ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2020, том 46, № 8, с. 590–606

ПЕРВЫЕ ОРБИТЫ ШЕСТИ ШИРОКИХ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА НА ОСНОВЕ НАБЛЮДЕНИЙ Gaia DR2

© 2020 г. О. В. Кияева[1*], Л. Г. Романенко[1]

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

Поступила в редакцию 13.05.2020 г.
После доработки 30.05.2020 г.; принята к публикации 25.06.2020 г.

Метод параметров видимого движения (ПВД) предназначен для определения орбит широких пар двойных звезд с периодами обращения в сотни и тысячи лет. Это динамический метод, использующий все, что известно о звезде, в один момент времени, для восстановления полной орбиты в рамках задачи двух тел. В каталоге Gaia DR2 содержатся все данные на момент 2015.5, которые необходимы для использования метода ПВД, если относительное движение отражает невозмущенное движение по орбите. В данной работе продемонстрированы возможности метода для определения орбит индивидуальных звезд. Исследованы 6 звезд. У тройной звезды ADS 7034 впервые определены орбита внутренней пары, множество орбит внешней пары и область устойчивости тройной системы. На примере двойной звезды ADS 9357 показано, что для определения орбит индивидуальных звезд метод ПВД имеет преимущество по сравнению с геометрическими методами, использующими уравнения Тиле–Иннеса на коротких дугах, охваченных наблюдениями. Для трех звезд — ADS 7588, ADS 8561, ADS 9048 — орбиты с периодами более 1000 лет определены впервые. Для WDS 14051+4913 надежную орбиту определить невозможно, получено предварительное семейство орбит, подозревается спутник. В работе приведен список проблемных звезд, для которых не определены орбиты, но возможно присутствие спутника.

Ключевые слова: двойные звезды, орбиты по коротким дугам.

DOI: 10.31857/S0320010820070062

ВВЕДЕНИЕ

Широкие, медленно обращающиеся двойные и кратные звезды обделены вниманием исследователей, так как с момента их открытия до настоящего времени наблюдения охватывают малую дугу орбиты. В Пулковской обсерватории мы пытались компенсировать этот недостаток тем, что в течение многих лет проводили однородные наблюдения на одном телескопе (26-дюймовом рефракторе), и специально для определения орбит был предложен метод параметров видимого движения (ПВД, см. Киселев, Кияева, 1980), который ранее использовался для определения орбиты искусственного спутника Земли по одной фотографии со многими экспозициями (Киселев, Быков, 1973).

В основе всех динамических методов заложена идея Лапласа, суть которой заключается в следующем: если для тела, движущегося под действием центральной силы, известны положение, скорость и ускорение его видимого движения в некоторый момент времени, то, учитывая положение и движение наблюдателя, можно определить пространственные вектора положения и скорости, а следовательно, и орбиту. В XX в. для определения орбит двойных звезд по коротким дугам эта идея была реализована в разных модификациях (см., например, Хопман,1960; Хозер, Марси, 1999).

Одной из модификаций является метод ПВД, который предназначен для определения первоначальных орбит широких визуально-двойных звезд с большим периодом обращения, опираясь на результаты наблюдений, полученных разными доступными методами. Это параметры видимого относительного движения — расстояние между компонентами (ρ), позиционный угол (θ), видимое относительное движение (μ) и позиционный угол направления видимого движения (ψ), которые точнее всего получаются из однородных наблюдений, выполненных на одном телескопе, чтобы исключить аппаратные систематические ошибки. Кроме того, необходимыми данными являются относительная лучевая скорость компонентов ΔV_r, получаемая из спектроскопических наблюдений, параллакс p_t (для связи линейных и угловых величин) и оцен-

*Электронный адрес: kiyaeva@list.ru

ка суммы масс компонентов, согласно данным о физических свойствах звезд. При этом мы получаем семейство орбит, из которого можно выбрать те, которые удовлетворяют всем остальным, более старым наблюдениям. Если есть возможность оценить кривизну короткой дуги, по которой получены ПВД в момент $t_\circ$, то вместо семейства получаем две орбиты, соответствующие положению вторичного компонента симметрично относительно картинной плоскости.

Использование каталога Gaia DR2 (Браун и др., 2018), благодаря высокой точности положений, собственных движений и параллаксов каждого компонента пары, позволяет применить данный метод к тем звездам, для которых ранее это было невозможно, и тем самым увеличить число орбит с большим периодом обращения. К сожалению, точность определения лучевых скоростей компонентов гораздо хуже, чем точность определения собственных движений (относительных движений в картинной плоскости), поэтому ошибки элементов орбит по-прежнему большие.

В наше время больших компьютерных возможностей самый распространенный и формальный подход к задаче определения орбит двойных звезд основан на методе Тиле–Иннеса (см., например, Харткопф и др., 1989; Измайлов, 2019). Решается система уравнений, связывающая систему измеренных координат в картинной плоскости, с системой орбитальных координат. В оригинальной версии предполагалось, что наблюдения, приходящиеся на разные фазы по всей орбите, охватывают весь видимый эллипс, а потому известны период P, эксцентриситет e и момент прохождения через периастр T.

Сейчас можно путем перебора всевозможных вариантов найти решение, которое хорошо пройдет через все наблюдения, как это получилось для звезды ADS 48 (Кияева и др., 2020). Однако, применяя его без анализа всех имеющихся данных ко всем звездам, для которых наблюдения охватывают малую дугу разнородных наблюдений, мы обязательно получим какое-то решение плохо обусловленной системы, но оно не гарантирует надежные эфемериды в будущем.

Применение метода ПВД требует индивидуального подхода к каждому объекту исследования и позволяет контролировать надежность полученного результата. Здесь качество орбиты зависит только от точности исходных данных. Контроль заключается в том, что полученная орбита должна удовлетворять наблюдениям, которые не принимают участия в ее вычислении. Если есть согласие с наблюдениями, уходящими на 100–200 лет в прошлое, то и в будущем она долго (в среднем в течение $0.1P$, где P — период орбиты) не потребует улучшения. Поэтому именно сейчас, когда каталог Gaia DR2 дал возможность получать высокоточные параметры видимого движения на момент 2015.5, данный метод является лучшим для определения невозмущенных орбит индивидуальных звезд по короткой дуге. Недостатком метода является то, что в качестве исходных данных используется суммарная масса системы, но, задавая этот параметр, мы используем данные о физических свойствах звезды, также получаемых из наблюдений. Кроме того, если история наблюдений звезды достаточно богатая, удается уточнить первоначально заданную массу и обратить внимание на звезды, которые могут иметь неучтенные особенности внутреннего строения или дополнительные короткопериодические маломассивные спутники. Естественно, применение любого динамического метода невозможно, если в системе имеется спутник, который искажает ПВД и массы. Сравнивая ПВД, полученные по Gaia DR2 на момент 2015.5, с ПВД, полученными по однородным пулковским рядам на более ранний момент, можно получить дополнительную информацию: исключить звезды со спутниками или, напротив, заметить кривизну и при уточнении орбиты учитывать не только положение (ρ, θ), но и изменение в орбитальном движении $(\dot{\rho}, \dot{\theta})$.

При выборе наилучшего решения мы используем не непосредственное сравнение 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 удаленных по времени наблюдений (Кияева, 1983). Критерием является минимум функции

$$S = \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta F^2 + \Delta G^2}. \qquad (1)$$

Здесь ΔA, ΔB, ΔF, ΔG — разности элементов Тиле–Иннеса, полученных двумя путями. В отличие от непосредственного сравнения наблюдений и эфемерид, 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.

Практика динамических исследований визуально-двойных звезд (см. обзор Романенко, Калиниченко, 2019) показала, что наблюдения В.Я. Струве 1830–1835 гг. наиболее надежны среди наблюдений начала XIX в. В то же время более ранние наблюдения этого ученого, полученные с другим инструментом, могут содержать грубые ошибки, особенно по позиционному углу. В этом же обзоре отмечается высокое качество пулковских ПЗС-наблюдений на 26-дюймовом рефракторе.

Выбор звезд для исследования осуществлен следующим образом. Из всех звезд, которые наблюдались в Пулково фотографически (Киселев и др., 2014) и/или ПЗС (Измайлов и др., 2010; Измайлов, Рощина, 2016) — 259 пар, входящих в 194 звездные системы, — выбраны те, для которых в каталоге Gaia DR2 имеются все необходимые нам данные, включая параллаксы и лучевые скорости обоих компонентов, и расстояние между компонентами в картинной плоскости не превосходит 2000 а.е. (62 пары). Из них были выбраны звезды, удовлетворяющие следующим критериям:

1. Ранее нами не исследовались, так как дуга, охваченная наблюдениями, мала, и определить параметры видимого движения было невозможно.

2. Параллаксы $p_t > 10$ мсд. Исключение составляет более далекая звезда WDS 14051+4913, для которой накоплено мало наблюдений, но их бóльшая часть выполнена нами в Пулковской обсерватории.

3. Исследуемые звезды не имеют опубликованных орбит, кроме ADS 9357.

4. Квазиодномоментное относительное движение, полученное по данным Gaia DR2, не противоречит движению, определяемому по всей наблюдаемой дуге, что дает возможность определять орбиту в рамках задачи двух тел.

5. Минимальная динамическая масса $M_{\rm dyn}$, соответствующая эллиптической орбите, не превосходит заданного значения суммы масс компонентов:

$$M_{\rm dyn} = (\rho/p_t)V^2/8\pi^2. \qquad (2)$$

Здесь V — пространственная относительная скорость, выраженная в (а.е./год), на момент 2015.5: $V^2 = (\mu/p_t)^2 + (\Delta V_r/4.74)^2$. В статье представлен список проблемных звезд, не удовлетворяющих данному критерию. Возможно, особенности этих звезд представляют интерес, но в данной статье это не рассматривается.

