УДК 521.328

ДИНАМИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ 12 ШИРОКИХ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

© 2009 г. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, О. А. Калиниченко

Главная астрономическая обсерватория Российской академии наук, С.-Петербург, Россия Поступила в редакцию 10.09.2007 г.; принята в печать 18.01.2008 г.

Впервые выполнено динамическое исследование относительных движений компонент 12 широких двойных звезд, а именно: ADS 497, ADS 2427 (GL 130.1), ADS 3593, ADS 5436, ADS 6646, ADS 6783, ADS 9559 (δ Boo), ADS 10329, ADS 10759 (ψ Dra), ADS 14878, ADS 15229 μ ADS 16558. Наблюдательной основой являются ряды фотографических наблюдений на 26-дюймовом рефракторе в Пулковской обсерватории, дополненные данными из каталога WDS, лучевыми скоростями компонент и параллаксами, полученными по наблюдениям на спутнике HIPPARCOS. Применен метод параметров видимого движения, позволяющий определить орбиту и массу двойной звезды из наблюдений на короткой дуге порядка 5°-10°. Уверенно определены орбиты и массы 6 звезд с периодами обращения от 500 до 20000 лет. Для 5 звезд получены вероятные орбиты с периодами от 2000 до 100000 лет и оценки масс. У двух звезд - ADS 497 и ADS 10329 - избытки масс в системах составляют соответственно 1 и 3 M_{\odot} относительно ожидаемых масс согласно закономерности "масса-светимость". В трех случаях, для ADS 3593, ADS 14878 и ADS 16558, полученные оценки сумм масс компонент составляют соответственно 46, 25 и 7300 М_☉, если значения параллаксов верны. В орбитальном движении системы ADS 10759 выявлено возмущение с амплитудой 0.3" и периодом 40 лет, что можно объяснить наличием невидимого спутника с массой порядка $0.4~M_{\odot}$. Для всех 12 двойных звезд определена ориентация орбит в галактической системе координат. Плоскости большинства полученных орбит круто наклонены к плоскости Галактики, как это было отмечено в предыдущих работах.

PACS: 97.80.Di

1. ВВЕДЕНИЕ

Пулковская программа наблюдений и исследований визуально-двойных звезд (ВДЗ) в окрестностях Солнца в настоящее время включает около 420 объектов (разделение $\rho > 3''$, визуальные величины компонент $m < 10^m$). Наблюдательной основой программы являются 20-40-летние ряды фотографических позиционных наблюдений на 26-дюймовом рефракторе ГАО РАН. Некоторые результаты наблюдений представлены в публикациях [1-3]. Научная задача программы состоит в определении основных кинематических и динамических характеристик двойных и кратных звездных систем непосредственно из астрометрических наблюдений. В дальнейшем предполагается определение орбит, масс и ориентации орбит в галактической системе координат для избранных пар звезд. показывающих заметное относительное движение.

Фотографический метод предполагает, что угловое разделение между компонентами пары должно быть больше 3"-4". По сравнению с двойными звездами, наблюдаемыми другими методами (ПЗС-наблюдения, спектро- и фотометрия, спеклинтерферометрия), эти пары являются более широкими. Периоды обращения таких пар *a priori* более 300–500 лет. В большинстве случаев пулковские наблюдения охватывают не более 5°–10° видимой дуги орбиты. Классические методы определения орбит ВДЗ в таких условиях неприменимы.

Метод параметров видимого движения (ПВД), разработанный А.А. Киселевым и О.В. Кияевой в 1980 г. в применении к двойным звездам [4], решает этот вопрос, если результаты позиционных наблюдений дополнить данными о тригонометрических параллаксах и лучевых скоростях компонент пары.

