с уверенностью, так как доступно слишком мало систем с надежно определенными орбитальными элементами и положением восходящего узла орбиты. Таким образом стоит пополнять банк этих данных и изучать результаты.

Исследование динамики широких пар звезд с периодом обращения порядка тысячи лет кардинальным образом отличается от исследования динамики тесных пар.

1. Первые эпохи позиционных наблюдений широких пар имеют значительно худшие погрешности, чем современные наблюдения. Причем процент грубых промахов весьма высок, поэтому введение весов (например, по методу наблюдений — визуальные, фотографические, спекл-интерферометрические, ПЗС или космические) не исправляют ситуацию. С другой стороны, первые эпохи — начало наблюдаемой дуги — имеют решающее значение при определении таких орбит.

2. Самые распространенные в настоящее время методы определения орбит (напр., Харткопф и др. [5], Хэйл [6], Мэйсон и др. [7], Байдин и др. [8], Измайлов [9]) основаны на методе Тиле-Иннеса, предполагающем, что наблюдения приходятся на разные фазы по всей орбите и охватывают весь видимый эллипс, а потому известен период P , эксцентриситет e и момент прохождения через периастр $T_{\text{П}}$. Однако за всю общемировую историю позиционных наблюдений двойных звезд (180–200 лет) широкие пары прошли в своем относительном орбитальном движении фазу в 3–5% своего эллипса, и указанные величины заранее не определены. А значит, использование этого метода не оправдано. То же касается нового алгоритма Блант и др. [10], связанного, в основном, с подгонкой орбит экзопланет.

3. Все перечисленные методы получения орбит двойных звезд приводят к двумерному решению в смысле определенности восходящего узла. Только дополнительные исследования с привлечением лучевых скоростей компонентов (а это не всегда выполняемая задача как для тесных, так и для широких пар) ведут к однозначности.

4. Использование методов, разработанных для вычислений орбит тесных пар, нередко приводит к получению долгопериодических орбит, соот-

ветствующих сумме масс компонентов в несколько десятков масс Солнца, значительно превышающей величину, определенную зависимостью “масса—светимость”. Примером могут послужить работы Мэйсона и др. ([7], ADS 7724, $17 M_{\odot}$) и Измайлова ([9], см. ниже). Однако авторы никак не комментируют данное обстоятельство. В работе Байдина и др. [8] используются фотометрические данные, и эта проблема решается введением соответствующего коэффициента.

На рис. 2а показаны наблюдения компонента В относительно главной звезды А пары ADS 246 согласно Вашингтонскому каталогу двойных звезд (WDS [11]). За 150 лет наблюдения покрыли дугу в 12° . Эту дугу можно описать вероятными орбитами с периодами от 800 до 8000 лет [9], если использовать только позиционные наблюдения, т.е. классический подход к определению орбиты. Если принять значение параллакса Gaia DR2 [12], то соответствующие суммы масс будут варьироваться от 0.51 до $12.0 M_{\odot}$. Для ADS 2757 и ADS 12169, исследуемых в настоящей работе, этот разброс согласно орбитам Измайлова [9] составляет от 3.5 до 2600 и от 2.5 до 3700 M_{\odot} соответственно. Для уменьшения этой неопределенности необходим другой подход. Следует отметить, что, имея в виду погрешности визуальных наблюдений XIX–начала XX в., классические методы дают надежные результаты определения орбит на дугах не менее 25° (см. исследование Байдина [13]) и в данном случае не работают.

Таким образом, в настоящее время назревает необходимость разработки стандартного формального метода определения орбит широких пар, учитывающего все эти моменты.

2. МЕТОД ПВД И ЕГО МОДИФИКАЦИЯ

Параметрами видимого движения мы называем следующие величины, определенные на средний момент T_0 : ρ и θ — полярные координаты спутника В относительно главной звезды А, μ и ψ — величина и позиционный угол видимого относительного движения.

В методе параметров видимого движения (ПВД), разработанном Киселевым и Кияевой [14–18], мы берем за основу (базис) не все разрозненные позиционные наблюдения разных авторов, а плотный однородный ряд. Это необходимо, чтобы получить не только относительное положение компонентов, но и скорость в картинной плоскости. Кроме того, мы используем относительную скорость по лучу зрения, полученную по данным из литературы (спектральных наблюдений). Для правильного вычисления пространственной скорости точность определения лучевой составляющей должна быть порядка 0.1 км/с. Определив пространственные вектора положе-

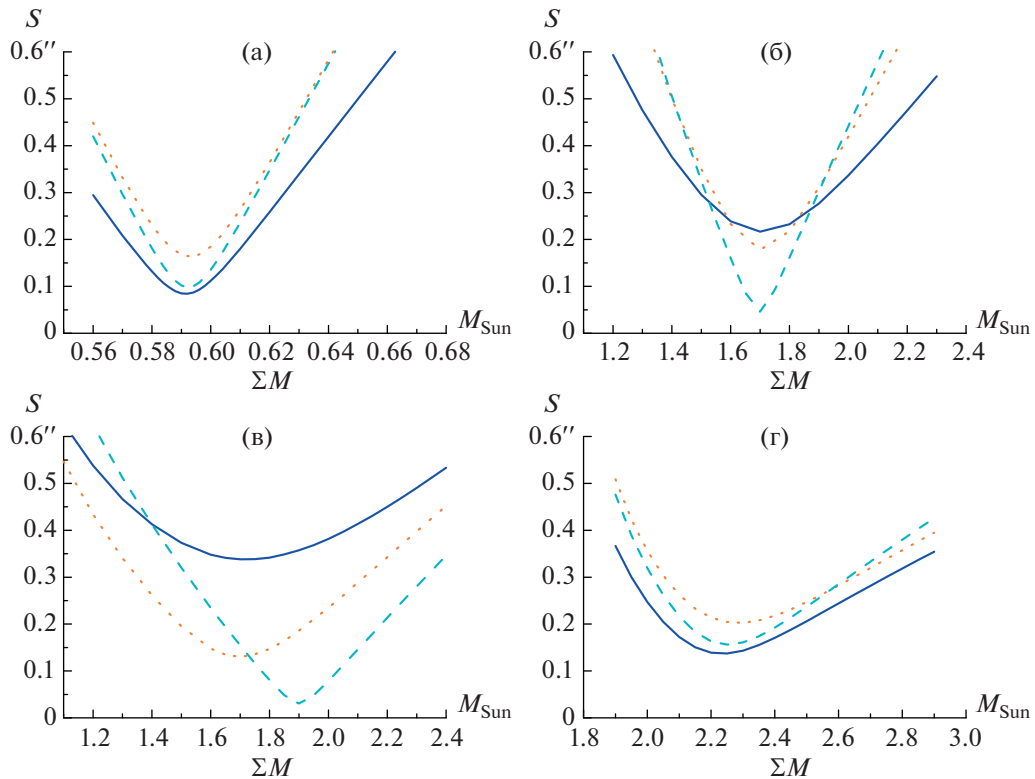


Рис. 1. Поиск решения для ADS 246 (а), ADS 2757 (б), ADS 10386 (в) и ADS 12169 (г). Приведены зависимости $S = f(M_{AB})$ для разных базисов. Сплошная (синяя) и штриховая (голубая) линии – результаты, полученные по объединенному ряду (фото + ПЗС) и только по пулковским ПЗС-наблюдениям соответственно, пунктирная линия (оранжевая) – результат, полученный по данным Gaia DR2 [12].

ния \vec{R} и скорости \vec{V} на некоторый средний момент времени (идея Лапласа), мы получаем семейство орбит, зависящих от пространственного расстояния между компонентами r :

$$r_{\min} = \frac{\rho}{\pi_t} \leq r < r_{\max} = \frac{8\pi^2}{V^2} M_{AB}. \quad (1)$$

Здесь слева – минимальная величина расстояния r (величина проекции вектора \vec{R} на картинную плоскость), справа – максимальная величина r , допускающая эллиптическое движение согласно интегралу энергии в задаче двух тел, π_t – тригонометрический параллакс, M_{AB} – суммарная масса компонентов (в единицах M_\odot), V – пространственная скорость спутника В относительно главной звезды А (в а. е./год), которая определяется из позиционных и спектральных наблюдений:

$$V^2 = \left(\frac{\mu}{\pi_t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_r}{4.74}\right)^2, \quad (2)$$

где $\Delta V_r = V_{rB} - V_{rA}$ – относительная лучевая скорость компонентов в км/с.

Обозначим через β – угол наклона вектора \vec{R} к картинной плоскости на средний момент T_0 . Его величину можно определить из соотношения:

$$r \cos \beta = \frac{\rho}{\pi_t}, \quad (3)$$

где r должно удовлетворять условию (1) при заданных ρ , π_t , V и M_{AB} . Величина угла β лежит в пределах от минимального $\beta_{\min} = 0$ до максимального $\pm\beta_{\max}$.