Параметры видимого движения на момент 2015.5 вычислены по положениям и собственным движениям компонентов пары, опубликованным в Gaia DR2, а пулковские однородные наблюдения использованы так же, как и первые наблюдения звезд, для контроля и выбора наилучшего решения. При этом учитывается видимое относительное движение, полученное по однородному ряду.

В каталоге Gaia DR2 приводятся параллаксы обоих компонентов. Точность определения параллаксов недостаточна для того, чтобы определить проекцию расстояния между компонентами по лучу зрения, сравнимую с точностью определения проекции на картинную плоскость, но иногда разность параллаксов значима по сравнению с их ошибками, и можно определить, какой компонент в настоящий момент ближе. Это позволяет сузить диапазон возможных решений и является дополнительным контролем полученной орбиты.

ОПИСАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 1 приведены данные о звездах из каталога Gaia DR2. Согласие собственных движений, параллаксов и лучевых скоростей подтверждают физическую связь компонентов. Показатели цвета позволяют судить, насколько компоненты различаются по физическим свойствам. В последних колонках даны вычисленные нами массы звезд, которые соответствуют эффективной температуре из каталога Gaia DR2 в предположении, что компоненты исследуемых пар являются звездами главной последовательности, и массы, соответствующие спектрам главных компонентов исследуемых звезд, согласно каталогу WDS. Для вторичных компонентов данных о спектрах нет. Для всех звезд, кроме далекого красного карлика (WDS 14051+4913), массы отличаются не более чем на 0.05 $M_\odot$, что для первоначальной орбиты несущественно. Для WDS 14051+4913 масса M_{Sp} меньше на 0.2 $M_\odot$, соответственно сумма масс, равная 1.4 $M_\odot$, меньше минимальной $M_{\rm dyn} = 1.49\ M_\odot$. Мы не исключили данную звезду из рассмотрения, но для определения всех орбит методом ПВД первоначально задаются массы $M_{T\rm eff}$, полученные в единой системе.

В табл. 2 — данные для определения орбиты методом ПВД. Это вычисленные параметры видимого относительного движения, параллакс (p_t), относительная лучевая скорость (ΔV_r) и сумма масс компонентов ($\sum M$).

Ошибки исходных данных определяются из соответствующих наблюдений. Значение суммы масс фиксируется, но может уточняться при сравнении орбиты с удаленными наблюдениями.

В каталоге Gaia DR2 приведены независимые параллаксы каждого компонента p_{t1} и p_{t2}. Мы используем средневзвешенное значение p_t и его ошибку ε_{p_t}, вычисленные по простым формулам: $p_t = (p_{t1}w_1 + p_{t2}w_2)/(w_1 + w_2)$, $\varepsilon_{p_t} = (\varepsilon^2_{p_{t1}} + \varepsilon^2_{p_{t2}})^{1/2}$, где w_1 и w_2 — веса, соответствующие ошибкам определения параллаксов.

Первоначально при определении ПВД по ряду многолетних однородных наблюдений иногда удавалось определить радиус кривизны для определения пространственного расстояния между компонентами (см. Кияева и др., 2001; Кияева, Романенко, Жучков, 2017). В данной работе мы не используем этот параметр, так как его невозможно определить из квазиодномоментного наблюдения Gaia DR2. Вместо него используется угол β между

Таблица 1. Данные о звездах из каталога Gaia DR2

WDS HIP ADS	Компонент	$\mu_\alpha \cos\delta$	μ_δ	G	$G_B - G_R$	$G_B - G$	p_t	V_r	$T_{\rm eff}$, K $M_{T_{\rm eff}}$	Sp M_{Sp}
		мсд/год	мсд/год	mag	mag	mag	мсд	км/с	$M_\odot$	
08508+3504	A	−174.649	114.396	7.41	0.7521	0.3141	18.114	4.91	5923.27	F8
43426		±0.076	0.050				0.051	0.15	1.1	1.15
7034	B	−170.874	113.993	7.48	0.7577	0.3151	18.028	5.65	5993.60	
		±0.076	0.052				0.051	0.15	1.1	
	C	−174.005	115.369	11.69	1.8856	0.9447	18.210	6.06	4162.64	
		±0.064	0.043				0.041	0.65	0.63	
09572+4554	A	−24.808	−85.688	8.71	0.7532	0.3147	13.923	12.32	5930.00	G0
48804		±0.067	0.091				0.052	0.23	1.1	1.05
7588	B	−28.623	−83.015	9.51	0.9071	0.3837	13.948	11.15	5501.00	
		±0.092	0.136				0.079	0.30	0.9	
12281+4448	A	−182.130	−4.686	7.28	0.7080	0.2996	21.951	−2.21	6160.00	F9
60831/32		±0.039	0.053				0.039	0.18	1.2	1.18
8561	B	−180.395	00.440	7.86	0.8222	0.3519	21.937	−1.91	5765.50	
		±0.047	0.057				0.043	0.19	1.0	
13540+3249	A	108.707	42.031	8.44	0.6995	0.2862	13.712	4.82	6019.00	F8
67871		±0.039	0.049				0.041	0.18	1.14	1.15
9048	B	108.899	44.651	8.79	0.7394	0.3039	13.732	4.51	5949.35	
		±0.034	0.042				0.037	0.15	1.11	
14051+4913	A	−8.471	−8.037	11.69	0.9461	0.4013	5.254	−12.70	5382.33	K4/5
–		±0.038	0.036				0.025	1.07	0.87	0.7
–	B	−7.344	−7.608	11.74	0.9579	0.4087	5.226	−11.35	5374.50	
		± 0.038	0.036				0.024	0.57	0.87	
14421+6116	A	+74.071	−30.226	6.17	0.5256	0.2229	24.248	−5.76	6722.00	F4
71876		±0.067	0.052				0.027	0.40	1.4	1.4
9357	B	+69.194	−34.868	9.09	1.0957	0.4526	24.372	−7.59	5012.01	
		±0.093	0.065				0.034	0.34	0.8	

Примечание. Спектральные классы взяты из каталога WDS, массы M_{Sp} оценены, согласно (Аллен, 1999), массы $M_{T_{\rm eff}}$ — согласно монографии Агекяна (1981).

пространственным направлением на спутник и его проекцией на картинную плоскость, как это было предложено в работе (Киселев, Романенко, 1996). Этот параметр также определяется по наилучшему согласию со всеми наблюдениями.

В табл. 3 приведены элементы орбит, соответствующие углы β, сумма масс $\sum M$, среднеквадратичные невязки (σ_ρ и σ_τ), полученные по всем наблюдениям с равными весами, которые характеризуют качество исходного ряда, и значения функции S, которые характеризуют согласованность элементов орбиты между собой и с избранными наблюдениями.

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 некоторых случаях, если формально лучшему решению соответствует масса, отличающаяся от первоначально заданной, но очевидное улучшение не заметно, в таблице приводим также орбиту, соответствующую первоначальной массе.

Таблица 2. Исходные параметры для определения орбиты методом ПВД на основе данных Gaia DR2

WDS		$\rho, ''$	$\theta, ^\circ$	μ, мсд/год	$\psi, ^\circ$	p_t, мсд	ΔV_r, км/с	$\sum M, M_\odot$
08508	AB	3.48668	278.63840	3.80	96.1	18.07	0.74	2.2
+3504		±.00005	.00059	.11	1.1	.07	.21	
	AB-C	49.49751	11.73928	1.71	313.4	18.16	0.78	2.83
		±.00004	.00006	.10	3.2	.08	.82	
09572		4.49435	250.24630	4.66	305.0	13.93	−1.17	2.0
+4554		±.00006	.00118	.13	1.8	.10	.38	
12281		9.70840	156.99340	5.41	18.7	21.94	0.30	2.2
+4448		±.00004	.00015	.08	0.7	.06	.26	
13540		6.67875	327.5828	2.63	4.2	13.72	−0.31	2.25
+3249		±.00003	.0003	.06	1.1	.06	.29	
14051		4.62854	84.59223	1.21	69.2	5.239	1.35	1.74
+4913		±.00002	.00032	.05	2.4	.034	1.21	
14421		4.19825	314.4948	6.73	226.4	24.31	−1.83	2.2
+6116		±.00004	.0005	.10	0.8	.04	.52	

Ошибки каждого орбитального параметра определяются максимальным суммарным влиянием ошибок всех исходных данных следующим образом. Пусть p_i, $i = 1, ..., 7$ — искомые орбитальные элементы. Шесть исходных данных d_j (ПВД, параллакс и относительная лучевая скорость) независимы и имеют конкретные ошибки наблюдений. Седьмым исходным параметром мы считаем угол β, который определяется по сходимости со всем рядом наблюдений и является аналогом радиуса кривизны. Сумма масс компонентов является и исходным, и искомым (уточняемым) параметром. Мы не знаем ее ошибку, и она связана с параллаксом функциональной зависимостью, поэтому мы ее фиксируем. Исходные данные по очереди изменяем на величину ошибки в обе стороны и вычисляем максимальный разброс — разность между полученными значениями $\Delta p_{i,j}$, $j = 1, ..., 7$. Ошибка каждого элемента $\varepsilon_{p_i} = (\sum(\Delta p_{i,j})^2)^{1/2}$.