Для определения орбиты визуально-двойной звезды методом ПВД необходимо знать на некоторый момент времени T_0 пять параметров относительного видимого движения компонент, а именно: (ρ, θ) — положение спутника В относительно главной звезды А, μ и ψ — величину и позиционный угол видимого движения В относительно А, ρ_c — радиус кривизны наблюдаемой дуги орбиты. Здесь ρ и ρ_c измеряются в сек. дуги, μ — в сек. дуги/год. Расстояние между компонентами в а.е. вычисляется по

ключевой формуле метода ПВД (подробный вывод см. в [5]):

$$r^{3} = k^{2} \frac{\rho \rho_{c}}{\mu^{2}} |\sin(\theta - \psi)|, \qquad (1)$$

где $k^2 = 4\pi^2 M_{\rm AB}$ — динамическая постоянная астроцентрического движения, $M_{\rm AB}$ — суммарная масса компонент звездной системы в единицах M_{\odot} .

По условию проекции на картинную плоскость и согласно интегралу энергии в задаче двух тел для физической пары имеем

$$\frac{\rho}{\pi_t} \le r \le \frac{2k^2}{V^2},\tag{2}$$

где π_t — тригонометрический параллакс, V — пространственная скорость В относительно А (в а.е./год), которая вычисляется непосредственно из позиционных и спектральных наблюдений:

$$V^{2} = \left(\frac{\mu}{\pi_{t}}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta V_{r}}{4.74}\right)^{2},\qquad(3)$$

где $\Delta V_r = V_r^{\rm B} - V_r^{\rm A}$ — относительная лучевая скорость компонент (в км/с).

Для согласованности точностей всех используемых данных ошибка ΔV_r должна быть порядка 0.1 км/с. В связи с тем, что известные в то время каталоги не содержали лучевых скоростей с необходимой точностью, были организованы спектральные наблюдения. Около 10 ВДЗ Пулковской программы наблюдались в 1982-1987 гг. на 6-м телескопе БТА САО РАН Е.Л. Ченцовым (см. работу [6]). Около 70 наших ВДЗ в 1985-1998 гг. по нашей просьбе были включены в программу наблюдений на измерителе лучевых скоростей ИЛС А.А. Токовининым (ГАИШ) [7, 8]. Эти наблюдения показали, что с используемой аппаратурой достижение необходимой точности возможно только для самых ярких и широких звезд нашей программы с компонентами поздних спектральных классов.

В связи с вышеизложенным, в 1994 г. в программу позиционных наблюдений на 26-дюймовом рефракторе и в программу спектральных наблюдений на ИЛС были дополнительно включены яркие широкие пары, близкие к Солнцу по оценкам Толберта [9]. Для определения орбит этих звезд методом ПВД предполагалось использовать их богатую наблюдательную историю, ставшую доступной благодаря систематизации наблюдений ВДЗ со всего мира, проведенной Б.Д. Мейсоном и его коллегами из Морской обсерватории США [10].

Около половины звезд нашей программы оказались обеспеченными тригонометрическими параллаксами высокого качества, полученными по наблюдениям на спутнике HIPPARCOS в 1997 г. [11]. Две трети из них оказались на расстоянии более 50 пк от Солнца и, по-видимому, окончательные ПВД-орбиты этих звезд получить не удастся. Однако для звезд, обеспеченных надежными параллаксами, в случае, когда надежно определяется кривизна наблюдаемой короткой дуги орбиты [12] или относительная лучевая скорость компонент [12, 13], можно оценить минимальную сумму масс компонент звездной системы, допускающую наблюдаемое орбитальное движение.

Настоящая работа является продолжением начатых исследований [14—18], причем, подробный алгоритм вычислений представлен в публикации [14].

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

В данное исследование вошли яркие широкие пары ADS 6783, ADS 9559 (*δ* Boo) и ADS 16558. Это три пары из тех, которые были включены нами в Пулковскую программу наблюдений и исследований в 1994 г. в надежде получить лучевые скорости компонент достаточной точности из каталогов или из спектральных наблюдений астрофизиков. Двойные звезды ADS 497, ADS 2427, ADS 3593, ADS 5436, ADS 6646, ADS 10329, ADS 10759, ADS 14878 и ADS 15229 уже входили в Пулковскую программу ранее. Наши пожелания были учтены, и все 12 звезд оказались обеспечены лучевыми скоростями компонент, опубликованными в [7, 8]. Для звезд ADS 10329 и ADS 10759, по сравнению с [14], существенно расширена наблюдательная база, а также использованы более надежные значения ΔV_r [8] и параллаксы каталога HIPPARCOS [11].