Следует отметить, что из соотношения (3) мы получаем два значения $\pm\beta$, соответствующие расположению В относительно А на момент T_0 за картинной плоскостью ($\beta > 0$) или перед ней ($\beta < 0$). В результате мы получаем две равновероятные орбиты, тождественные в динамическом смысле и различные в геометрическом.

В случае наличия наблюдений, достаточно удаленных от основного (базисного) ряда, можно определить единственное решение из семейства орбит, подобрав угол β , наилучшим образом удовлетворяющий всем наблюдениям, следующим образом (см. [17, 18]).

Сначала мы исследуем общемировой ряд разрозненных наблюдений с учетом моментов, описанных во Введении, тщательно анализируем его. Что касается первых эпох, то наша практика динамических исследований более 50 визуально-двойных звезд (см. обзор Романенко и Калиниченко [19]) показала, что наблюдения В. Струве 1830–1835 гг. наиболее надежны среди наблюдений начала XIX века. В то же время более ранние наблюдения этого ученого, полученные с другим инструментом, могут содержать грубые ошибки, особенно по позиционному углу. Для выявления грубых промахов мы сравниваем все общемировые наблюдения с предварительной орбитой отдельно по угловому расстоянию ρ и отдельно по позиционному углу θ . Такая орбита необходима, так как наблюденная дуга эллипса более 3° нелинейна, а движение по ней неравномерно. Далее используем известный критерий 3σ для отсева таких промахов.

Оставшиеся позиционные наблюдения мы делим на временные отрезки в 40 лет и для средних моментов получаем полярные координаты (ρ , θ) на этих участках для получения наиболее четких положений с разными фазами. Так мы составляем контрольный ряд сравнения.

Далее для выбора наилучшего решения из семейства орбит мы используем не непосредственное сравнение эфемерид с наблюдениями, а согласие между собой элементов Тиле-Иннеса (A , B , F , G), которые можно вычислить по геометрическим элементам орбиты (a , i , ω , Ω) без привлечения наблюдений, и по динамическим элементам (P , T , e) с привлечением контрольного ряда сравнения. Более подробно см. работу Кияевой [20]. Критерием является минимум функции S :

$$S = \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta F^2 + \Delta G^2}. \quad (4)$$

Здесь ΔA , ΔB , ΔF , ΔG – разности элементов Тиле-Иннеса, полученных двумя путями. Элементы Тиле-Иннеса – это направляющие косинусы осей измеренных и орбитальных координат, умноженные на большую полуось орбиты a , поэтому, если орбита хорошо согласована, то $S < Err_a$.

В отличие от непосредственного сравнения наблюдений и эфемерид функция S более чувствительна, в данном случае нет необходимости назначать веса конкретным разнородным наблюдениям, которые обязательно вносят некоторую субъективность, но важно иметь несколько надежных точек, разнесенных по всей дуге вблизи середины полосы наблюдений. Другими словами, мы сравниваем две дуги: эфемериду, полученную по базисной дуге с заданным углом β и массой M_{AB} , и выровненную общемировую наблюденную дугу. Такой алгоритм сравнения позволяет исследовать как все семейство орбит в за-

висимости от β для фиксированной массы, так и задавать сумму масс компонентов в интересующих нас пределах с некоторым шагом, выявить зависимость функции S от массы (ее минимум) и сравнить с массой, соответствующей зависимости “масса–светимость”.

В методе ПВД ошибки элементов полученных орбит (a , P , e , ω , i , Ω и $T_{\text{П}}$) вычисляются с помощью вариации каждого из исходных параметров (ρ , θ , μ , ψ , π , ΔV_r и β) в пределах его ошибки [14]. И, если ранее наибольшее влияние на элементы орбиты оказывали ошибки относительной лучевой скорости и параллакса, то использование результатов Gaia DR2 [12] привело к существенно уменьшению влияния ошибки последнего.

Из высокоточных наблюдений Gaia DR2 [12] положений и собственных движений для каждого компонента можно получить параметры видимого движения и семейство орбит, затем наилучшую орбиту [17]. Однако для каждой заданной суммы масс компонентов будет свое семейство и своя наилучшая орбита. В настоящей работе мы предлагаем анализировать не только семейство орбит, полученное по базису Gaia DR2, но и по базису плотных однородных наземных рядов – пулковских наблюдений. Совпадение орбит, определенных по разным базисам, приводит, по нашему убеждению, к окончательной орбите, к повышению ее надежности. Масса системы, соответствующая этой орбите, также является окончательно определенной. Пределы совпадения орбит дают оценки погрешности этой величины.

3. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Компоненты исследуемых здесь звезд (ADS 246, 2757, 10386 и 12169) – это красные и желтые карлики от 6 до 11^m с расстояниями между ними от 7 до $35''$. Эти пары входят в Пулковскую программу исследований [21], ПЗС-наблюдения которых продолжаются на 26-дюймовом рефракторе [22, 23]. В настоящей работе использованы ПЗС-наблюдения 2003–2019 гг., которые можно загрузить из Страсбургского центра данных или в системе астрометрических баз данных Пулковской обсерватории¹. Здесь мы приводим фрагменты этих таблиц: в табл. 1 даны индивидуальные наблюдения (для вычислений), в табл. 2 – среднегодовые (для демонстрации результатов и рисунков). С появлением новых данных [12] и новых алгоритмов [17] появилась возможность получить ПВД-орбиты этих двойных по данным Gaia и сравнить их с ПВД-орбитами, полученными по пулковским рядам.

В табл. 3 даны звездные величины и спектральные классы компонентов исследуемых звезд

¹ <http://izmcdd.puldb.ru/vds.htm>

Таблица 1. Результаты индивидуальных ПЗС-наблюдений 4 визуально-двойных звезд на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории (фрагмент)

ADS	Дата, эпоха	$N1$	$\rho, ''$ $\sigma_\rho, ''$	$\theta, ^\circ$ $\sigma_\theta, ^\circ$	$\sigma_{\rho 1}, ''$	$\sigma_{\tau 1}, ''$	Δt
246	2003 12 08	17	35.0288	64.3694	0.0202	0.0336	5.48
	2003.935		± 0.0051	± 0.0137			
	2003 12 30	17	35.0328	64.3837	0.0104	0.0283	
	2003.995		± 0.0026	± 0.0116			
	2004 01 02	17	35.0298	64.3977	0.0319	0.0316	
	2004.003		± 0.0080	± 0.0129			
	2004 11 14	17	34.9811	64.5696	0.0247	0.0287	
	2004.872		± 0.0062	± 0.0117			
	2004 12 12	17	34.9771	64.5558	0.0288	0.0268	
2004.948	± 0.0072		± 0.0110				

Примечание. В столбцах таблицы приведены: ADS – номер исследуемой звезды по каталогу Эйткина; Дата (в формате “год–месяц–день”) и соответствующая ей эпоха (J2000) в годах; $N1$ – число ПЗС изображений; ρ – расстояние между компонентами в секундах дуги; θ – позиционный угол в градусах; σ_ρ – ошибка расстояния, σ_θ – ошибка позиционного угла; $\sigma_{\rho 1}$ и $\sigma_{\tau 1}$ – ошибки измерения по одному изображению в радиальном и тангенциальном направлениях, где $\sigma_{\tau 1} = (\pi/180^\circ)\rho\sigma_{\theta 1}$; Δt – время экспозиции в секундах.

Таблица 2. Результаты среднегодовых ПЗС-наблюдений 4 визуально-двойных звезд на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории (фрагмент)

ADS	Эпоха	$N2$	$\rho, ''$ $\sigma_\rho, ''$	$\theta, ^\circ$ $\sigma_\theta, ^\circ$	$\sigma_{\rho 1}, ''$	$\sigma_{\tau 1}, ''$
246	2003.978	3	35.0318	64.3841	0.0017	0.0067
			± 0.0012	± 0.0077		
	2004.910	2	34.9794	64.5622	0.0075	0.0108
	2005.660		34.9094	64.5922		
		5	± 0.0038	± 0.0088		
	2006.788		7	34.8725	64.7094	0.0162
	6	± 0.0066	± 0.0068			
2007.731		34.7896	64.7355	0.0139	0.0100	
			± 0.0062	± 0.0074		

Примечание. Обозначения те же, что в табл. 1, $N2$ – число нормальных мест.

согласно WDS [11], характеристики имеющихся коротких дуг наблюдений этих звезд: их продолжительность и изменение позиционного угла для общемировых наблюдений [11], фотографических [21] и ПЗС-наблюдений (табл. 1) на 26" рефракторе ГАО РАН, а также ошибки единицы веса для пулковских рядов. В таблице приведены также данные о рядах Военно-Морской обсерватории США в Вашингтоне: фотографическом USNO и спекл-интерферометрическом WSI согласно [11], если они имеются. Отметим, что дли-

на дуги общемировых наблюдений составляет от 3° до 20° .