В табл. 4 — список звезд, у которых минимальная динамическая масса, вычисленная по формуле (2), превосходит ожидаемую. Этот список составлен из исходной выборки, включающей 62 звезды, без ограничения параллакса. Ошибки динамических масс определяются ошибками исходных данных, по которым они вычислены. Так как параллаксы компонентов близкие, мы считаем, что это физические пары. Причиной расхождения масс могут быть ошибочные данные (параллакс, скорости, ожидаемая масса) или наличие спутника в системе, о чем также свидетельствует большая ошибка лучевой скорости. Если в пределах неопределенности $M_{\rm dyn} \approx \sum M$, то, возможно, орбита близка к параболической. Все эти вопросы требуют дополнительного исследования. Для тех звезд, у которых пулковский ряд фотографических наблюдений больше 20 лет, мы приводим для сравнения соответствующие ПВД на средний момент короткой дуги пулковских наблюдений. Отмечены четыре звезды, у которых обнаружены спутники, и они включены в каталог кратных звезд MSC (Токовинин, 2018). Если период внутренней орбиты мал по сравнению с периодом наблюдений Gaia (примерно 2 года), ПВД Gaia незначительно отличаются от пулковских, отражающих движение внешней пары (WDS 06482+5542, внутренний период 4 дня). Значительное расхождение обнаружено у WDS 17419+7209, для которой внутренний период 18 лет.

Особенности каждой исследованной звезды описаны в комментариях. Сравнение орбит с наблюдениями отражено графически.

КОММЕНТАРИИ

ADS 7034 = WDS 08508+3504 = HIP 43426

Это физически тройная звезда. Внутренняя пара AB была открыта В. Струве в 1821 г., имеется 14 фотографических наблюдений 1962–1996 гг., 43 ПЗС-наблюдения 2004–2014 гг., выполненных на пулковском 26-дюймовом рефракторе, и 144 наблюдения в каталоге WDS (Мейсон и др., версия 2016 г.). Компонент C в Пулково не наблюдался в связи с его низкой светимостью, в каталоге WDS

Таблица 3. Элементы орбит

WDS		β, °	a, ″	a, а.е.	P, год	e	i, °	ω, °	Ω, °	T_0, год	σ_ρ, мсд σ_τ, мсд	$\sum M, M_\odot$ S, ″
08508	AB	+21	2.0	111	804	0.89	87.7	196.3	277.8	2337	82.2	2.2
+3504		± 2	.2	11	178	.07	0.6	14.5	.9	106	40.0	.03
	AB-C	$\Delta V_r = 0.78$ км/с										
		−63	1445	79578	1.3×10^7	.96	105	17	341	-1.3×10^7	–	2.83
		−18	48.1	2651	8.1×10^4	.08	114	148	4	-4.2×10^4	–	–
		0	43.9	2421	7.0×10^4	.29	116	230	12	-1.8×10^4	–	–
	AB-C	$\Delta V_r = 0.0$ км/с										
		−83	1825	100508	1.9×10^7	.78	96	265	313	-3.2×10^4	–	2.83
		−78	248.5	13686	9.5×10^5	.12	100	201	313	-1.6×10^5	–	–
		−45	41.3	2276	6.4×10^4	.74	130	120	313	-2.3×10^4	–	–
09572		+8	3.53	253	2848	0.46	45	21	78	1163	95.3	2.0
+4554		±9	.52	37	640	.16	9	24	8	180	48.9	.22
12281		+25	6.6	299	3477	0.76	134	204	184	3193	174.7	2.2
+4448		±5	.4	20	344	.08	10	10	10	185	88.2	.02
		−25	6.6	299	3477	0.87	154	63	51	3017	159.5	2.2
		±5	.4	20	344	.02	10	34	39	92	90.4	.01
13540		0	3.6	265	2449	0.93	30	5	148	1311	93.9	3.1
+3249		±6	.1	8	117	.05	28	26	24	72	74.5	.18
		0	3.8	274	3026	0.91	30	7	148	1000	95.8	2.25
		±6	.2	12	189	.07	28	18	23	101	75.0	.38
14051	1	0	16.5	3142	133535	0.83	102	276	84.6	−298	–	1.74
+4913	2	0	3.5	676	13316	0.96	154	192	84.6	−76	–	–
14421		−5	2.6	109	736	0.59	125.6	9.7	138.1	2406	68.6	2.4
+6116		±5	.3	14	143	.17	9.4	12.0	4.9	56	67.0	.08
Изм-1		–	4.6	190	1419	0.71	116	82	162	1731	68.8	3.4
			±1.7	70	618	0.22	9	17	22	41	55.4	–
Изм-2		–	7.5	309	1555	0.67	99	250	128	2134	78.6	12
			±3.7	152	598	0.28	6	21	6	58	56.1	–

имеется первое наблюдение внешней пары 1941 г., затем несколько наблюдений 1999–2005 гг. с большим разбросом; в данной работе они не используются.

Даже движение внутренней пары AB чрезвычайно медленное (табл. 2). Разброс наблюдений из WDS настолько велик, что для выбора окончательного решения мы предварительно получили контрольный ряд удаленных наблюдений, состоящий из ПВД (ρ и θ), вычисленных на интервалах 40 лет до 1960 г., к ним были добавлены первые три наблюдения из WDS и ПВД, полученные по однородным рядам пулковских наблюдений на моменты 1990.0 (фото) и 2006 (ПЗС).

На рис. 1 показано сравнение орбиты с наблюдениями. Заметно небольшое расхождение в движении по позиционному углу между нашими ПЗС-наблюдениями и Gaia DR2, но нет расхождений с нашими фотографическими наблюдениями и с наблюдением из каталога Hipparcos. Поэтому мы получили орбиту на основе ПВД Gaia DR2. На фоне огромного разброса общемировых наблюдений наш однородный ряд наблюдений хорошо согласуется с эфемеридами. Среднеквадратические

Таблица 4. Список звезд, у которых минимальная динамическая масса $M_{\rm dyn}$ превосходит ожидаемую сумму масс компонентов $M_{T\rm eff}$

WDS	t Δt, год	ρ $''$	θ $^\circ$	μ мсд/год	ψ $^\circ$	ΔV_r км/с	p_t мсд	$M_{\rm dyn}$ $M_\odot$	$M_{T\rm eff}$ $M_\odot$
03061+5303	2015.5	4.01566	84.18008	9.75	8.4	−.94	13.516	2.1	1.7
		±.00003	.00053	.12	.6	.90	.027	.3	
06482 + 5542*	2015.5	4.51625	76.42410	5.61	277.3	−11.42	23.308	14.4	2.6
$P = 4.2$ дня		.00003	.00051	.08	.7	3.48	.030	8.7	
	1982.0	4.7223	77.2976	5.13	276.0				
	42	.0067	.0289	.56	2.9				
07049+7240	2015.5	3.62581	194.51700	4.22	247.0	2.75	10.194	2.3	1.8
		.00060	.00574	.27	2.6	1.04	.369	1.2	
09381+6249	2015.5	9.04614	268.78240	6.07	226.4	−.67	10.059	4.4	1.7
		.00007	.00106	.25	2.4	.64	.100	.6	
	1979.0	8.9285	268.8742	3.78	253.9				
	35	.0035	.0245	.45	6.4				
11520+7856	2015.5	10.46259	90.21000	4.69	338.3	.82	7.518	7.4	2.0
		.00002	.00019	.07	1.0	.64	.018	.8	
11536+4255	2015.5	8.32248	318.08380	2.81	125.3	−3.32	7.698	8.5	2.2
		.00005	.00037	.10	2.1	.85	.038	3.4	
12147+5853	2015.5	3.01079	188.78550	4.20	202.1	2.04	4.457	9.2	1.7
		.00002	.00043	.05	.8	1.02	.019	1.6	
	1985.0	2.861	188.312	2.94	293.43				
	30	.017	.113	1.11	58.17				
12308+3640	2015.5	5.18992	172.44510	2.75	47.6	3.84	6.594	8.3	1.8
		.00014	.00288	.38	7.6	1.71	.141	5.8	
13007+7343	2015.5	4.61369	90.70668	4.36	257.9	17.41	7.274	111.2	1.9
		.00007	.00126	.26	2.8	7.57	.066	94.2	
	1983.0	4.7863	90.4728	2.38	251.1				
	42	.0099	.0396	.78	9.1				
15269+4610	2015.5	2.90784	335.65260	1.46	115.0	3.91	6.390	4.2	1.8
		.00003	.00062	.07	2.9	1.84	.019	3.7	
16229+3815	2015.5	5.25930	48.78046	5.90	129.5	−7.50	3.674	92.2	1.7
		.00004	.00043	.08	.8	.87	.024	10.7	

Таблица 4. Окончание

WDS	t Δt, год	ρ $''$	θ $^\circ$	μ мсд/год	ψ $^\circ$	ΔV_r км/с	p_t мсд	$M_{\rm dyn}$ $M_\odot$	$M_{T\rm eff}$ $M_\odot$
16242+3702*	2015.5	8.23187	340.54410	3.09	206.5	−5.79	10.761	15.2	2.4
$P = 21$ день		.00005	.00023	.09	1.5	4.14	.023	20.6	
	1980.0	8.2970	341.1837	3.57	224.3				
	44	.0019	.0168	.18	2.6				
17419+7209*	2015.5	30.08193	16.50098	45.32	262.7	−7.38	44.020	30.2	2.6
$P = 18$ лет**		.00041	.00047	.80	1.0	1.02	.225	5.8	
	1993.0	30.0796	15.5232	11.27	129.2				
	26	.0029	.0156	1.07	3.0				
19384+5211	2015.5	8.27004	185.32520	1.08	87.7	−4.18	5.992	14.2	2.4
		.00004	.00022	.09	4.3	.62	.023	4.0	
21221+1948*	2015.5	36.24198	311.48250	19.64	330.5	−1.93	19.984	26.0	1.6
$P = 3$ года		.00022	.00035	.55	1.5	3.24	.148	12.9	
21312+8652	2015.5	14.44307	157.48980	9.48	331.6	−4.79	14.006	19.3	1.7
		.00005	.00009	.09	.6	.58	.028	3.2	
22583+5831	2015.5	3.14009	279.29700	.07	213.0	3.07	2.335	7.2	2.9
		.00003	.00065	.07	57.7	6.05	.021	28.2	

* Звезды, входящие в каталог MSC, P — период внутренней орбиты.
** Ранее был заподозрен спутник с периодом $P \approx 40$ лет (Киселев и др., 2009).