Общие данные об исследуемых звездах приведены в табл. 1 в порядке убывания параллакса. Как видим, это яркие пары поздних спектральных классов. Первые семь находятся на расстоянии до 50 пк от Солнца, три последние — дальше 100 пк. Собственные движения и лучевые скорости компонент в парах совпадают или близки, что свидетельствует о физической природе этих систем. Исключение составляют три последние пары, "неоптичность" которых остается под сомнением.

В табл. 2 приведены данные о наблюдениях пулковских и по каталогу WDS [10]. Первые уверенные наблюдения многих наших звезд были выполнены В.Я. Струве. К сожалению, ADS 2427 и ADS 16558 им не наблюдались. Нет также наблюдений параллаксов на спутнике HIPPARCOS для ADS 3593, ADS 14878 и ADS 15229.

Особо следует отметить систему ADS 9559 (δ Boo). Эту широкую пару наблюдал еще В. Гершель в 1780 г. Однако это наблюдение плохо согласуется со всеми последующими наблюдениями, и мы его не стали принимать во внимание.

α_{2000}		m_{Λ}	SDA	$M_{\rm c}^{\rm A}$, M_{\odot}	π_{t}	$\mu^{\rm A}$. мсек.луги	$\mu^{\rm A}$. мсек.луги	$V^{\rm A} \pm \varepsilon (V^{\rm A})$, KM/c
ADS	$\delta_{2000.0}$	$m_{\rm B}$	Sp _B	M_{Sp}^{B}, M_{\odot}	$\pm \varepsilon(\pi_t)$	$\mu_x^{\rm B}$, мсек.дуги	$\mu_u^{\rm B}$, мсек.дуги	$V_r^{\mathrm{B}} \pm \varepsilon(V_r^{\mathrm{B}}),$ км/с
2427	$03^{h}16.1^{m}$	9.5	M2V	0.4	0.074"	+431	-325	$+21.2 \pm 0.3$
(GL130.1)	$58^{\circ}10'$	9.8	M2V	0.4	$\pm 1''$	+431	-325	$+21.6 \pm 0.4$
10759	17 42.0	4.0	F5IV	1.8	0.045	+027	-270	-12.9 ± 0.2
$(\psi \text{ Dra})$	72 10	5.2	F8V	1.2	± 1	+035	-274	-11.2 ± 0.2
10329	17 03.4	8.0	K5V	0.8	0.040	-357	+241	-72.0 ± 0.2
	$59 \ 34$	9.2	M0	(0.5)	± 2	-365	+255	-71.1 ± 0.3
15229	21 36.9	8.5	G5	0.9	0.040*	-007	-058	-61.6 ± 0.4
	82 55	9.0	_	(0.9)	± 6	-008	-068	-59.0 ± 0.2
9559	$15 \ 15.5$	3.2	G8III	2.6^{**}	0.028	+085	-111	-12.6 ± 0.2
$(\delta \operatorname{Boo})$	33 19	7.4	G0V	1.1	± 1	+084	-110	-12.3 ± 0.3
6783	08 24.3	7.2	G0V	1.1	0.027	-067	-179	$+7.9\pm0.2$
	44 57	8.7	K0V	0.8	± 2	-070	-174	$+7.8\pm0.2$
5436	06 48.3	6.0	F6V	1.3	0.021	+059	-105	$+5.7\pm0.3$
	$55\ 43$	6.0	F5V	1.3^{**}	± 1	+059	-105	$+7.9\pm0.2$
497	00 36.0	7.9	G4V	1.7^{**}	0.019	+186	-408	-60.9 ± 0.1
	30 00	8.7	G7V	0.8	± 2	+181	-399	-60.0 ± 0.4
6646	08 16.5	7.6	F4V	1.9^{**}	0.014	-054	-068	-6.7 ± 0.2
	79 30	7.9	F7V	1.3	± 3	-052	-068	-6.6 ± 0.1
3593	$05 \ 01.3$	8.7	G5	0.9	0.010^{*}	+017	-016	-7.3 ± 0.7
	50 15	8.7	G	(0.9)	± 4	-008	-025	-7.0 ± 0.3
14878	21 20.0	7.1	G5V	0.9	0.006***	-025^{****}	$+082^{****}$	$+31.0 \pm 0.1$
	$52\ 59$	7.1	G5V	0.9	± 5	-032^{****}	$+046^{****}$	$+29.0\pm0.1$
16558	23 10.0	6.5	K4III	2.3	0.003	+015	-003	$+9.1\pm0.2$
	36 51	7.0	K2	(0.8)	± 1	+003	-001	$+8.2\pm0.2$