В обзоре [19] приведено сравнение аналогичных рядов для 28 звезд Пулковской программы исследований, показано, что точность ПЗС-наблюдений в 5 раз выше точности фотографических. Поэтому в дальнейшем мы начали использовать их в качестве основной дуги (базиса) для некоторых звезд Пулковской программы (см., напр., исследования ADS 12889 = 17 Лебедя FG [24], дуга $\sim 5^\circ$). В методе ПВД важна не только

Таблица 3. Характеристика позиционных рядов 4 исследуемых звезд

ADS/WDS	m_v	Sp	ρ , "	Серия	T_1 , год	T_2 , год	n	$\Delta\theta$, °	$\sigma_{\rho 1}$, "	$\sigma_{\tau 1}$, "
246	8.13	M2V		WDS	1860	2015	123	12.3		
00184+4401	11.04	M3Ve	35.0	<i>USNO</i>	<i>1964</i>	<i>1976</i>	46	1.1	0.0110	0.0232
				Photo	1994	2006	7	0.1	0.0633	0.3192
				CCD	2003	2019	145	1.4	0.0100	0.0085
2757	8.12	K2V		WDS	1822	2011	125	10.0		
03470+4126	8.82	K3V	7.4	Photo	1960	2001	101	2.5	0.0479	0.0379
				CCD	2004	2019	52	1.1	0.0087	0.0071
10386	8.85	K6V		WDS	1830	2012	42	3.1		
17102+5430	9.21	K6V	22.0	Photo	1961	2002	27	0.9	0.0202	0.0241
				CCD	2004	2018	31	0.4	0.0128	0.0094
12169	6.57	G2V		WDS	1819	2015	297	20.6		
19121+4951	6.75	G3V	7.8	Photo	1961	1999	97	4.9	0.0234	0.0133
				CCD	2003	2019	157	2.4	0.0104	0.0042
				<i>WSI</i>	<i>2000</i>	<i>2014</i>	25	3.5	0.0551	0.0327

Примечание. В столбцах таблицы приведены: ADS и WDS – номера исследуемых звезд согласно каталогам Эйткина и WDS [11]; m_v и Sp – звездные величины и спектральные классы компонентов согласно [11]; ρ – среднее угловое расстояние между компонентами; T_1 и T_2 – начальная и конечная эпохи наблюдений; n – количество наблюдений; $\Delta\theta$ – изменение позиционного угла спутника В относительно главной звезды А за период указанных наблюдений; $\sigma_{\rho 1}$ и $\sigma_{\tau 1}$ – ошибки единицы веса в радиальном и тангенциальном направлениях, аналогично табл. 1. В столбце “Серия” указаны ряды: WDS – общемировых наблюдений [11], Photo – фотографических наблюдений на 26" рефракторе ГАО РАН [21], CCD – ПЗС-наблюдений (табл. 1) на 26" рефракторе ГАО РАН. Курсивом выделены фотографические (*USNO*) и спекл-интерферометрические (*WSI*) ряды наблюдений Военно-морской обсерватории США согласно [11].

Таблица 4. Данные GAIA DR2 об исследуемых визуально-двойных звездах

ADS	π , мсд	μ_x , мсд/год	μ_y , мсд/год	V_r , км/с	V_r^* , км/с	n^*	Ссылка
246A	280.69 ± 0.04	2891.5	+411.9	+11.51 ± 0.14	+11.97 ± 0.22	11	[25]
246B	280.79 ± 0.05	2863.2	+336.5	–	+10.98 ± 0.16	7	[25]
B–A	280.73 ± 0.07			–	–0.99 ± 0.27		
2757A	41.83 ± 0.04	+598.0	–1243.9	+50.87 ± 0.14	50.18 ± 0.11	20	[26]
2757B	41.36 ± 0.05	+588.7	–1262.0	+50.00 ± 1.91	(50.80 ± 0.06)	43	[26]
B–A	41.64 ± 0.06			–0.87 ± 1.92	+0.62 ± 0.13		
10386A	47.05 ± 0.03	+ 81.9	–110.6	+2.95 ± 0.17	+2.69 ± 0.13	11	[27]
10386B	47.07 ± 0.02	+ 86.3	–103.2	+2.19 ± 0.38	+1.73 ± 0.12	11	[27]
B–A	47.06 ± 0.04			–0.76 ± 0.42	–0.96 ± 0.18		
12169A	39.56 ± 0.02	–210.6	+621.2	–40.99 ± 0.17	–41.26 ± 0.13	9	[27]
12169B	39.60 ± 0.02	–185.9	+630.2	–41.86 ± 0.26	–41.73 ± 0.13	9	[27]
B–A	39.58 ± 0.03			–0.87 ± 0.31	–0.47 ± 0.18		

Примечание. В столбцах таблицы приведены: π , μ_x , μ_y и V_r – параллакс, собственные движения и лучевая скорость с ошибками для каждого компонента согласно [12] соответственно, V_r^* и n^* – лучевая скорость и количество спектральных наблюдений согласно приведенным ссылкам. Для ADS 2757 в скобках дана лучевая скорость центра масс компонента В согласно спектральной орбите [26]. В третьей строке для каждой двойной звезды даны средневзвешенный параллакс и относительная лучевая скорость компонентов $\Delta V_r = V_{rB} - V_{rA}$.

Таблица 5. Исходные данные для определения ПВД-орбит исследуемых звезд

ADS	T_0 , год	ρ , "	$\theta_{2000.0}$, °	μ , мсд/год	$\psi_{2000.0}$, °	π_G , мсд	ΔV_r , км/с	$\Delta\theta$, °	Базис
246	1991.8	35.641 ± 0.002	63.307 ± 0.003	74.5 ± 0.1	194.9 ± 0.1	280.73 ± 0.07	-0.99 ± 0.27	4.9	UCCD
	2011.4	34.607 ± 0.001	65.104 ± 0.001	80.1 ± 0.2	199.9 ± 0.1	280.73 ± 0.07	-0.95 ± 0.27	1.5	CCD
	2015.5	34.37823 ± 0.00004	65.4466 ± 0.0001	80.49 ± 0.06	200.5 ± 0.1	280.73 ± 0.07	-0.95 ± 0.27	0.0	G18M
2757	1989.9	7.315 ± 0.003	54.145 ± 0.014	17.7 ± 0.2	206.3 ± 0.4	41.64 ± 0.06	0.62 ± 0.13	3.8	PCCD
	2011.4	6.953 ± 0.001	55.654 ± 0.007	20.1 ± 0.2	208.5 ± 0.6	41.64 ± 0.06	0.59 ± 0.13	1.1	CCD
	2015.5	6.89037 ± 0.00004	55.9510 ± 0.0003	20.42 ± 0.11	207.1 ± 0.3	41.64 ± 0.06	0.56 ± 0.13	0.0	G18T
10386	1990.1	22.191 ± 0.005	133.678 ± 0.012	8.8 ± 0.2	32.1 ± 1.5	47.06 ± 0.04	-0.96 ± 0.18	1.3	PCCD
	2011.4	22.154 ± 0.002	133.200 ± 0.003	8.7 ± 0.4	29.0 ± 2.4	47.06 ± 0.04	-0.96 ± 0.18	0.4	CCD
	2015.5	22.14408 ± 0.00003	133.1073 ± 0.0001	8.55 ± 0.08	30.9 ± 0.6	47.06 ± 0.04	-0.96 ± 0.18	0.0	G18T
12169	1990.7	7.654 ± 0.001	207.866 ± 0.010	25.7 ± 0.1	71.6 ± 0.2	39.58 ± 0.03	-0.47 ± 0.18	7.5	PCCD
	2011.6	7.264 ± 0.001	204.901 ± 0.003	27.1 ± 0.1	70.3 ± 0.2	39.58 ± 0.03	-0.37 ± 0.18	2.4	CCD
	2015.5	7.19678 ± 0.00004	204.3334 ± 0.0002	26.24 ± 0.06	70.0 ± 0.2	39.58 ± 0.03	-0.36 ± 0.18	0.0	G18T

Примечание. В столбцах таблицы приведены: T_0 – средний момент наблюдений; параметры видимого движения: ρ – угловое расстояние между компонентами, θ – позиционный угол относительного положения, μ – видимая скорость относительного движения, ψ – позиционный угол относительного движения; дополнительные параметры: π_G – параллакс и ΔV_r – относительная лучевая скорость (см. табл. 4); $\Delta\theta$ – изменение позиционного угла; базисы: UCCD – объединенный ряд фотографических наблюдений обсерватории USNO [11] и ПЗС-наблюдений в Пулковско (см. табл. 1), CCD – ряд ПЗС-наблюдений в Пулковско (см. табл. 1), G18 – данные Gaia DR2 2018 г. [12]. В обозначении базиса Gaia последняя буква соответствует первой букве в фамилии первого автора публикации лучевых скоростей этой звезды (M – Марси [25], T – Токовинин [26, 27]). Относительная лучевая скорость исправлена за орбитальное движение за период с 1990-х гг., когда были проведены указанные наблюдения лучевых скоростей, до момента T_0 , для ADS 10386 это исправление не потребовалось.

точность наблюдаемой основной дуги (базиса), но и ее длина. Дуга наземных наблюдений достигнутой точности длиной менее 3° не приводит к уверенным результатам. Поэтому для медленно движущихся звездных пар мы дополняли имеющуюся базисную дугу надежными наблюдениями из каталога WDS [11] (см., напр., [16, 17, 24]).