невязки пулковских фотографических и ПЗС наблюдений с учетом веса, согласно известной ошибке каждого наблюдения, равны 11.6 мсд в радиальном направлении и 5.6 мсд в тангенциальном направлении, равновесные невязки всех наблюдений 1821–2014 гг. представлены в табл. 3.

Рассмотрим внешнюю пару. По данным Gaia DR2 вычислены параметры видимого движения компонента C относительно центра масс внутренней подсистемы ($M_A = M_B$). Получено семейство эллиптических орбит при $-64^\circ \le \beta \le +64^\circ$. Используя естественные ограничения на значения большой полуоси и эксцентриситета внешней орбиты, мы определили области устойчивости тройной системы, как это сделано в работе (Матвиенко и др., 2015).

Так как апоцентрическое расстояние не должно превосходить приливный радиус $R_{\rm tid}$ системы в поле Галактики, получаем

$$\lambda_1 = a_{\rm out}(1 + e_{\rm out}) < R_{\rm tid} \approx \approx R_\circ (M_{A+B}/3.5M_G)^{1/3}. \quad (3)$$

Здесь $R_\circ$ — расстояние от звезды до центра Галактики, M_{A+B} — масса внутренней пары, M_G — масса Галактики в пределах радиуса $R_\circ$.

Так как все исследуемые звезды сравнительно близкие к Солнцу, $R_\circ \approx 8$ кпк, $M_G \approx 2 \times 10^{11} M_\odot$, $\lambda_1 < R_{\rm tid} \approx 2.44 \times 10^5$ а.е.

Условие устойчивости тройной системы накладывает ограничение на отношение больших полуосей внешней и внутренней двойных. Мы использовали критерий из книги Аарсета (2003) как один из наиболее надежных (см. Жучков и др., 2010). Тогда

$$\lambda_2 = a_{\rm out}(1 - e_{\rm out})^{1.2}(1 + e_{\rm out})^{-0.4} > > 2.8 a_{\rm in}(M_{A+B+C}/M_{A+B})^{0.4}. \quad (4)$$

В нашем случае $\lambda_2 > 343.7$ а.е.

Учитывая большую ошибку лучевой скорости, мы вычислили также семейство орбит при минимальном значении $|\Delta V_r| = 0$ км/с ($-84^\circ \le \beta \le +$ $+84^\circ$).

Область устойчивых решений представлена на рис. 2. Сравнивая параллаксы звезд (табл. 1), можно заметить, что компонент C ближе, чем внутренняя пара AB, следовательно, $\beta \le 0^\circ$. В табл. 3 представлены орбиты, соответствующие устойчивым решениям при экстремальных условиях, обозначенных на рис. 2а.

Орбиты не компланарны, углы между векторами угловых моментов орбит в зависимости от β пред-

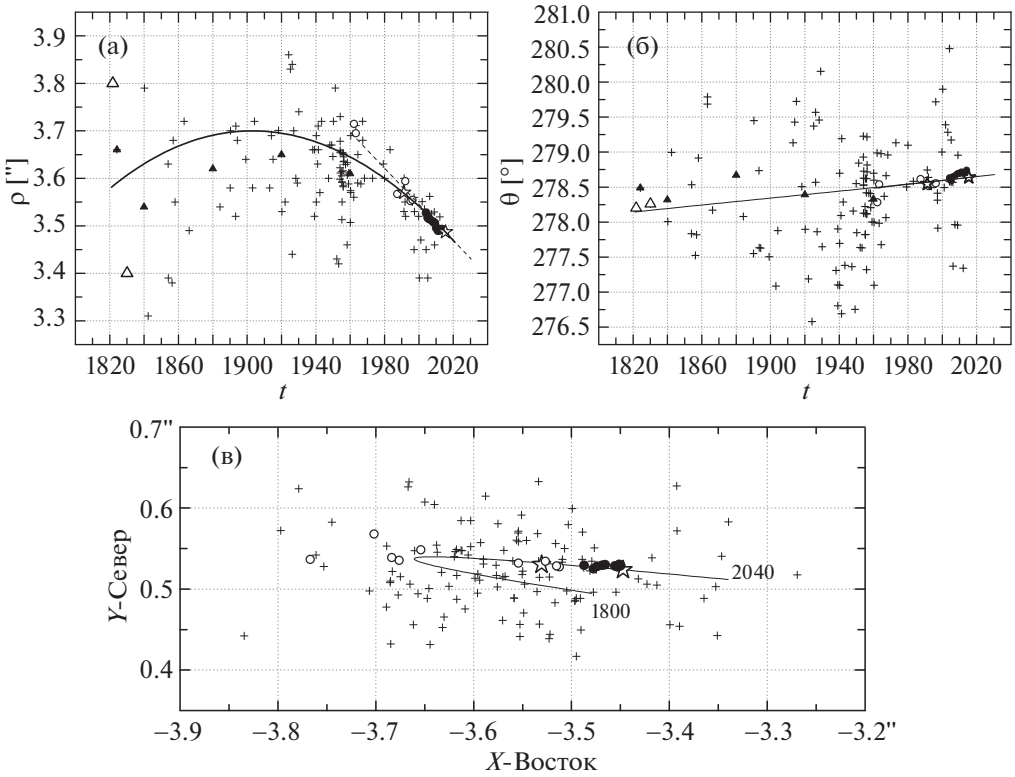

Рис. 1. WDS 08508+3504 AB. Сравнение орбит с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$, (в) — фрагмент орбиты в картинной плоскости. Обозначения: ПЗС-наблюдения — черные кружки, фотографические наблюдения — открытые кружки, наблюдения из WDS — крестики, наблюдения Gaia и Hipparcos — открытые звездочки, вспомогательный ряд из WDS — черные треугольники, отдельно выделены наблюдения Струве (открытые треугольники). Сплошная линия — вычисленная орбита, пунктирная линия — движение Gaia DR2 на момент 2015.5 (на графике $\theta(t)$ она сливается с эфемеридой орбиты).

ставлены на рис. 3. Орбитальный период внешней пары более 64 000 лет.

По данным Gaia DR2 ($\Delta V_r = 0.78$ км/с), практически для всех орбит семейства система устойчива, для $\Delta V_r = 0.0$ км/с распад может произойти при $|\beta| \leq 43°$, но из-за того, что лучевая скорость определена неуверенно, не исключена возможность гиперболической орбиты, если $\Delta V_r > 1.28$ км/с, что согласуется с наблюдением в пределах ошибки ($\Delta V_r = 0.78 \pm 0.82$ км/с).

ADS 7588 = WDS 09572+4554 = HIP 48804

Звезда была открыта В. Струве в 1828 г., в каталоге WDS есть данные до 2019 г., в том числе о 12 пулковских среднегодовых положениях (14 фотопластинок с 1971 по 1980 г. и 44 ПЗС-серии за 2004–2014 гг.). После отсева 9 грубых промахов (согласно критерию 3σ) осталось 50 наблюдений. Для выбора орбиты в качестве контрольного ряда используются оставшиеся после отбраковки наблюдения до 1991 г., наблюдение Hipparcos и вычисленные параметры движения по однородному пулковскому ПЗС-ряду на эпоху 2009.2, которые не противоречат относительному движению Gaia DR2.

С первоначальной суммарной массой $M = 2.0\ M_\odot$ орбита, удовлетворяющая наблюдениям, соответствует минимальному $S = 0.22''$ и $\beta = +8 \pm 9°$. С увеличением массы значение S уменьшается несущественно. На рис. 4 показаны сравнение наблюдений с эфемеридами и зависимость искомой величины S от β для двух вариантов массы. В табл. 3 — выбранное решение для массы $M = 2.0\ M_\odot$.

ADS 8561 = WDS 12281+4448 = HIP 60831/32

Эта относительно близкая, но широкая пара была открыта В. Струве в 1832 г., в каталоге WDS в наличии 99 наблюдений до 2012 г., в том числе пулковский ряд наблюдений с 1971 по 2007 г. (25 фотопластинок) и 8 ПЗС-серий за 2003 г. Общемировые наблюдения имеют довольно ощутимый разброс, составляющий в среднем $0.5''$ по ρ и $3°$ по θ. После отсева грубых промахов