Таблица 1. Общие данные об исследуемых визуально-двойных звездах

* Тригонометрический параллакс и собственные движения компонент определены в Пулкове [19].

** Компонента является спектрально-двойной звездой [8] (масса спектрального спутника учтена).

*** Параллакс, использованный в данном исследовании, увеличен относительно данных каталога Дженкинс [21] на величину ошибки.

**** Собственные движения компонент ADS 14878 даны по каталогу AGK-3 [20].

Примечание. *m* – визуальная звездная величина компоненты, *M*_{Sp} – масса компоненты согласно соотношению "масса – светимость" (в скобках приведена предполагаемая масса), *V_r* – лучевая скорость компоненты, полученная в работах Токовинина [7] и Токовинина и Смехова [8]. Все параллаксы и собственные движения компонент, кроме случаев, отмеченных сносками, приведены по результатам наблюдений на спутнике HIPPARCOS [11].

Большой разброс наблюдений, согласно каталогу WDS, заметен также для широких пар ADS 6783, ADS 14878 и ADS 16558 (см. далее рис. 4–6), что можно объяснить большими систематическими

различиями результатов наблюдений, проведенных на разных телескопах с использованием различных диапазонов эффективных длин волн (λ_{eff}), а также различной методики наблюдений и разного учета

ADS	T_s	T_f	n	T_s^{Pul}	T_f^{Pul}	$n_{ m Pul}$	Изм.	$\Delta heta_{ m Pul}$	$\Delta heta_{ m WDS}$
2427	1914	1994	48	1971	1999	100	K	9.0°	25.0°
10759	1834	1994	58	1980	2001	55	Р	0.3	3.0
10 329	1830	1995	27	1970	1999	22	K	2.0	11.0
15229	1832	1986	55	1971	2001	54	K	5.0	44.0
9559	1822	2005	94	1994	2005	10	Р	0.0	0.0
6783	1830	1998	27	1996	2005	13	Р	0.0	1.0
5436	1821	2003	87	1962	2003	33	С	1.0	2.0
497	1832	1991	73	1971	2000	87	Р	2.0	13.0
6646	1832	1997	47	1962	2003	41	K	0.2	2.0
3593	1830	1983	71	1970	1999	75	K	10.	47.0
14878	1828	1998	88	1960	2005	30	Р	0.5	2.0
16558	1825	1999	28	1995	2005	14	Р	0.1	1.0

Таблица 2. Наблюдательные данные

Примечание. T_s и T_f – соответственно начальная и конечная эпохи ряда позиционных наблюдений; n – количество наблюдений по каталогу WDS [10]; T_s^{Pul} и T_f^{Pul} – начальная и конечная эпохи ряда фотографических наблюдений в Пулкове; n_{Pul} – количество фотопластинок, полученных на 26-дюймовом рефракторе; "Изм." – измеритель: Р – Л.Г. Романенко, К – О.А. Калиниченко, С – стажер; $\Delta \theta_{\text{Pul}}$ и $\Delta \theta_{\text{WDS}}$ – величина наблюдаемой дуги по наблюдениям в Пулкове и по данным каталога WDS.

дифференциальной рефракции. В этих условиях для некоторых пар звезд, близких по яркости (например, ADS 3593, ADS 5436 и ADS 14878), позиционный угол θ_{B-A} оценивается с различием в 180° на разных обсерваториях. Отметим, что анализируемые здесь пулковские наблюдения двойных звезд обработаны в фотовизуальной системе с $\lambda_{eff} = 5500$ Å.