В табл. 4 представлены данные из каталога Gaia DR2 [12]: параллаксы, собственные движения и лучевые скорости для каждого компонента.

Собственные движения компонентов довольно значительны и имеют одинаковое направление, физическая связь в парах не вызывает сомнений. Лучевые скорости Gaia в сравнении с данными из [25–27] следующие: для первой пары нет измерений компонента В (слишком слаб?, см. табл. 3), для второй пары погрешность лучевой скорости компонента В слишком большая (известно, что этот компонент спектрально-двойной, в таблице дано значение лучевой скорости центра масс со-

гласно спектральной орбите [26]). Значит, полученная Gaia лучевая скорость — мгновенная, использовать ее нельзя. Погрешности для компонентов третьей и четвертой пар хуже, чем у данных из литературы (см. табл. 4). В результате использовать данные Gaia о лучевых скоростях не удалось.

В наиболее современном исследовании звезд солнечного типа 2018 г. [28] имеются результаты определения лучевых скоростей компонентов ADS 2757 и 10386. Однако соответствующие спектральные наблюдения были проведены в 1980–1990 гг., т.е. в тот же период времени, что и в работах [26, 27], но с меньшей точностью. Поэтому мы остановимся на данных именно этих работ (см. табл. 4).

В табл. 5 приведены параметры видимого движения исследуемых звезд для разных базисов, используемые значения параллакса и относительной лучевой скорости, а также длина дуги соответствующего базиса. Отметим, что для ADS 246 мы дополнили наш пулковский ряд фотографическими наблюдениями USNO [11]. Для метода ПВД важно, что ряд USNO, как и пулковский, является однородным. Дело в том, что эта быстрая широкая пара была включена в Пулковскую программу фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе именно тогда, когда мы узнали результаты определения лучевых скоростей ее компонентов [25]. Однако эра фотографии закончилась, и мы не успели накопить достаточный ряд пулковских наблюдений. К счастью, эра пулковских ПЗС наблюдений продолжается.

4. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Итак, имея для каждой исследуемой двойной звезды все необходимые данные — параметры видимого движения, параллакс и относительную лучевую скорость (см. табл. 5) — и задавая $\beta = 0 \pm 90^\circ$, мы получаем семейство орбит для каждой фиксированной массы и каждого базиса. Сравнивая элементы Тиле-Иннеса каждой орбиты с использованием контрольного ряда наблюдений и без него по ф-ле (4), мы получаем зависимость функции $S = f(M_{AB})$. Выявленные зависимости для 4 исследуемых звезд и разных базисов представлены на рис. 1. Для трех из них соответствие минимумов по разным базисам достаточно определено и составляет: $0.59 M_\odot$ для ADS 246, $1.70 M_\odot$ для ADS 2757 и $2.25 M_\odot$ для ADS 12169. Для наиболее медленной пары ADS 10386 минимум по базису CCD несколько отличается от совпадающих минимумов, полученных по наиболее надежному по продолжительности (PCCD) и по точности (G18T) базисам. Окончательно мы выбираем сумму масс $1.70 M_\odot$, полученную по двум последним.

С полученной таким образом суммой масс мы выявляем зависимость функции $S = f(\beta)$ и ее минимум. Кеплеровы элементы орбиты, соответствующие этому β и этому базису, сравниваем с элементами орбит, полученных аналогичным образом по другому базису. Совпадение элементов орбит по трем разным базисам приводит к окончательному результату. Однако следует каждый раз просчитывать эфемеридную относительную лучевую скорость на момент T_0 так, чтобы ее величина на средний момент проведения спектральных наблюдений соответствовала публикации. Поэтому в табл. 5 даны ΔV , уже с учетом орбитального движения.

В табл. 6 приведены ПВД-орбиты, полученные в настоящей работе по разным базисам, в нижних строках для каждой звезды — предыдущие орбиты. Напомним, что для вычисления последних использованы другие значения параллакса и суммы масс компонентов. Наиболее надежным результатом мы считаем средневзвешенное решение из тех, которые получены в данной работе. В некоторых случаях дуги пулковских ПЗС-наблюдений ($1-2^\circ$) в настоящее время недостаточно. Необходимо продолжать плотные однородные ПЗС-ряды на 26-дюймовом рефракторе в Пулково.

В табл. 7 приведены окончательные ПВД-орбиты, средние орбиты, полученные Измайловым [9] без весов и с весами, а также орбиты других авторов: Липпинкотт [31] и Хэйла [6]. Дана также сумма масс компонентов, которая для ПВД-орбит определена из анализа совпадения орбит семейств, полученных по разным базисам (настоящая работа), для других орбит пересчитана с параллаксом Gaia DR2 [12]. Таблица показывает, что согласно [9] для исследуемых визуально-двойных звезд введение весов позиционных наблюдений не улучшает ошибки определения орбит, величины суммы масс компонентов значительно превышают массы, соответствующие зависимости “масса–светимость”.

Модифицированный метод ПВД дает более надежный результат, поскольку использует целый комплекс надежных данных как астрометрического, так и астрофизического характера: плотный ряд позиционных наблюдений, надежные параллаксы и лучевые скорости компонентов, надежные (сглаженные) наблюдения для выбора наилучшего решения из семейства ПВД-орбит. Полученные этим методом суммы масс компонентов в пределах ошибок соответствуют зависимости “масса–светимость”.

В табл. 8 приведены параметры ориентации ПВД-орбит в галактической системе координат: долгота и широта векторов полюса орбиты \bar{Q} и периастра \bar{P} . В трех из четырех случаях орбиты круто

Таблица 6. Элементы улучшенных ПВД-орбит 4 исследуемых звезд

$\beta, ^\circ$	$A, \text{ а.е.}$	$P, \text{ годы}$	e	$\omega, ^\circ$	$i, ^\circ$	$\Omega, ^\circ$	$T_{\text{П}}, \text{ годы}$	$S, ''$	$\sigma_{\rho}, \text{ мсд}$ $\sigma_{\tau}, \text{ мсд}$	Базис
ADS 246 ($\pi_G = 280.73, M_{AB} = 0.59$)										
-15	97	1242	0.48	353	53	232	2404	0.08	124.6	UCCD
± 2	± 11	± 201	± 0.14	± 11	± 6	± 3	± 52		125.1	
-15	96	1219	0.51	350	52	233	2380	0.32	135.5	CCD
± 3	± 10	± 189	± 0.13	± 12	± 6	± 3	± 45		126.5	
-16	96	1220	0.50	351	53	233	2387	0.20	127.3	G18M
± 2	± 10	± 187	± 0.13	± 12	± 6	± 3	± 42		126.4	
-	96	1226	0.50	352	53	232	2389	-	-	ср. взв.
	± 12	± 236	± 0.16	± 15	± 7	± 4	± 57		-	
ADS 246 ($\pi_{\text{Hip}} = 279.0, M_{AB} = 0.56$)										
0	96	1253	0.59	331	46	243	2327	-	-	UPhoto
	± 11	259	± 0.19	± 32	± 11	± 25	± 81		-	[29]
ADS 2757 ($\pi_G = 41.64, M_{AB} = 1.70$)										
+16	125	1073	0.80	181	51	41	2253	0.24	55.4	PCCD
± 3	± 3	± 44	± 0.04	± 4	± 5	± 2	± 18		76.4	
+13	125	1077	0.82	176	46	43	2235	0.09	55.2	CCD
± 2	± 2	± 30	± 0.03	± 4	± 5	± 2	± 11		70.4	
+13	125	1075	0.81	176	43	42	2238	0.09	55.3	G18T
± 3	± 3	± 34	± 0.03	± 4	± 5	± 2	± 11		74.8	
-	125	1075	0.81	178	47	42	2239	-	-	ср. взв.
	± 3	± 45	± 0.04	± 5	± 6	± 3	± 17		-	
ADS 2757 ($\pi_{\text{Hip}} = 41.0, M_{AB} = 1.7$)										
+3	126	1090	0.87	168	31	49	2215	-	-	Photo
	± 3	± 40	± 0.05	± 13	± 15	± 10	± 24		-	[30]
-3	126	1090	0.89	157	23	60	2209	-	-	Photo
	± 3	± 40	± 0.02	± 57	± 13	± 57	± 5		-	[30]
ADS 10386 ($\pi_G = 47.6, M_{AB} = 1.70$)										
-5	324	4472	0.47	2	132	318	4083	0.34	95.0	PCCD
± 8	± 26	± 544	± 0.11	± 16	± 6	± 6	± 283		95.8	
-8	325	4483	0.47	7	131	320	4131	0.18	98.9	CCD
± 4	± 26	± 542	± 0.11	± 14	± 5	± 5	± 326		100.4	
-10	324	4481	0.47	13	130	322	4237	0.30	92.7	G18T
± 4	± 26	± 532	± 0.11	± 8	± 5	± 3	± 188		104.0	
-	324	4478	0.47	10	131	321	4179	-	-	ср. взв.
	± 32	± 660	± 0.13	± 16	± 7	± 6	± 333		-	
ADS 10386 ($\pi_{\text{Hip}} = 47.0, M_{AB} = 1.3$)										
0	345	5610	0.39	347	129	314	4360	-	-	Photo
	± 43	± 1065	± 0.17	± 30	± 6	± 11	± 488		-	[29]
ADS 12169 ($\pi_G = 39.58, M_{AB} = 2.25$)										
-43	378	4893	0.49	317	123	66	2407	0.14	129.6	PCCD
± 1	± 20	± 380	± 0.02	± 9	± 1	± 2	± 17		± 92.9	
-43	378	4890	0.53	317	125	66	2379	0.27	119.1	CCD
± 1	± 18	± 361	± 0.02	± 8	± 1	± 2	± 13		± 97.0	