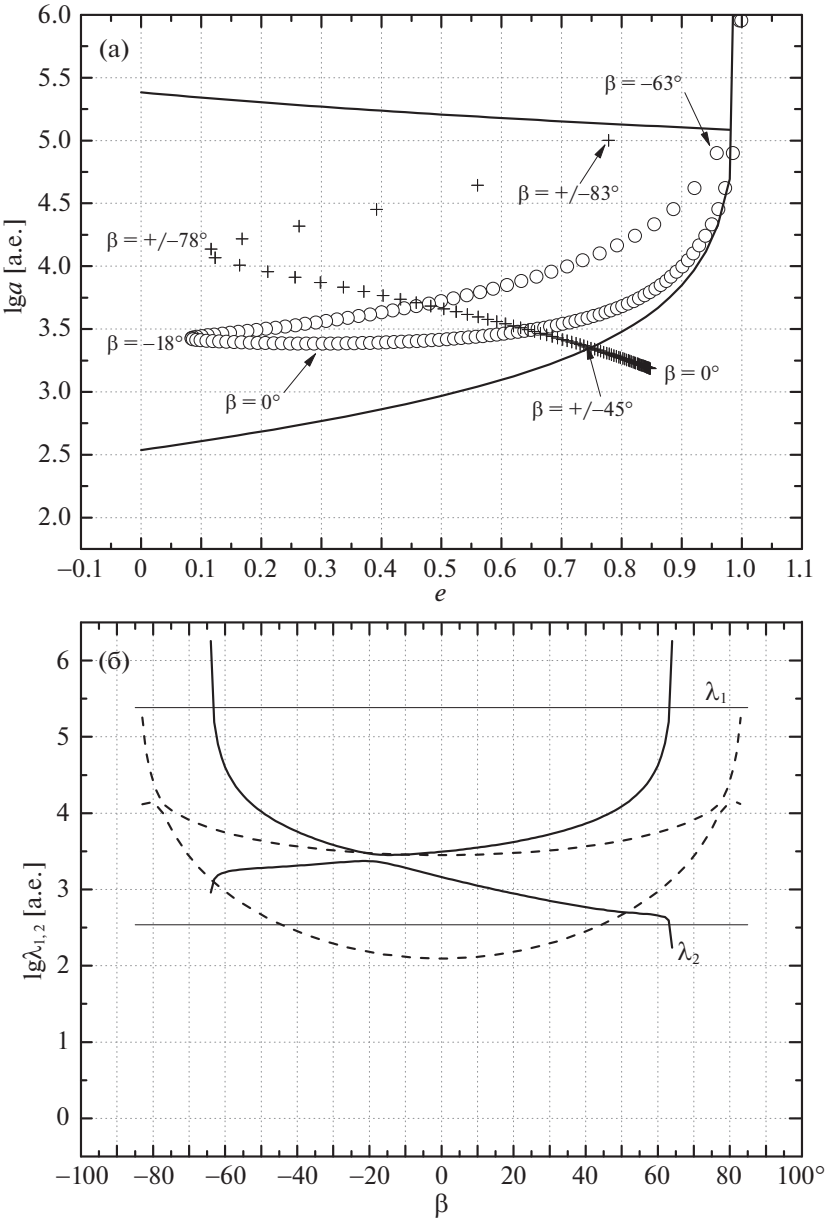

Рис. 2. Границы области устойчивости тройной системы WDS 08508+3504 AB-C: (а) — зависимость большой полуоси от эксцентриситета. Верхняя линия обозначает границу, согласно уравнению (3), нижняя — согласно уравнению (4). Орбиты, соответствующие $\Delta V_r = 0.78$ км/с — кружки, $\Delta V_r = 0.0$ км/с — крестики; (б) — параметры устойчивости λ_1 (верхние кривые) и λ_2 (нижние кривые) в зависимости от угла β. Условию $\Delta V_r = 0.78$ км/с соответствуют сплошные линии, $\Delta V_r = 0.0$ км/с — пунктиры. Горизонтальные линии соответствуют граничным значениям λ.

осталось 86 наблюдений, которые представлены на рис. 5. Для выбора окончательного решения мы предварительно получили ряд контрольных наблюдений, наиболее равномерно распределенных по всей наблюденной дуге, близкие к середине полосы наблюдений, начиная с первого наблюдения В. Струве, и добавили ПВД, полученные по однородному фотографическому ряду пулковских наблюдений на момент 1989.3.

Наилучшая орбита с массой $M = 2.2\ M_\odot$ соответствует $\beta = +25°$ и $\beta = -25°$. Дуга наблюдений мала (3.6°), поэтому мы получили два решения, которые соответствуют симметричному положению компонента B относительно картинной плоскости. Эта неопределенность заложена в идеологии метода ПВД. Зависимость $S(\beta)$ представлена на рис. 5г. Анализируя данные Gaia DR2 о параллаксах компонентов, можно предположить, что $\beta \approx 0°$. Однако это решение хуже согласуется с удаленными наблюдениями, и мы оставляем два решения (табл. 3, рис. 5).

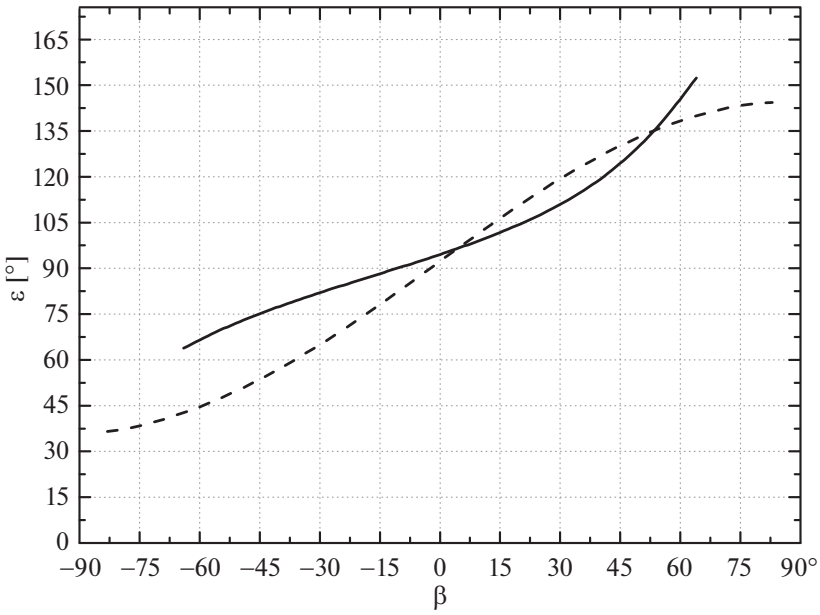

Рис. 3. WDS 08508+3504. Углы между векторами орбитальных моментов внутренней и внешней пары в зависимости от угла β. Условию $\Delta V_r = 0.78$ км/с соответствует сплошная линия, $\Delta V_r = 0.0$ км/с — пунктир.

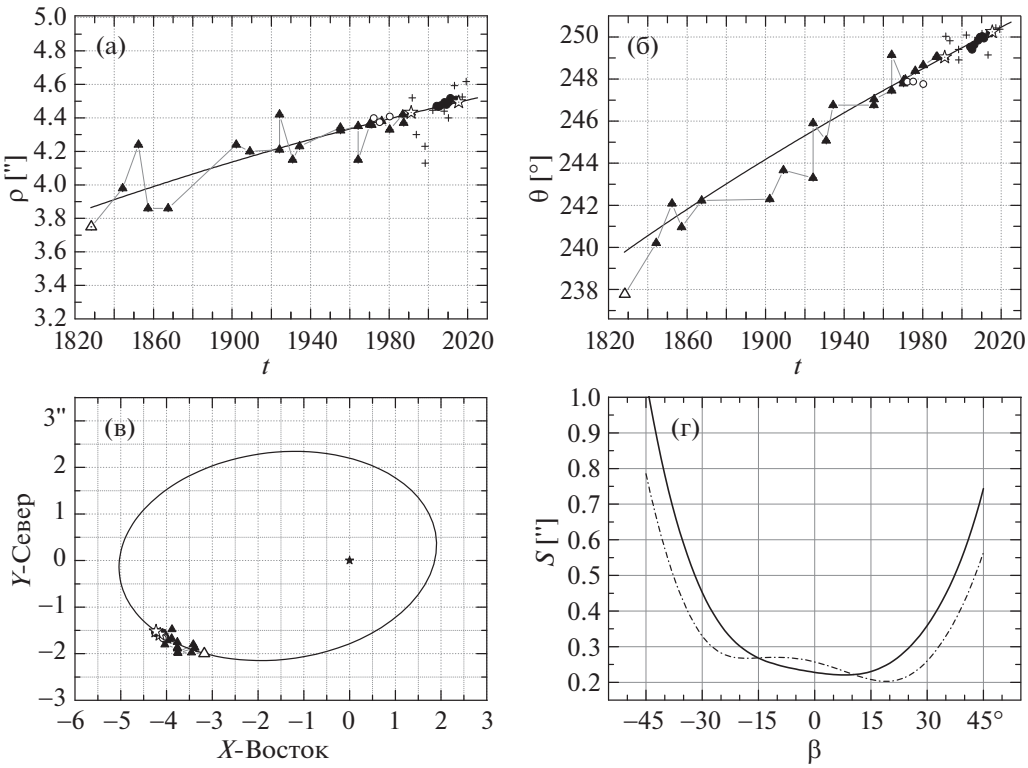

Рис. 4. WDS 09572+4554. Сравнение орбит с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$, (в) — орбита в картинной плоскости с массой 2.0 $M_\odot$, обозначения: открытый треугольник — наблюдение В. Струве, черная звездочка — компонент A, черные треугольники — контрольный ряд наблюдений из WDS, остальные обозначения см. на рис. 1, (г) — зависимость $S(\beta)$ для массы 2.0 $M_\odot$ (сплошная линия) и массы 2.5 $M_\odot$ (пунктир).

ADS 9048 = WDS 13540+3249 = HIP 67871

Первое наблюдение 1823 г. ненадежно, с 1831 г. (В. Струве) в каталоге WDS 65 наблюдений. Пулковский ряд с 1962 по 2005 г. (34 фотопластинки и 4 ПЗС-наблюдения 2003 г.) не противоречит относительному движению Gaia DR2, но заметна систематическая разность между Gaia DR2 и фотографическими наблюдениями: $\Delta\rho = +0.028''$.