Фотографические наблюдения на 26"-рефракторе проводились по устоявшейся в Пулкове методике "след-масштаб" [1]. На каждой фотопластинке было проэкспонировано от 6 до 20 изображений исследуемой звезды, ориентировка определялась по суточному следу. Полученные фотопластинки были измерены на "Аскорекорде" О.А. Калиниченко (292 пластинки) или на сканере UMAX, в том числе 33 пластинки для ADS 5436 — стажером, остальные 209 пластинок — Л.Г. Романенко. Измерения пулковских наблюдений представлены на сайте ИНТЕРНЕТа [3]. В последних колонках табл. 2 дано изменение позиционного угла θ , приведенного на эпоху 2000.0, за период пулковских наблюдений и по данным WDS.

В табл. З приведены параметры видимого движения I порядка (или ПВД-I), полученные на основе указанных наблюдений, радиусы кривизны, а также относительные лучевые скорости компонент $\Delta V_r = V_r^{\rm B} - V_r^{\rm A}$ и их ошибки. Табл. З показывает, что ПВД-I исследуемых звезд определены достаточно надежно. Точность относительных движений

компонент сохраняется на уровне ±0.001"/год, за исключением ADS 16558. В 6 случаях из 12 для определения ПВД-орбит мы сочли достаточным обойтись только пулковскими рядами наблюдений.

Радиус кривизны наблюдаемой дуги орбиты ρ_c (или ПВД-II) можно определить по приближенной формуле, соответствующей геометрическому смыслу кривизны:

$$\rho_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\psi} = 57.296 \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \frac{t_2 - t_1}{|\psi_1 - \psi_2|}, \quad (4)$$

где $\Delta \sigma$ — величина наблюдаемой дуги орбиты, ψ_1 и ψ_2 — позиционные углы в орбитальном движении на начальном и конечном участках дуги орбиты в градусах, полученные линейным выравниванием, μ_1 и μ_2 — средние движения на участках выравнивания, t_1 и t_2 — средние моменты наблюдений на этих участках. Точные формулы, использующие вторые производные от ρ и θ , не применялись, поскольку в наших условиях (короткая дуга и медленное орбитальное движение) эти производные из наблюдений не определяются.

По формуле (4) радиус кривизны ρ_c наблюдаемой дуги орбиты определен для ADS 497, ADS 2427 и ADS 3593, а графически — для ADS 10329. Для звезд ADS 6646, ADS 10759 и ADS 15229 величина ρ_c получена подбором с учетом далеких наблюдений (главным образом, наблюдений В.Я. Струве). Для остальных 5 исследуемых звезд ввиду малости наблюдаемой

ADS T_s T_c		ρ	heta	μ , сек. дуги/год	ψ	$ ho_c$	ΔV_r , км/с	
AD 5	T_{f}	10	$\epsilon(ho)$	$\epsilon(heta)$	$\epsilon(\mu)$, сек. дуги/год	$\epsilon(\psi)$	$\epsilon(\rho_c)$	$\epsilon(\Delta V_r)$, км/с
2427	1971	1982.9	4.820''	13.53°	0.0313	301°	5.0''	0.3^{*}
	1999		$\pm 0.005^{\prime\prime}$	$\pm 0.02^{\circ}$	± 0.0006	$\pm 2^{\circ}$	$\pm 1.1''$	± 0.4
10759	1834	1992.6	30.078	15.46	0.0126	133	13.2	1.7
	2001		± 0.004	± 0.01	± 0.0006	± 2		± 0.2
10329	1830	1915.0	12.029	49.55	0.0149	332	2.9	1.0
	1999		± 0.042	± 0.15	± 0.0005	± 4		± 0.3
15229	1971	1980.8	3.042	274.67	0.0110	198	1.0	2.3*
	2001		± 0.013	± 0.09	± 0.0010	± 10		± 0.4
9559	1822	1914.11	105.021	78.02	0.0016	250	_	+0.3
	2005		± 0.063	± 0.04	± 0.0011	± 12		± 0.3
6783	1830	1996.17	29.223	242.15	0.0032	57	_	-0.1
	2005		± 0.005	± 0.01	± 0.0006	± 5		± 0.2
5436	1962	1982.65	4.599	257.28	0.0051	96	_	+2.3
	2003		± 0.007	± 0.03	± 0.0006	± 3		± 0.2
497	1971	1986.9	6.131	22.94	0.0091	319	3.7	0.9
	2000		± 0.002	± 0.03	± 0.0003	± 1	± 0.8	± 0.4
6646	1858	1913.3	20.792	14.46	0.0032	123	13.5	0.1
	2003		± 0.013	± 0.06	± 0.0004	± 6		± 0.3
3593	1970	1986.0	4.189	149.65	0.0239	243	16.0	0.2^{*}
	1999		± 0.008	± 0.06	± 0.0006	± 2	± 5.8	± 0.8
14878	1828	1917.19	6.340	114.92	0.0054	108	_	-2.0
	2005		± 0.025	± 0.14	± 0.0004	± 2		± 0.2
16558	1995	1995.79	67.173	318.52	0.0109	282	_	-1.0
	2005		± 0.010	± 0.01	± 0.0024	± 12		± 0.3