Таблица 6. Окончание

β , °	A , а.е.	P , годы	e	ω , °	i , °	Ω , °	$T_{\text{П}}$, годы	S , "	σ_p , мсд σ_τ , мсд	Базис
-46	377	4876	0.49	317	123	66	2412	0.20	130.1	G18T
± 1	± 23	± 442	± 0.02	± 9	± 1	± 2	± 17		± 94.3	
-	377	4887	0.50	317	124	66	2395	-	-	ср. взв.
	± 25	± 485	± 0.02	± 11	± 2	± 3	± 19		-	
ADS 12169 ($\pi_{\text{vAI}} = 42.0$, $M_{AB} = 1.8$)										
-38	316	4186	0.55	332	129	69	2395	-	-	Photo [15]
+38	316	4186	0.65	171	133	258	2369	-	-	Photo [15]

Примечание. В столбцах таблицы приведены: β – угол между вектором положения \vec{R} на момент T_0 и его проекцией на картинную плоскость; A , P , e , ω , i , Ω и $T_{\text{П}}$ – кеплеровы элементы орбит; S – значение функции, которая характеризует согласованность орбиты с наблюдениями контрольного ряда (по ф-ле (4)); σ_p и σ_τ – среднеквадратичные невязки, полученные по всем наблюдениям из WDS (прошедшим критерий 3σ) с равными весами, которые характеризуют качество этого ряда сравнения, M_{AB} – сумма масс компонентов в единицах массы Солнца. Обозначение базисов: UPhoto – объединенный ряд фотографических наблюдений обсерваторий USNO [11] и Пулково [21], остальные – см. табл. 5. Окончательным принято средневзвешенное решение из полученных в данной работе.

Таблица 7. Элементы орбит 4 исследуемых визуально-двойных звезд

ADS	P , годы	a , "	i , °	Ω , °	$T_{\text{П}}$, годы	e	ω , °	M_{AB}, M_{\odot}	Ссылка
246	1226.2	26.98	52.5	232.4	2389.0	0.50	351.5	0.59 ± 0.05	наст.р.
	± 235.7	± 3.40	± 7.4	± 3.8	± 56.7	± 0.16	± 14.6		
	1619.9	34.48	54.4	79.9	2267.3	0.68	112.3	0.71	[9], без
	± 487.9	± 8.51	± 8.5	± 22.3	± 61.1	± 0.21	± 26.6		весов
	1590.7	35.83	55.5	84.0	2250.7	0.72	108.7	0.82	[9], с
	± 514.7	± 10.50	± 9.6	± 19.2	± 51.3	± 0.17	± 17.4		весами
2757	2600.0	41.15	61.4	45.3	1745.0	0.0	0.0	0.47	[31]
	1075.3	5.21	46.8	41.7	2239.2	0.81	177.7	1.70 ± 0.3	наст.р.
	± 45.0	± 0.14	± 5.8	± 3.0	± 16.9	± 0.04	± 4.6		
	1551.2	16.00	84.4	39.3	1687.1	0.77	277.7	23.7	[9], без
	± 474.9	± 5.95	± 2.3	± 1.6	± 44.1	± 0.15	± 11.3		весов
	2275.5	22.79	85.4	37.7	1636.2	0.83	282.8	31.7	[9], с
10386	± 904.6	± 10.31	± 2.7	± 2.1	± 65.4	± 0.13	± 13.4		весами
	4478.4	15.26	130.7	320.7	4178.6	0.47	9.8	1.70 ± 0.4	наст.р.
	± 660.4	± 1.49	± 6.5	± 6.1	± 333.0	± 0.13	± 16.1		
12169	4887.4	14.94	123.7	65.8	2394.8	0.50	317.0	2.25 ± 0.5	наст.р.
	± 484.8	± 0.98	± 1.6	± 2.5	± 19.4	± 0.02	± 11.0		
	1514.0	15.29	100.8	241.7	1447.8	0.65	269.3	25.1	[9], без
	± 634.1	± 7.64	± 5.9	± 4.5	± 180.5	± 0.27	± 28.6		весов
	1459.1	12.95	104.8	251.0	2604.9	0.67	247.2	16.5	[9], с
	± 1194.1	± 8.28	± 9.3	± 12.8	± 963.7	± 0.26	± 32.6		весами
	3100.0	12.75	119.1	255.2	2520.0	0.50	186.1	3.48	[6]

Примечание. M_{AB} – сумма масс компонентов, для ПВД-орбит определена из анализа совпадения орбит семейств, полученных по разным базисам (настоящая работа), для других орбит пересчитана по третьему закону Кеплера с учетом параллакса Gaia DR2 (см. табл. 5).

Таблица 8. Параметры орбит в галактической системе координат

ADS	$\beta, ^\circ$	LQ	BQ	LP	BP	Базис
246	-15	345	57	9	-31	UCCD
	± 2	± 8	± 5	± 12	± 1	
	-15	343	58	6	-30	CCD
	± 3	± 9	± 5	± 13	± 2	
	-16	344	58	7	-30	G18M
	± 2	± 8	± 5	± 12	± 2	
	-	344	58	7	-31	ср. взв.
		± 10	± 6	± 15	± 2	
	0	325	60	350	-28	UPhoto [29]
		± 13	± 6	± 14	± 2	
2757	+16	284	5	348	-79	PCCD
	± 3	± 5	± 2	± 4	± 3	
	+13	289	5	343	-82	CCD
	± 2	± 5	± 2	± 4	± 3	
	+13	291	5	336	-82	G18T
	± 3	± 5	± 2	± 3	± 3	
	-	288	5	341	-81	ср. взв.
		± 6	± 2	± 5	± 4	
	+3	304	4	334	-86	Photo [30]
	-3	313	-1	325	-89	Photo [30]
10386	-5	110	-4	197	32	PCCD
	± 8	± 5	± 5	± 8	± 11	
	-8	109	-6	195	35	CCD
	± 4	± 4	± 5	± 8	± 10	
	-10	109	-7	193	40	G18T
	± 4	± 4	± 4	± 4	± 6	
	-	109	-6	194	37	ср. взв.
		± 5	± 6	± 8	± 11	
	0	115	-5	203	20	Photo [29]
	12169	-43	41	-24	221	-66
± 1		± 1	± 2	± 20	± 2	
-43		43	-23	220	-67	CCD
± 1		± 1	± 2	± 18	± 2	
-46		41	-25	220	-65	G18T
± 1		± 1	± 2	± 19	± 2	
-		42	-24	220	-66	ср. взв.
		± 1	± 2	± 23	± 2	
-38		43	-19	185	-66	Photo [15]
+38		129	+36	132	-54	Photo [15]

Примечание. Приведены параметры ориентации орбит в галактической системе координат: долгота и широта векторов полюса орбиты \vec{Q} и периастра \vec{P} .

наклонены к плоскости Галактики ($|b_Q| \leq 30^\circ$), т.е. наклон плоскостей орбит к плоскости Галактики превышает 60° . В случае ADS 246 имеем $b_Q = +58^\circ \pm 6^\circ$, но разделение компонентов этой пары меньше 100 а.е.

5. КОММЕНТАРИИ

Двойная звезда ADS 246 – наиболее близкая пара с очень большими собственными движениями компонентов (см. табл. 4) и с наиболее уверенным орбитальным движением. На рис. 2 показаны: гипотетическая (круговая) орбита Липпинкотт 1972 г. [31], наша ПВД-орбита 2014 г. [29], а также 3 практически совпадающие ПВД-орбиты, полученные в настоящей работе по разным базисам (табл. 5 и 6). Можно заметить, что орбита Липпинкотт отклоняется от современных наблюдений, в том числе и от наблюдений Gaia. Полученная в этом году орбита мало отличается от предыдущей [29], но более надежна. Итоговая сумма масс компонентов $0.59 \pm 0.05 M_\odot$ в пределах ошибки совпадает с величиной, соответствующей зависимости “масса–светимость”.