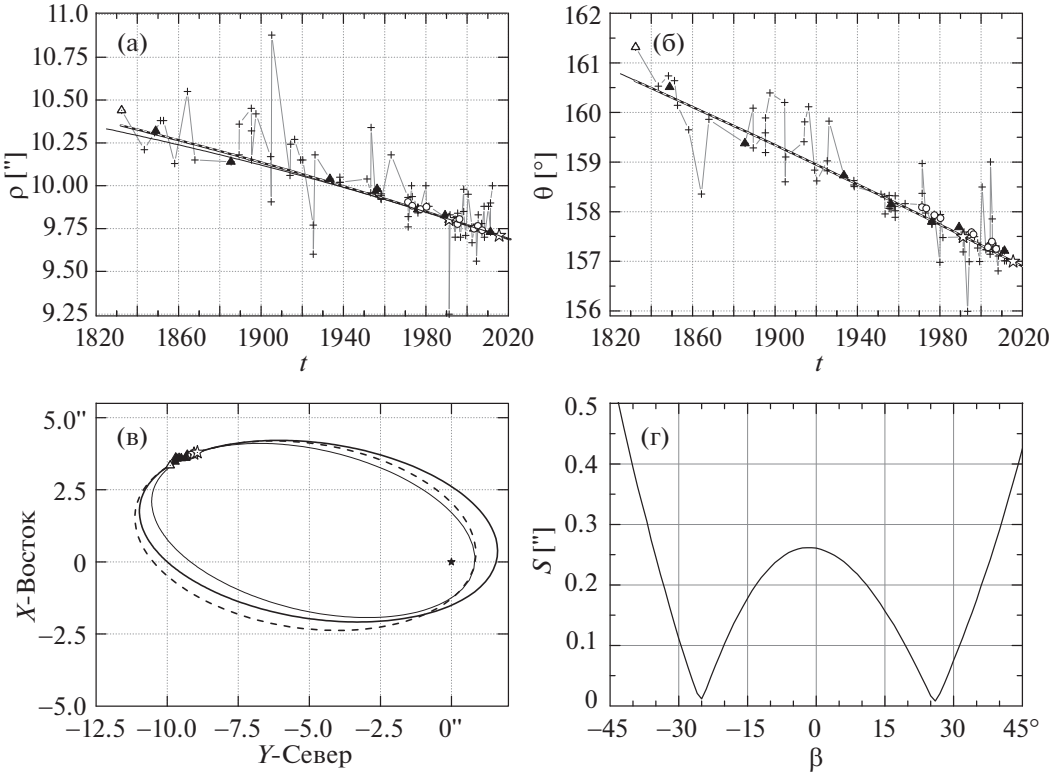

Рис. 5. WDS 12281+4448. Сравнение орбит с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$, (в) — орбита в картинной плоскости для $\beta = +25°$ (сплошная линия), $\beta = -25°$ (пунктир) и $\beta = 0°$ (тонкая сплошная линия), (г) — зависимость $S(\beta)$. Обозначения см. на рис. 1 и на рис. 4.

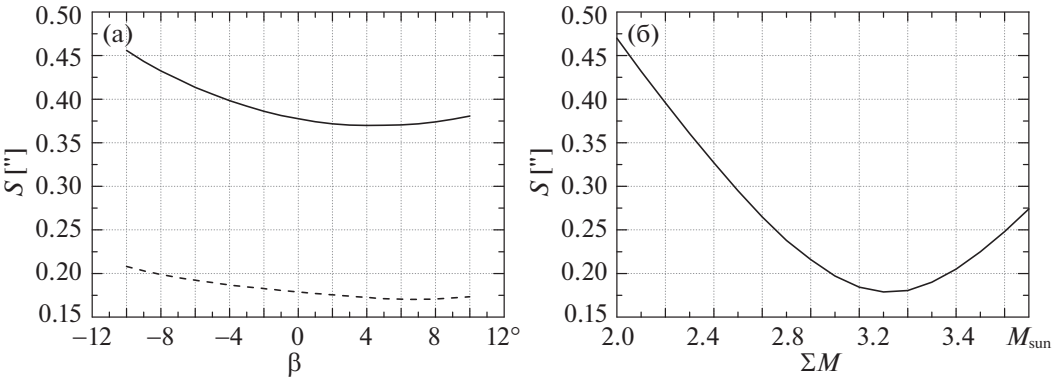

Рис. 6. WDS 13540+3249. Поиск решения: (а) — зависимость $S(\beta)$ при фиксированной массе $M = 2.25\ M_\odot$ (сплошная линия) и $M = 3.1\ M_\odot$ (пунктир), (б) — зависимость $S(\sum M)$ при фиксированном $\beta = 0°$.

Для выбора орбиты используются наблюдения до 1960 г., наблюдение Hipparcos и вычисленные параметры движения по однородному пулковскому ряду на эпоху 1990.0 после учета поправки.

С ожидаемой суммарной массой $\sum M = 2.25\ M_\odot$ лучшее решение соответствует $\beta = +4 \pm 6°$ ($S = 0.38''$). Если учесть, что в пределах ошибок параллаксы компонентов равны, можно принять на момент 2015.5 $\beta = 0 \pm 6°$ и уточнять один параметр — сумму масс компонентов. Лучшее согласованное решение получается при $\sum M = 3.1 \pm 0.3\ M_\odot$ ($S = 0.18''$). Это существенно больше ожидаемого значения $\sum M = 2.25\ M_\odot$. Соответствующие зависимости представлены на рис. 6.

На рис. 7 — сравнение наблюдений с эфемеридами. Так как общая дуга мала, а разброс наблюдений большой, преимущество орбиты с большей массой определяется только первыми наблюдениями. Поэтому мы приводим оба решения.

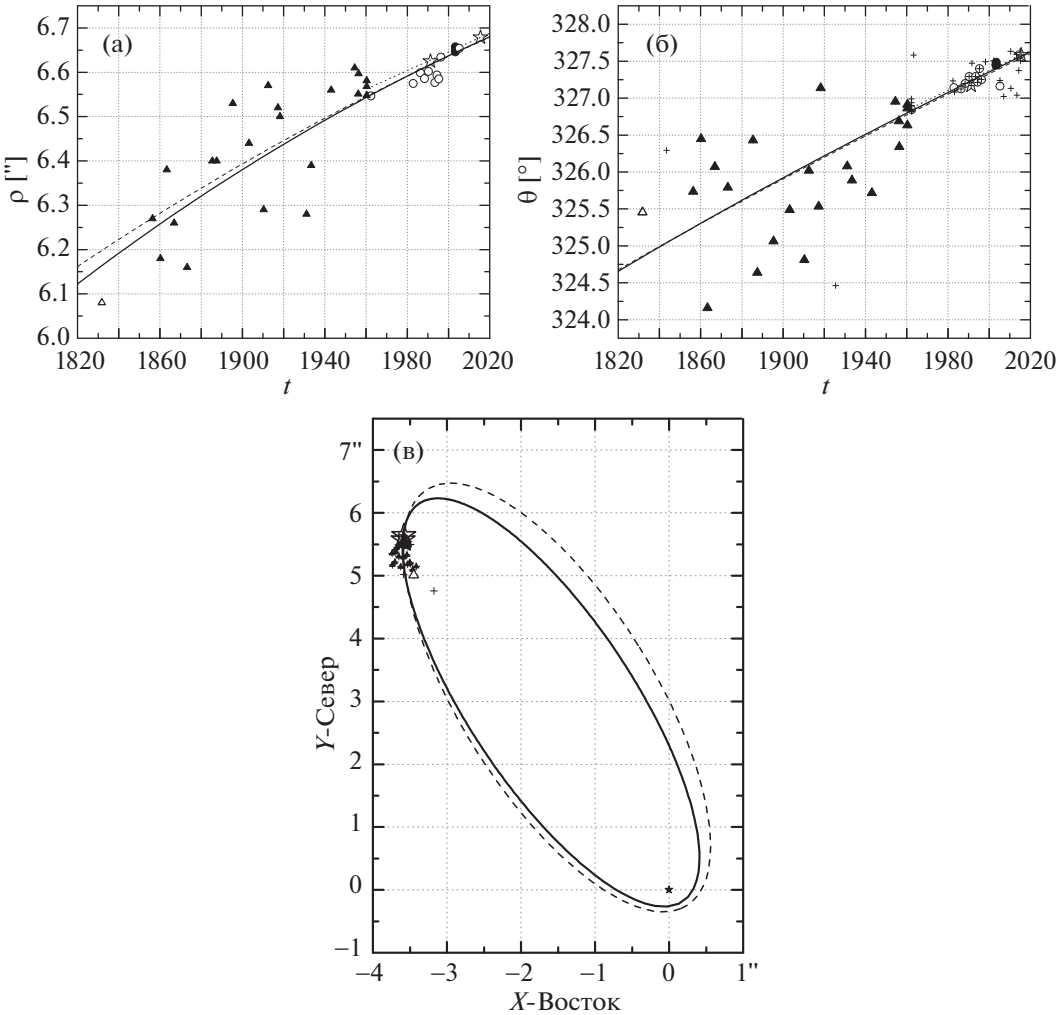

Рис. 7. WDS 13540+3249. Сравнение орбит с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$, (в) — орбита в картинной плоскости. Обозначения те же, что на рис. 1. Компонент A — черная звездочка, сплошная линия — орбита с массой 3.1 $M_\odot$, пунктирная линия — орбита с массой 2.25 $M_\odot$.

Обе орбиты имеют большой эксцентриситет. Так как относительная ошибка ΔV_r почти 100%, все угловые элементы получаются с большой ошибкой, но их значения для обеих орбит совпадают.

Если считать относительную лучевую скорость неизвестной, то лучшее решение соответствует $\Delta V_r = -1.9$ км/с ($M = 3.2\ M_\odot, S = 0.08''$), что маловероятно, так как наблюдаемая величина $\Delta V_r = -0.31 \pm .29$ км/с (табл. 2).

WDS 14051+4913

Это самая далекая звезда из всех исследованных нами. Всего в WDS 30 наблюдений, включая пулковские, причем первые 3 наблюдения 1902–1904 гг. сильно отличаются от последующих, начинающихся в 1969 г. Ряд наблюдений на 26-дюймовом рефракторе состоит из 22 фотопластинок 1969–1976 гг., из которых получено 7 среднегодовых положений. Такой короткий ряд наблюдений связан с тем, что относительное движение звезды очень мало, а параллакс (5.2 мсд) был определен только благодаря Gaia DR2.