Таблица 3. Параметры видимого (относительного) движения

* Эти величины отличаются от наблюдавшихся А. А. Токовининым в моменты $T \neq T_0$.

Примечание. T_s и T_f – соответственно начальная и конечная эпохи используемого ряда позиционных наблюдений; T_0 – средняя эпоха наблюдений; ρ , θ , μ и ψ – параметры видимого движения и их ошибки; ρ_c – радиус кривизны видимой дуги орбиты; ΔV_r – относительная лучевая скорость компонент, приведенная на момент T_0 .

дуги величина ρ_c не определяется. Для получения расстояния между компонентами двойной звезды (и элементов орбиты) мы воспользовались не основной формулой (1) метода ПВД, а статистической оценкой вероятного отношения между величинами пространственного вектора положения r и его проекцией на плоскость r_t согласно теореме Клейбера [22]:

$$r_t = \frac{\pi}{4}r = r\cos\beta, \quad \beta \approx \pm 38^\circ. \tag{5}$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты определения орбит исследуемых звезд методом ПВД представлены в табл. 4. Для ADS 497, ADS 2427, ADS 6646, ADS 10329, ADS 10759 и ADS 15229 (наиболее уверенные результаты) элементы орбит приведены с ошибками, вычисленными на основе вариаций исходных независимых величин ПВД-I, ρ_c , ΔV_r и π_t в пределах их ошибок.

Алгоритм вычисления орбиты ВДЗ методом ПВД подробно описан в статьях [4, 14] и в кни-

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 86 № 2 2009

ADS	a	Р, лет	β	e	ω	i	Ω	T_{Π} , годы	b_Q	M_{dyn}, M_{\odot}
2427	4.5''	540	-44°	0.49	115°	133°	308°	1745	$+47^{\circ}$	0.8
	$\pm 0.4^{\prime\prime}$	± 60	$+44^{\circ}$	0.57	292°	136°	107°	1793	-42°	
10759	31.0	10 000	0	0.28	99	55	16	3817	-70	3.4^{*}
	± 7.0	± 3300	± 1	± 0.07	± 36	± 4	±1	± 500		
10329	7.1	1200	0	0.71	185	151	50	1416	+19	4.5^{*}
	± 0.3	± 60	± 1	± 0.05	± 21	± 8	± 18	± 3		
15229	3.3	530	-52	0.74	103	112	244	2133	+72	2.0
	± 0.3	± 80	± 7	± 0.10	± 8	± 5	± 6	± 20		
9559	78	76 000	+38	0.73	218	86	75	39773	-10	3.7
			-38	0.99	136	74	91	22775	-12	
6783	21	16 000	+38	0.94	212	81	235	6845	-29	1.9
			-38	0.87	30	84	58	7497	+18	
5436	4.9	2200	+38	0.30	253	97	263	1246	+11	2.6
			-38	0.89	119	104	246	2307	-1	
497	4.5	1900	0	0.53	206	155	23	1384	-41	3.5^{*}
	± 0.3	± 190	± 1	± 0.07	± 8	± 9	± 2	± 32		
6646	15	20 000	0	0.48	157	3	15	8800	-27	3.2
	± 2	± 3600	± 1	± 0.12	± 85	± 10	± 78	± 800		
3593	48	49 000	+46	0.88	90	46	64	1999	-15	46^{*}
			-46	0.88	275	45	242	2014	+2	
14878	12	18 000	+38	0.54	60	96	290	550	+24	25^{*}
			-38	0.97	158	111	97	1035	-34	
16558	124	98 000	+38	0.64	26	126	104	-5887	-54	7300*
			-38	0.70	195	129	279	-5560	+22	
16558**	136	110 000	0	0.75	82	128	139	-2788	-26	3.1