Слабый компонент визуально-двойной звезды ADS 2757 является спектрально-двойным. Токовинин и соавт. [26] определили его спектральную орбиту с периодом около 48 дней и сумму масс компонентов (с учетом спектрального спутника) $1.68 M_\odot$. Наилучшее совпадение ПВД-орбит, полученное в настоящей работе, соответствует близкому значению $1.70 M_\odot$ (рис. 3). Орбита, полученная по данным Gaia DR2, хуже согласуется с наблюдениями рубежа XIX–XX веков и надежным наблюдением В. Струве 1830 г. (см. рис. 3г), что можно объяснить влиянием спектрального спутника компонента В. Однако в пределах ошибок она согласуется с двумя другими, определенными по пулковским базисам, и окончательным мы считаем средневзвешенное решение из трех (табл. 6). Судя по элементам орбит, эта орбита более близка к предварительной орбите 2000 г., соответствующей $\beta > 0$ [30]. Таким образом, удалось уточнить эту орбиту и получить единственное решение относительно картинной плоскости. На рис. 3а и 3в показаны обе средние орбиты Измайлова [9], соответствующие более $20 M_\odot$ (табл. 7). Отметим, что они обе отклоняются от надежного наблюдения Струве 1830 г.

ADS 10386 – рядовая двойная звезда, собственные движения и лучевые скорости компонентов которой невелики, но, как и параллаксы, свидетельствуют о физической связи компонентов (табл. 4). Дуга общемировых наблюдений составляет всего $\sim 3^\circ$. По пулковскому ряду фотографических наблюдений 1961–2002 гг. (дуга $\sim 1^\circ$) в 2014 г. было получено семейство ПВД-орбит

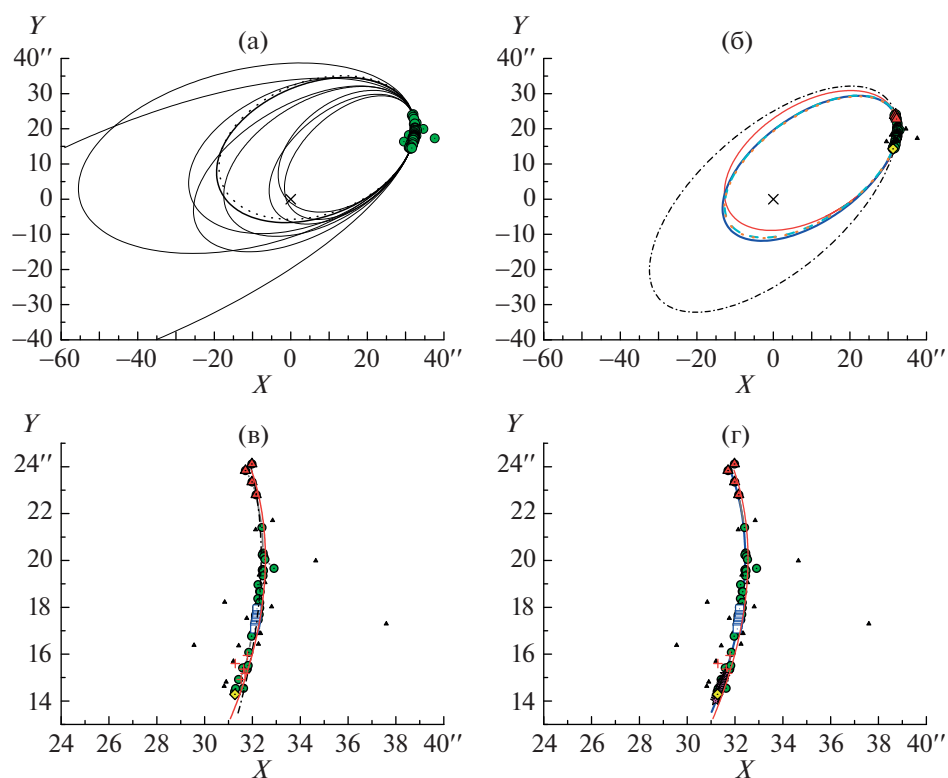


Рис. 2. Сравнение орбит с наблюдениями для ADS 246. Ось X направлена на восток, ось Y на север, начало координат соответствует компоненту А (косой крестик), кружки – относительные наблюдения компонента В согласно WDS [11], треугольники – наблюдения Струве [11], маленькие треугольники – наблюдения согласно WDS [11], не прошедшие критерий 3σ по ρ или по θ , квадраты – фотографический ряд наблюдений USNO [11], крестики – фотографические наблюдения в Пулковско [21], звездочки – ряд ПЗС-наблюдений в Пулковско (табл. 2), ромбик – космические наблюдения Gaia DR2 2015 г. [12]. (а) – Вероятные орбиты 2019 г. Показаны 8 орбит из 200, полученных Измайловым [9], в том числе орбиты с минимальным (834 года) и максимальным (7898 лет) периодом. Жирной сплошной линией показана средняя орбита без весов, пунктирной – средняя орбита с весами (см. табл. 7). (б) – ПВД-орбиты и орбита 1972 г. Обозначены: штрих-пунктирная линия – орбита Липпинкотт 1972 г. [31], сплошная (красная) линия – ПВД-орбита 2014 г. [29], синяя сплошная и штриховые линии – ПВД-орбиты, полученные по разным базисам (см. табл. 5 и 6), практически совпадающие между собой, соответствуют сумме масс $M_{AB} = 0.59 M_{\odot}$. (в) – Предварительные орбиты 1972 и 2014 г. Обозначения см. выше. Очевидно, что орбита Липпинкотт отклоняется от современных наблюдений. (г) – Окончательная ПВД-орбита. Обозначения: толстая (синяя) линия – эфемериды на 1860–2025 гг. окончательной орбиты (см. табл. 6), практически совпадает с ПВД-орбитой 2014 г., остальные обозначения см. выше.

[29], эфемериды которых практически совпадают, выбрать единственное решение не удалось. Однако на рис. 4а можно заметить, что решение, соответствующее $\beta = 0$, лучше описывает направление движения компонента В. Кроме того, на этом рисунке заметно отклонение пулковских ПЗС-наблюдений 2004–2019 гг. от этих эфемерид, требуется улучшение. Согласно новому алгоритму мы исправили наблюдение В. Струве 1830 г. на -0.5° по позиционному углу θ и получили практически совпадающие ПВД-орбиты по разным базисам, лучше описывающие все наблюдения (см. рис. 4б).

Наилучшие из новых семейств орбиты, полученные по разным базисам согласно алгоритму, описанному Кияевой [17], хорошо согласуются с наблюдениями. Однако это разные орбиты с разными периодами и эксцентриситетами, соответствующие разным массам (рис. 4в). Мы исходим из того, что реальная орбита должна быть одна с одним периодом, одним эксцентриситетом и одной массой. Рис. 4г демонстрирует ПВД-орбиты, полученные по разным базисам, совпадающие при сумме масс компонентов, равной $1.7 M_{\odot}$, что несколько выше, чем следует из зависимости “масса–светимость” (табл. 6).