Данная звезда интересна тем, что ее очень мало наблюдали, но относительное движение, полученное по Gaia DR2, хорошо согласуется с наблюдениями на Пулковском 26-дюймовом рефракторе (рис. 8). Поэтому мы сочли возможным получить семейство орбит по данным Gaia ($\Delta V_r = 1.35 \pm \pm 1.21$ км/с). В табл. 3 орбита 1 соответствует $\Delta V_r = 1.35$ км/с, $\beta = 0°$, $M_{A+B} = 1.74\ M_\odot$.

При $\Delta V_r \geq 1.52$ км/с орбита гиперболическая.

Мы также вычислили семейство орбит при минимальном значении $\Delta V_r = 0.14$ км/с. (решение 2 в табл. 3).

Оба семейства представлены на рис. 9. Минимальный период равен 1.3×10^4 лет. Характерно

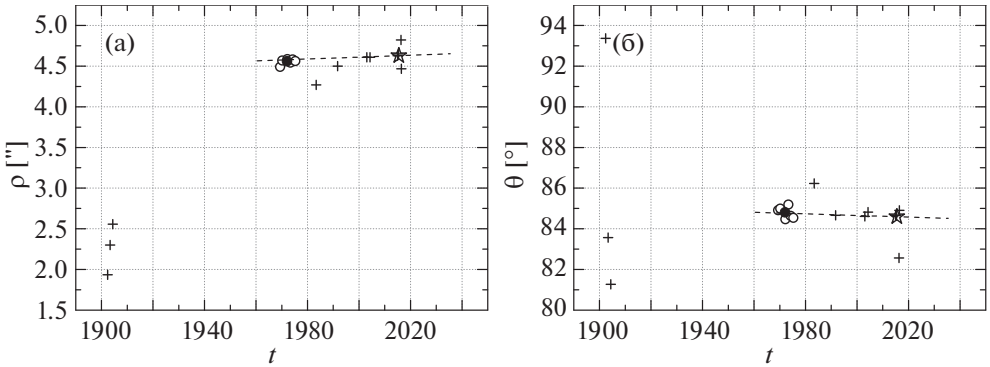

Рис. 8. WDS 14051+4913. Ряд наблюдений: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$. Обозначения те же, что на рис. 1. Черные кружки — положение на момент 1972.0, полученное по пулковским наблюдениям. Пунктирная линия — движение, согласно Gaia DR2.

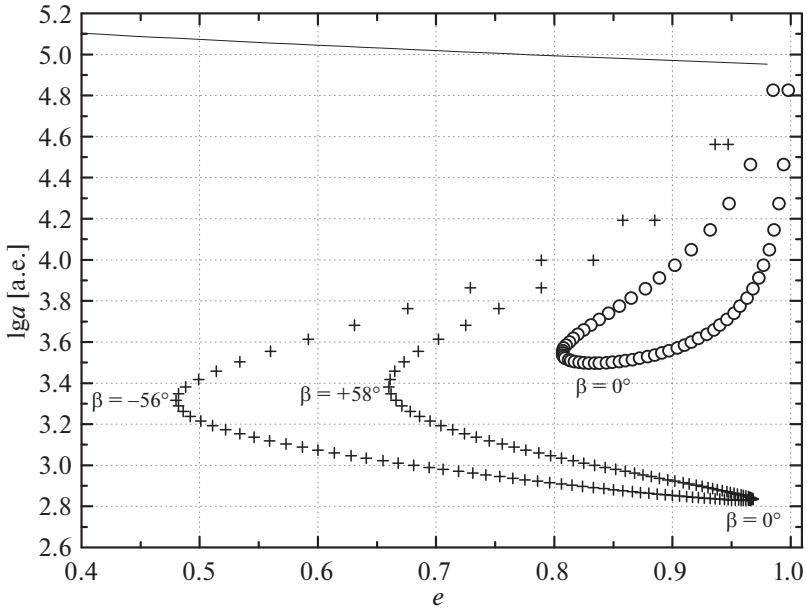

Рис. 9. Характеристика орбит WDS 14051+4913. Зависимость большой полуоси от эксцентриситета. Линия обозначает границу, согласно уравнению (3). Кружки — семейство, соответствующее $\Delta V_r = 1.35$ км/с, крестики — семейство, соответствующее $\Delta V_r = 0.14$ км/с.

то, что нет орбит с малым эксцентриситетом, и ни одна эллиптическая орбита не согласуется с первыми наблюдениями XX в., которые, скорее всего, ошибочные.

Как было отмечено выше (табл. 1), есть расхождение в оценках масс. Сумма масс, соответствующая спектральному классу, меньше минимальной динамической массы. Учитывая большую ошибку лучевой скорости компонента A, наиболее вероятный сценарий — присутствие дополнительного спутника. Подтверждением является сравнение ПВД (μ, ψ) Gaia с полученными по пулковскому ряду на средний момент 1972.0. Наш ряд слишком короткий для получения надежных параметров, но расхождение очевидно: $\mu_P = 10 \pm 3$ мсд/год ($\mu_G = 1.21 \pm 0.05$ мсд/год), $\psi_P = 43 \pm 18°$ ($\psi_G = 69 \pm 2°$). Тогда орбиту внешней пары можно определять только с учетом внутренней орбиты. Полученные методом ПВД орбиты можно считать только предварительными.

ADS 9357 = WDS 14421+6116 = HIP 71876

Звезда была открыта В. Струве в 1832 г., но наблюдалась немного (в WDS 45 наблюдений 1832–2012 гг.) и, в основном, микрометрически из-за большой разности звездных величин. После отсева грубых отскоков осталось 41 наблюдение, все наблюдения 1832–1991 гг. (Hipparcos) учитывались при выборе лучшего решения.

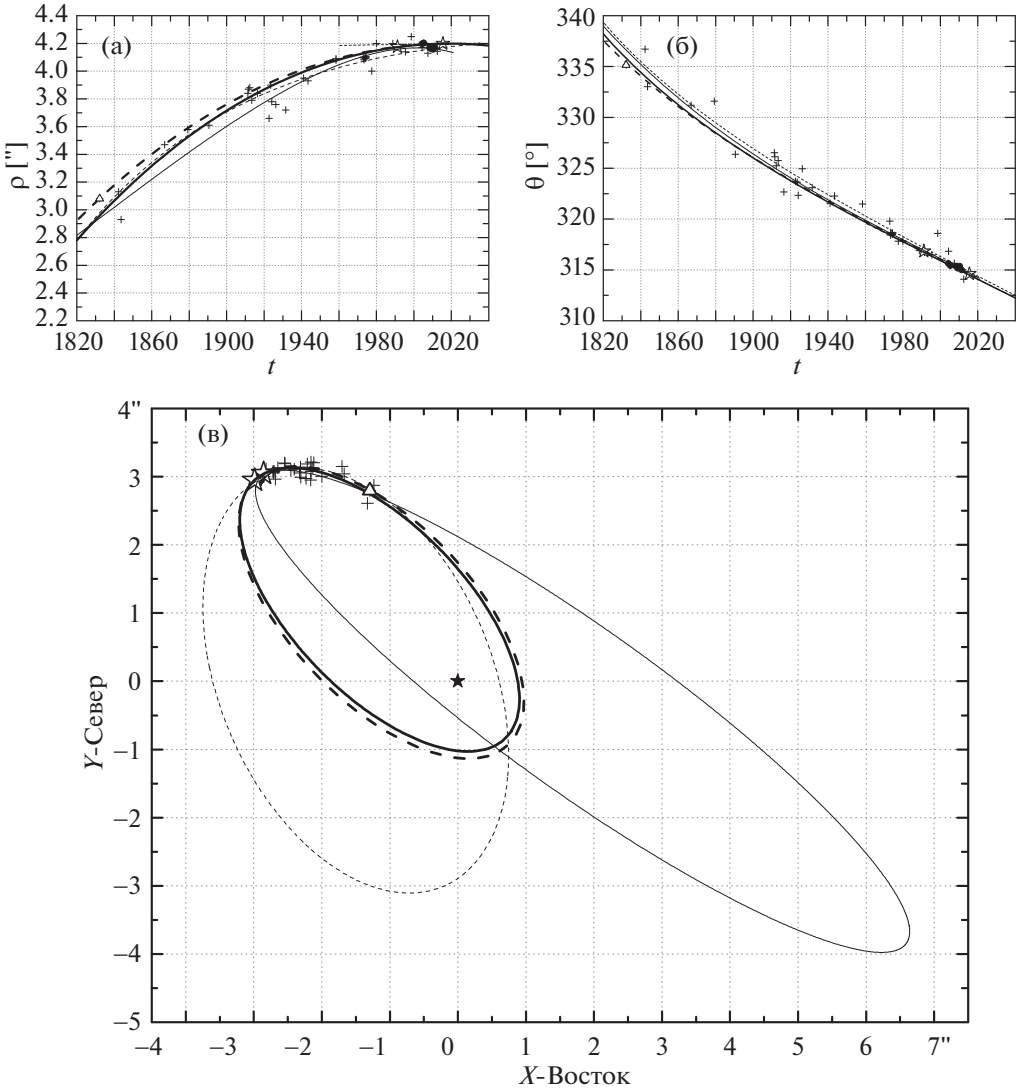

Рис. 10. WDS 14421+6116. Сравнение орбит с наблюдениями: (а) — $\rho(t)$, (б) — $\theta(t)$, (в) — орбита в картинной плоскости. Обозначения те же, что на рис. 1. Компонент A — черная звездочка, толстая сплошная линия — орбита с массой 2.4 $M_\odot$, толстая пунктирная линия — орбита с массой 2.2 $M_\odot$, тонкие линии — орбиты Измайлова: пунктир — без использования весов (1), сплошная — с весами (2).