Таблица 4. Элементы ПВД-орбит

* В этих случаях наблюдаются отклонения от соотношения "масса-светимость".

^{**} В этой строке для ADS 16558 приведена альтернативная орбита с нормальной массой и подобранным параллаксом $\pi_t = 0.041''$.

Примечание. *а*, *P*, *e*, *ω*, *i*, Ω и *T*_П – элементы орбиты; *β* – угол наклона вектора АВ к картинной плоскости на средний момент времени *T*₀, для которого определены ПВД согласно табл. 3; *b*_Q – галактическая широта направления на полюс орбиты; *M*_{dyn} – сумма масс компонент, соответствующая динамике движения.

ге [5]. Здесь мы напомним, что в этом методе, как правило, определяются две равновероятные орбиты, соответствующие расположению спутника В относительно главной звезды А в некоторый момент T_0 над картинной плоскостью ($\beta > 0^\circ$) или под ней ($\beta < 0^\circ$). Выявить реальную орбиту можно лишь с использованием наблюдений, достаточно удаленных по времени от основного ряда. В связи с тем, что таких наблюдений для ADS 2427 не оказалось (эта двойная открыта только в 1914 г.), получены две орбиты (при $\beta = -44^{\circ}$ и $\beta = +44^{\circ}$) — одинаковые в динамическом отношении, но различные в геометрическом (табл. 4).

Для четырех звезд, а именно, ADS 497, ADS 6646, ADS 10329 и ADS 10759, для которых оказалось, что орбита, наилучшим образом удовлетворяющая наблюдениям, соответствует положению спутника в картинной плоскости на момент T_0 ($\beta = 0^\circ$), получены однозначные орбиты. В случае ADS 15229 однозначная орбита получена



Рис. 1. Наблюдения ADS 3593 в 1830–2000 гг. (точка 1830 г. – наблюдения В.Я. Струве). Сплошная кривая – участок полученной орбиты, звездочка – первое уверенное наблюдение исследуемой звезды, квадратики – наблюдения по каталогу WDS, крестики – наблюдения в Пулкове.



Рис. 2. Наблюдения ADS 10329 в 1830–1999 гг. (точка 1830 г. – наблюдения В.Я. Струве). Обозначения как на рис. 1.

при $\beta = -52^{\circ}$, поскольку при $\beta = +52^{\circ}$ орбита не удовлетворяет далеким наблюдениям $((O-C)_{\theta} = 10^{\circ} \text{ в } 1832 \text{ г.}).$

Для далекой пары ADS 3593 приведены также две орбиты, соответствующие $\beta = -46^{\circ}$ и $\beta =$ $= +46^{\circ}$. Элементы этих орбит вычислены при параллаксе $\pi_t = 0.010''$, определенном в Пулкове [19], и сумме масс, равной 46 M_{\odot} — наименьшему значению, обеспечивающему устойчивое орбитальное движение в системе при данном параллаксе. Как следует из примечания к работе [19], данный параллакс определен неуверенно. Однако эквивалентные орбиты могут быть получены при сумме масс 2 M_{\odot} (соответствующей соотношению "масса-светимость") только в случае увеличения параллакса в 3 раза ($\pi_t = 0.030''$). Эти орбиты, как и первые, одинаково хорошо удовлетворяют наблюдениям от В.Я. Струве до наших дней с точностью до 0.1" в видимом относительном движении. На рис. 1 показан участок орбиты и распределение наблюдений в период от 1830 до 1999 гг.