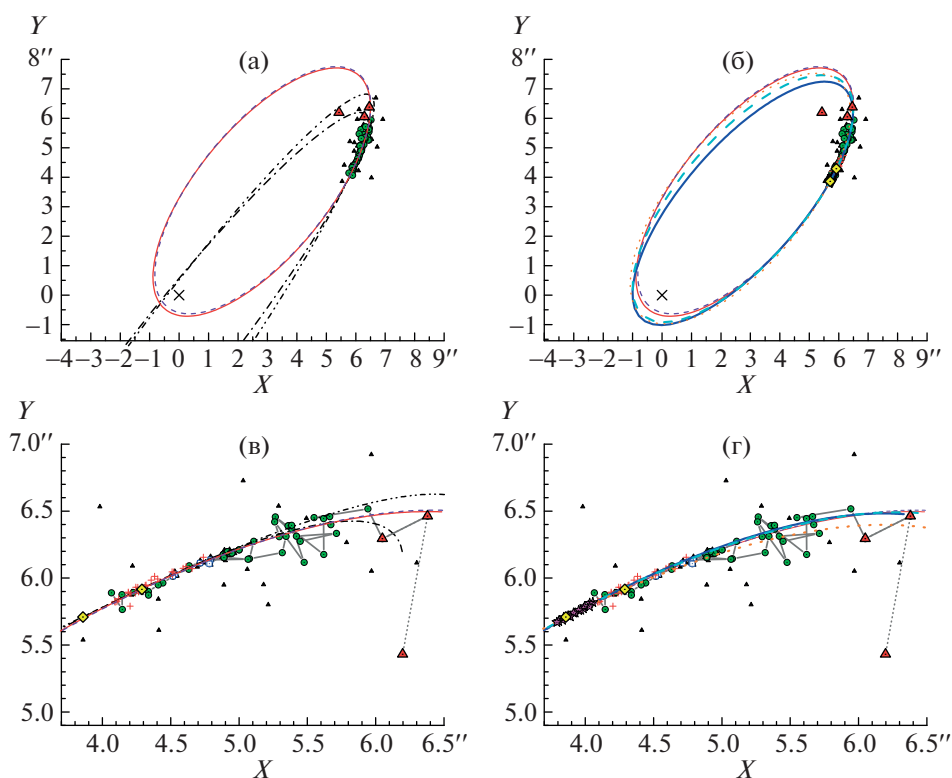


Рис. 3. Сравнение орбит с наблюдениями для ADS 2757. Обозначены: треугольники – наблюдения В. Струве в 1822–1851 гг., ромбики – космические наблюдения Hipparcos 1991 г. [11] и Gaia DR2 2015 г. [12], остальные обозначения наблюдений те же, что на рис. 2. (а) – Предварительные орбиты 2000 г. и средние орбиты 2019 г. Тонкая сплошная и тонкая штриховая линии – ПВД-орбиты 2000 г., соответствующие $\beta > 0$ и $\beta < 0$ [30] (см. табл. 6), штрихпунктирная линия и штриховая линия с двумя точками – средние орбиты (с весами и без весов), полученные Измайловым в 2019 г. [9], соответствующие суммы масс компонентов равны 24 и $32 M_{\odot}$ (табл. 7). (б) – Новые ПВД-орбиты. Толстая сплошная (синяя) и толстая штриховая (голубая) линии – ПВД-орбиты, полученные по объединенному пулковскому ряду (фото + ПЗС) и только по ПЗС-наблюдениям соответственно, пунктирная линия – ПВД-орбита, полученная по данным Gaia DR2 [12] (оранжевая). (в) – Предварительные орбиты 2000 и 2019 г. Эфемериды на 1830–2025 гг. ПВД-орбит 2000 г., соответствующие $\beta > 0$ и $\beta < 0$, совпадают между собой. Очевидно, что первое наблюдение В. Струве 1822 г. не является надежным и не должно учитываться при вычислении орбиты. Средние орбиты 2019 г. отклоняются от надежного наблюдения Струве 1830 г. (г) – Новые ПВД-орбиты. Показаны эфемериды на 1830–2025 гг. ПВД-орбит, полученных в настоящей работе, соответствующие сумме масс $M_{AB} = 1.7 M_{\odot}$, обозначения см. выше.

Компоненты ADS 12169 – желтые карлики. Если ранее в каталогах указывались их спектральные классы как G5 и G5, то в последней версии каталога WDS – как G3V и G3V. Тогда величина суммы масс компонентов должна быть не $1.8 M_{\odot}$, которую мы использовали в работе 1996 г. [15], а $2.0 M_{\odot}$. Наилучшее совпадение новых ПВД-орбит получилось при величине, равной $2.25 M_{\odot}$ (табл. 6), что в пределах ошибок согласуется с зависимостью “масса–светимость”, но не согласуется по массе с результатами Хэйла 1994 г. [6] и Измайлова [9] (см. табл. 7). Можно также отметить соответствие геометрических элементов новой средневзвешенной орбиты элементам орбиты 1996 г., соответствующей $\beta < 0$, (см. табл. 6) и параметров ориентации (см. табл. 8).

На рис. 5а показаны около 300 позиционных наблюдений ADS 12169 согласно каталогу WDS, включая наблюдения В. Струве и обсерватории USNO в Вашингтоне. Очевидно, что первые наблюдения Струве в 1819–1823 гг. не могут быть использованы для выбора наилучшей орбиты. На рис. 5б даны пулковские и космические наблюдения, а также эфемериды орбиты Хэйла [6] и трех ПВД-орбит из семейства 1996 г. [15]. Причем ПВД-орбита, соответствующая $\beta = 0$, плохо согласуется со старыми наблюдениями. На рис. 5в показаны эфемериды новых ПВД-орбит. На рис. 5г кроме новых ПВД-орбит даны орбита Хэйла с $M_{AB} = 3.5 M_{\odot}$ и средние орбиты Измайлова без весов и с весами, соответствующие суммы масс компонентов равны 25 и $16 M_{\odot}$ (табл. 7).

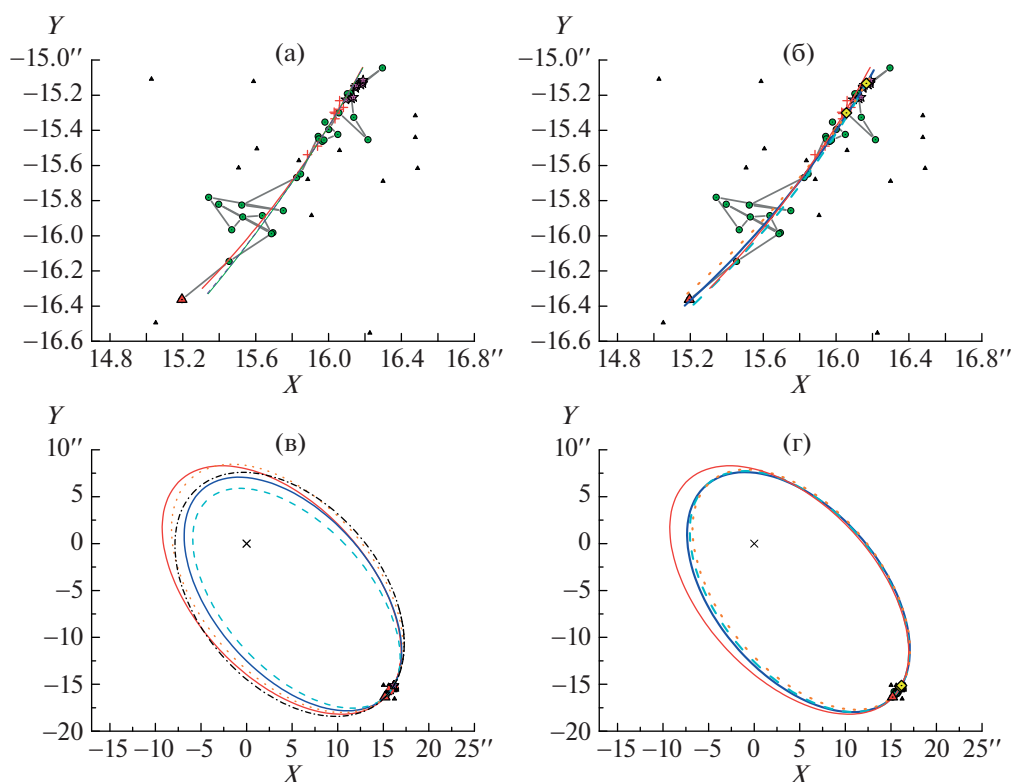


Рис. 4. Сравнение орбит с наблюдениями для ADS 10386. (а) – Предварительные орбиты 2014 г. Обозначены: треугольник – наблюдение В. Струве в 1830 г. согласно WDS [11], исправленное на -0.5° по позиционному углу θ , тонкая сплошная (красная) и тонкая штриховая (фиолетовая) линии – эфемериды на 1830–2025 гг. ПВД-орбит семейства 2014 г. [29], соответствующих $\beta = 0$, $\beta > 0$ и $\beta < 0$, две последних совпадают между собой, но хуже описывают направление движения компонента В. Заметно отклонение пулковских ПЗС-наблюдений (табл. 2) от этих эфемерид, требуется улучшение. (б) – Новые ПВД-орбиты, соответствующие сумме масс компонентов $M_{AB} = 1.7 M_\odot$. Обозначения линий см. на рис. 1 и на рис. 3. (в) – Наилучшие ПВД-орбиты, полученные по разным базисам согласно алгоритму [17]. Обозначения: тонкая сплошная (красная) линия – ПВД-орбита из семейства 2014 г. [29], соответствующая $\beta = 0$ и сумме масс компонентов $1.3 M_\odot$ (базис Photo), толстая сплошная (синяя) – орбита, полученная по объединенному ряду (базис PCCD, $M_{AB} = 1.7 M_\odot$), штриховая (голубая) – только по ПЗС ряду (CCD, $1.9 M_\odot$), пунктирная (оранжевая) и штрихпунктирная (черная) – по данным Gaia DR2 2018 г. [12] и лучевым скоростям Токовина [27] (G18T, $1.5 M_\odot$) и Gaia DR2 [12] (G18G, $1.3 M_\odot$). (г) – Совпадающие ПВД-орбиты, полученные по разным базисам, соответствующие сумме масс компонентов $1.7 M_\odot$. Обозначения см. выше.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена модификация метода ПВД: совпадение орбит, полученных по разным базисам, ведет к однозначной орбите и сумме масс компонентов.

Проведено улучшение орбит 4 визуально-двойных звезд Пулковской программы исследований (ADS 246, 2757, 10386 и 12169). Получено решение, однозначное в смысле определенности восходящего узла: орбиты с периодами 1226, 1075, 4500 и 4900 лет, ориентация орбит и массы этих систем (0.59 ± 0.05 , 1.7 ± 0.3 , 1.7 ± 0.4 и $2.25 \pm 0.5 M_\odot$), что в пределах ошибок согласуется с зависимостью “масса–светимость”, но не согла-

суется с результатами Хэйла и Измайлова, полученными методом Тиле–Иннеса.