Компонент A является переменной типа δ Щита. ПЗС-наблюдения в Пулково проводились в 2004–2005 гг., затем с 2008 г. — с другой матрицей, поэтому мы не можем доверять возмущению, которое заметно в этих наблюдениях на рис. 10а. То, что по ПВД Gaia DR2 (табл. 2) удалось получить орбиту, согласованную со всеми наблюдениями, скорее всего указавает на отсутствие долгопериодического спутника.

Лучшее решение соответствует $M_{A+B} = 2.4\ M_\odot$, $\beta = -5 \pm 5°$, $S = 0.081''$. С ожидаемой массой 2.2 $M_\odot$ лучшему решению соответствует $S = 0.18''$ (на рис. 10 эта орбита обозначена пунктиром). На графике $\rho(t)$ видно, что она хуже согласуется с наблюдениями. Превышение массы незначительное (на уровне ошибки), но, учитывая переменность компонента A, не исключена вероятность того, что в системе может быть короткопериодический спутник, движение которого не повлияло на ПВД Gaia DR2.

Наша орбита сравнивается с орбитами, опубликованными в работе Измайлова (2019), в которой определены орбиты более 400 звезд, процесс формализован, используются уравнения Тиле–Иннеса для определения множества орбит каждой звезды, а окончательное средневзвешенное решение зависит от весов, назначенных наблюдениям. Мы приводим две опубликованные орбиты: 1 — все наблюдения равновесные, 2 — с весами.

Как и следовало ожидать, орбита 1 Измайлова

несколько лучше, чем наша, согласуется со всеми наблюдениями, но расходится с другими данными: эфемерида ΔV_r на момент 2015.5 равна $-$ -2.76 км/с, что заметно отличается от наблюдения Gaia DR2 ($\Delta V_r = -1.83 \pm 0.52$ км/с); если принять параллакс Gaia, то сумма масс компонентов равна 3.4 $M_\odot$. Введение весов (орбита 2) не улучшили результат: на момент 2015.5 $\Delta V_r = -8.1$ км/с, сумма масс компонентов равна 12 $M_\odot$.

Расхождение в эфемеридах орбит проявится в ближайшие 20 лет, но то, что наша орбита хорошо согласуется с удаленными наблюдениями, вселяет уверенность, что ее эфемериды можно будет использовать в течение длительного времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель данной работы — показать ценность прямых динамических методов определения орбит медленно движущихся двойных звезд с периодом обращения несколько сотен и тысяч лет, каким является метод ПВД в эпоху Gaia DR2. Исследовано 6 звезд, для пяти из них орбиты получены впервые, для звезды ADS 9357 орбита уже была получена Измайловым (2019). На ее примере мы сравниваем наш штучный подход к каждой звезде с формальным современным подходом к данной задаче, реализованным в работе Измайлова. Не умаляя очевидных достоинств данной работы, позволяющей на большом материале статистически исследовать распределение эксцентриситетов и периодов орбит, мы доказываем то, что наша орбита более надежна, так как не противоречит наблюдениям лучевой скорости и оценке масс компонентов, и ее эфемериды удовлетворяют 200-летнему ряду наблюдений в прошлом, которые служат только для контроля. Не надо отказываться от возможности определять орбиты индивидуальных звезд там, где это возможно.

Для определения орбит с периодом сотни и тысячи лет необходимо использовать все, что известно об объекте. Применяя метод Тиле—Иннеса к коротким дугам, можно получить формальные решения для всех звезд, решая плохо обусловленные системы, но при этом не учитываются те дополнительные возможности, которые дают современные высокоточные космические наблюдения. Не учитывается скорость в картинной плоскости и по лучу зрения.

Не случайно двойная звезда ADS 7034 AB, орбита которой определена в данной работе, не исследуется в работе (Измайлов, 2019). Звезда с большим эксцентриситетом в течение 200 лет наблюдается вблизи апоастра, большой разброс разнородных наблюдений определяется систематическими ошибками телескопов. Только движение, полученное по однородным высокоточным наблюдениям Gaia DR2, позволило определить ее орбиту, и эта орбита хорошо согласована с однородным пулковским рядом. Получив по наблюдению Gaia DR2 семейство орбит внешней пары ADS 7034 AB-C, мы определили область устойчивости тройной системы.

Возможно, в скором будущем будет разработан новый формальный метод, использующий данные о пространственном ускорении движения звезд, но в настоящее время метод ПВД позволяет определить орбиты в тех случаях, где невозможно использовать формальные методы, и весь накопленный опыт использования данного метода позволит увеличить число надежных долгопериодических орбит, эфемериды которых можно будет использовать в течение следующего столетия.

Следует также отметить, что использование динамических методов имеет ограничение. Присутствие в системе дополнительного спутника может исказить параметры видимого движения. Поэтому необходимо сравнивать ПВД, полученные по высокоточным наблюдениям Gaia DR2, с теми, которые характеризуют весь ряд наблюдений. Такое сравнение поможет выделить звезды со спутниками.

Авторы благодарят А.А. Токовинина за полезные критические замечания.

Авторы признательны создателям каталогов WDS и Gaia, результаты которых используются в данной работе, и лично Б. Мэйсону за предоставление данных WDS по нашему запросу.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-02-00563А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агекян Т.А., *Звезды, галактики, Метагалактика* (М.: Наука, 1981).
2. Аллен (Allen), *Allen's Astrophysical Quantities. 4th ed.* (Ed. A.N. Coh, Springer, 1999).
3. Аарсет (S.J. Aarseth), *Gravitational N-body Simulations. Tools and Algorithms* (Cambridge Univ. Press, 2003).
4. Браун и др. (A.G.A. Brown, A. Vallenari, T. Prusti, J.H.J. de Bruijne, C. Babusiaux, C.A.L. Bailer-Jones, M. Biermann, D.W. Evans, et al.), Astron. Astrophys. **616**, A1 (2018).
5. Жучков Р.Я., Кияева О.В., Орлов В.В., Астрон. журн. **87**, 43 (2010) [R.Ya. Zhuchkov, O.V. Kiyaeva, and V.V. Orlov, Astron. Rep. **54**, 38 (2010)].
6. Измайлов И.С., Ховричева М.Л., Ховричев М.Ю., Кияева О.В., Хруцкая Е.В., Романенко Л.Г., Грошева Е.А., Масленников К.Л., Калиниченко О.А., Письма в астрон. журн. **36**, 365 (2010) [I.S. Izmailov et al., Astron. Lett. **36**, 349 (2010)].
7. Измайлов И.С., Рощина Е.А. (I.S. Izmailov and E.A. Roshchina), Astrophys. Bull. **71**, 225 (2016), http://izmccd.puldb.ru/vds.htm

8. Измайлов И.С., Письма в астрон. журн. **45**, 35 (2019) [I.S. Izmailov, Astron. Lett. **45**, 30 (2019)].
9. Киселев А.А., Быков О.П., Астрон. журн. **50**, 1298 (1973).
10. Киселев А.А., Кияева О.В., Астрон. журн. **57**, 1227 (1980) [A.A. Kiselev and O.V. Kiyaeva, Sov. Astron., **24**, 708 (1980)].
11. Киселев А.А., Кияева О.В., Измайлов И.С., Романенко Л.Г., Калиниченко О.А., Василькова О.О., Васильева Т.А., Шахт Н.А., Горшанов Д.Л., Рощина Е.А., Астрон. журн. **91**, 130 (2014) [A.A. Kiselev et al., Astron. Rep., **58**, 78 (2014)].
12. Киселев А.А., Романенко Л.Г., Астрон. журн. **73**, 875 (1996) [A.A. Kiselev and L.G. Romanenko, Astron. Rep., **40**, 795 (1996)].
13. Киселев А.А., Романенко Л.Г., Калиниченко О.А., Астрон. журн. **86**, 148 (2009) [A.A. Kiselev, L.G. Romanenko, and O.A. Kalinichenko, Astron. Rep., **53**, 126 (2009)].
14. Кияева О.В., Астрон. журн. **60**, 1208 (1983).
15. Кияева О.В., Киселев А.А., Поляков Е.В., Рафальский В.Б., Письма в астрон. журн. **27**(6), 456 (2001) [O.V. Kiyaeva et al., Astron. Lett. **27**, 391 (2001)].
16. Кияева О.В., Романенко Л.Г., Жучков Р.Я., Письма в Астрон. журн. **43**, 354 (2017) [O. V. Kiyaeva et al., Astron. Lett. **43**, 316 (2017)].
17. Кияева О.В., Жучков Р.Я., Измайлов И.С., (O.V. Kiyaeva, R.Ya. Zhuchkov, I.S. Izmailov) Astrophys. Bull., **75** (2020), in press.
18. Матвиенко А.С., Кияева О.В., Орлов В.В., Письма в Астрон. журн. **41**, 47 (2015) [A.S. Matvienko et al., Astron. Lett. **41**, 43 (2015)].
19. Мэйсон и др. (B.D. Mason, G.L. Wycoff, W.I. Hartkopf, et al.), *The Washington Visual Double Star Catalog, version 2016*, http://ad.usno.navi.mil/wds/
20. Романенко, Калиниченко (L.G. Romanenko and O.A. Kalinichenko) Astron. Astrophys. Trans. **31**, 7 (2019).
21. Токовинин (A.A. Tokovinin), Astron. Astrophys. Supl. Ser. **235**, 6 (2018), http://www.ctio.noao.edu/atokovin/stars/stars.php
22. Харткопф и др. (W.I. Hartkopf, H.A. McAlister, and O.G. Franz), Astron. J. **98**, 1014 (1989).
23. Хозер, Марси (H.M. Hauser and G.W. Marcy), Publ. Astron. Soc. Pacif. **111**, 321 (1999).
24. Хопман (J. Hopmann), Mitt. Univ. Sternwarte Wien **10**, 155 (1960).