В задаче определения орбит широких звездных пар наземные наблюдения не теряют актуальности. Необходимо продолжать плотные однородные ПЗС-ряды на 26-дюймовом рефракторе в Пулково.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено с использованием каталогов WDS [11] и Gaia DR2 [12]. Авторы выражают глубокую благодарность его создателям, а также лично Б.Д. Мэйсону за предоставление данных WDS по нашему запросу. Авторы искрен-

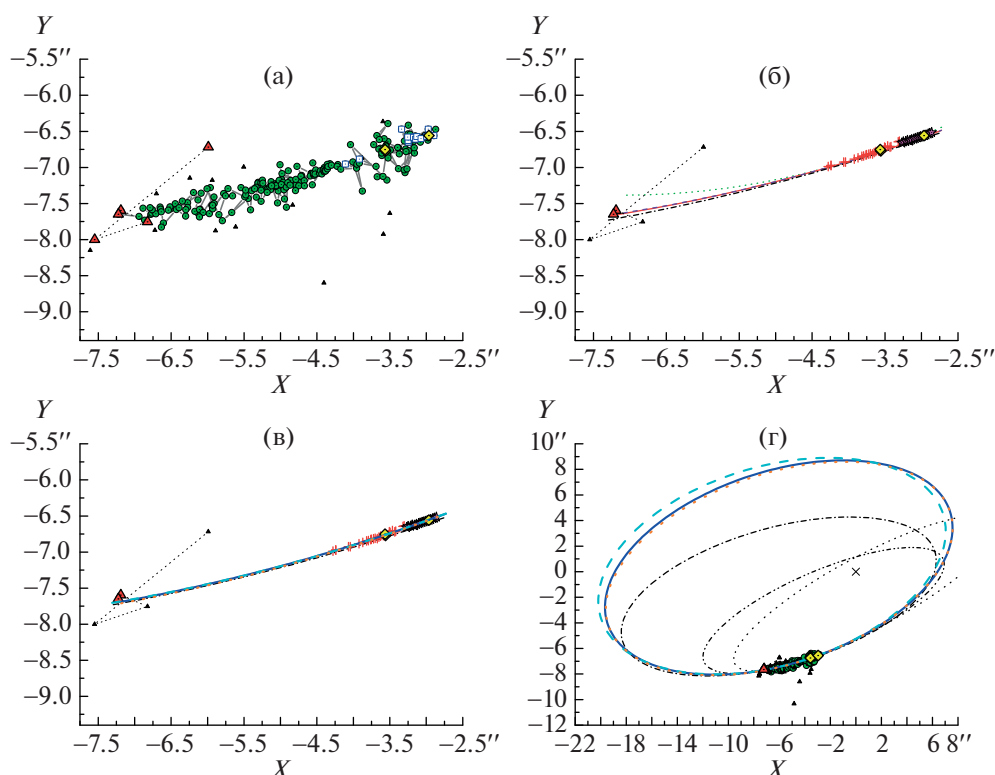


Рис. 5. Сравнение орбит с наблюдениями для ADS 12169. (а) – Наблюдения согласно каталогу WDS. Обозначены: кружки – наблюдения согласно WDS [11], треугольники – наблюдения В. Струве в 1819–1836 гг. [11], квадраты – фотографические (за 1968 и 1976 гг. [11]) и спекл-интерферометрические (за 2000–2014 гг. [11]) наблюдения Военно-морской обсерватории США. Очевидно, что для контроля или выбора наилучшего решения последний ряд ненадежен, а наблюдения Струве до 1832 г. использовать нельзя. (б) – Пулковские наблюдения и предварительные орбиты 1994 и 1996 г. Крестики и звездочки – ряды фотографических [21] и ПЗС-наблюдений (табл. 2) на 26-дюймовом рефракторе в Пулково, ромбики – космические наблюдения Hipparcos 1991 г. [11] и Gaia DR2 2015 г. [12]; штрихпунктирная линия – эфемерида на 1832–2025 гг. орбиты Хэйла [6] (табл. 7), пунктирная, сплошная и штриховая линии – эфемериды ПВД-орбит семейства 1996 г. [15], соответствующих $\beta = 0$, $\beta > 0$ и $\beta < 0$, две последних практически совпадают между собой и лучше описывают наблюдения, как и орбита Хэйла. (в) – Новые ПВД-орбиты. Сплошная, штриховая и пунктирная линии – ПВД-орбиты, полученные по базисам PCCD, CCD и G18T ($\beta < 0$), совпадающие при $2.25 M_{\odot}$. (г) – Новые ПВД-орбиты и орбиты 1996 и 2019 г. Пунктирная линия и штриховая линия с двойным пунктиром – орбиты Измайлова без весов и с весами согласно [9], соответствующие суммы масс компонентов равны 25 и $16 M_{\odot}$ (табл. 7).

не благодарят всех наблюдателей 26-дюймового рефрактора ГАО РАН, особенно – соавторов каталогов [21–23]. Авторы выражают также благодарность О.В. Кияевой за ценные замечания и консультации. Мы предполагаем продолжать наблюдения и исследования визуально-двойных звезд Пулковской программы, в том числе – широких пар с медленным орбитальным движением, а также работу над Пулковским каталогом орбит широких пар.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 20-02-00563А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *H. A. Шахт, Л. Г. Романенко, Д. Л. Горшанов, О. О. Василькова*, *Астрон. вестн.* **50**, 160 (2016).
2. *W. I. Hartkopf and B. D. Mason*, *Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars* (Washington: US Naval Observatory, 2016), <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.
3. *A. A. Kisselev and L. G. Romanenko*, *Astron. Soc. Pacific Conf. Ser.* **316**, 250 (2004).
4. *J.-L. Agati, D. Bonneau, A. Jorissen, E. Soulie, S. Udry, P. Verhas, and J. Dommangeat*, *Astron. and Astrophys.* **574**, id. A6 (2015).
5. *W. I. Hartkopf, H. A. McAlister, and O. G. Franz*, *Astron. J.* **98**, 1014 (1989).
6. *A. Hale*, *Astron. J.* **107**, 306 (1994).
7. *B. D. Mason, W. I. Hartkopf, G. I. Wycoff, and E. R. Holdenried*, *Astron. J.* **132**, 2219 (2006).

8. А. Э. Байдин, Н. И. Перов, Л. Г. Романенко, Вестник СПбГУ. Математика. Механика. Астрономия **5(63)**, 154 (2018).
9. И. С. Измайлов, Письма в Астрон. журн. **45**, 35 (2019).
10. S. Blunt, E. L. Nielsen, R. J. de Rosa, Q. M. Konopasky, et al., Astron. J. **153**, 229 (2017).
11. B. D. Mason, G. L. Wycoff, and W. I. Hartkopf, *The Washington Visual Double Star Catalogue* (Washington: US Naval Observatory, 2018), <http://ad.usno.navy.mil/wds/wds.html>
12. A. G. A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J. H. J. de Bruijne, et al., Astron. and Astrophys. **616**, id. A1 (2018).
13. А. Э. Байдин, *Исследование методов определения орбит и точности наблюдений визуально-двойных звезд*, канд. дис. (Гл. (Пулковская) астроном. обсерватория РАН, Санкт-Петербург–Ярославль, 2018).
14. А. А. Киселев, О. В. Кияева, Астрон. журн. **57**, 1227 (1980).
15. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, Астрон. журн. **73**, 875 (1996).
16. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, О. А. Калиниченко, Астрон. журн. **86**, 148 (2009).
17. О. В. Кияева, Л. Г. Романенко, Р. Я. Жучков, Письма в Астрон. журн. **43**, 354 (2017).
18. О. В. Кияева, Л. Г. Романенко, Письма в Астрон. журн. **46**, 590 (2020).
19. L. G. Romanenko and O. A. Kalinichenko, Astron. Astrophys. Trans. **31**, 7 (2019).
20. О. В. Кияева, Астрон. журн. **60**, 1208 (1983).
21. А. А. Киселев, О. В. Кияева, И. С. Измайлов, Л. Г. Романенко, и др., Астрон. журн. **91**, 130 (2014).
22. И. С. Измайлов, М. Л. Ховричева, М. Ю. Ховричев, О. В. Кияева, и др., Письма в Астрон. журн. **36**, 365 (2010).
23. I. S. Izmailov and E. A. Roshchina, Astrophys. Bull. **71**, 225 (2016).
24. Л. Г. Романенко, Астрон. журн. **94**, 224 (2017).
25. G. W. Marcy and K. J. Benitz, Astrophys. J. **344**, 441 (1989).
26. A. A. Tokovinin, A. Duquennoy, J.-L. Halbwachs, and M. Mayor, Astron. and Astrophys. **282**, 831 (1994).
27. А. А. Токовинин, Астрон. журн. **71**, 293 (1994).
28. J.-L. Halbwachs, M. Mayor, and S. Udry, Astron. and Astrophys. **619**, id. A81 (2018).
29. Л. Г. Романенко, А. А. Киселев, Астрон. журн. **91**, 47 (2014).
30. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, И. С. Измайлов, Е. А. Грошева, Изв. ГАО в Пулкове **214**, 239 (2000).
31. S. L. Lippincott, Astron. J. **77**, 165 (1972).