Для пяти оставшихся звезд ADS 5436, ADS 6783, ADS 9559, ADS 14878 и ADS 16558 приведено клейберово решение в двух вариантах для $\beta = +38^{\circ}$ и $\beta = -38^{\circ}$.

Отметим результат нашего исследования, связанный с оценкой суммы масс звездных систем (см. последнюю колонку табл. 4). В двух случаях, а именно для звезд ADS 497 и ADS 10329, параллаксы которых достаточно надежны, выявлены избытки масс порядка 1 и 3 M_{\odot} , соответственно.

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 86 № 2 2009



Рис. 3. Наблюдения ADS 10759 в 1832–2003 гг. (точка 1832 г. – наблюдения В.Я. Струве). Обозначения как на рис. 1.

Рис. 4. Наблюдения ADS 6783 в 1830-2005 гг. (точка 1830 г. – наблюдения В.Я. Струве). Обозначения как на рис. 1.

Рис. 5. Наблюдения ADS 14878 в 1828–2005 гг. (точка 1832 г. – наблюдения В.Я. Струве). Обозначения как на рис. 1.

АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 86 № 2 2009

Рис. 6. Наблюдения ADS 16558 в 1825-2005 гг. (точка 1876 г. – наблюдения Е. Дембовского). Обозначения как на рис. 1.

Здесь мы, возможно, имеем дело с особенностью зависимости "масса—светимость" для этих звезд или с наличием скрытой массы в системах. Для обеих звезд необходимы дальнейшие исследования. Рис. 2 показывает, насколько хорошо найденная орбита для ADS 10329 удовлетворяет наблюдениям.

Кроме того, избыточная масса ($25 M_{\odot}$) выявляется в системе ADS 14878, если используемое значение параллакса правильно. Однако даже если этот параллакс увеличить на величину его ошибки, величина минимально возможной массы остается избыточной на 3 M_{\odot} .

Для ADS 16558 орбита, полученная с параллаксом $\pi_{\rm HIP} = 0.003''$, требует суммы масс компонент не меньше 7300 M_{\odot} , что вызывает сомнение. Двойная звезда может быть оптической, так как абсолютные и относительные движения компонент малы и практически совпадают, или ее параллакс грубо ошибочный. В связи с этим дополнительно приведена альтернативная орбита, полученная в предположении нормальной массы системы (табл. 1) и с подобранным параллаксом ($\pi_t = 0.041''$).

В остальных 7 системах динамика движений удовлетворяет принятым массам согласно соотношению "масса—светимость" [23].

Особое внимание вызывает детальное исследование орбитального движения яркой широкой пары ADS 10759 (ψ Dra). На рис. 3 показано изменение угла θ в функции времени, что соответствует смещению 0.5° в направлении движения. Вычисления показывают, что при $\rho = 30''$ имеет место возмущение с периодом 40 лет и амплитудой 0.3'' в орбитальном движении компоненты В относительно компоненты А. Этот факт можно объяснить

наличием невидимого спутника с массой порядка 0.4 M_{\odot} .

Представляет большой звездно-динамический интерес рассмотреть ориентацию орбит широких пар — физических двойных звезд — в галактической системе координат. В предпоследней колонке табл. 4 приведена величина b_Q — галактическая широта направления на полюс полученных орбит. Обращаем внимание на то, что плоскости почти всех этих орбит круто наклонены к плоскости Галактики ($|b_Q| < 30^\circ$, т.е. так же, как отмечено в статьях [16, 17]). В остальных параметрах закономерности распределения не выявляются.

Разброс наблюдений относительно вычисленных орбит для примера представлен на рис. 4, 5 и 6 для ADS 6783, ADS 14878 и ADS 16558, соответственно. Эфемериды вариантов орбит при $\beta = +38^{\circ}$ и $\beta = -38^{\circ}$ по наблюдениям на коротких дугах для всех исследуемых звезд практически совпадают. Как видим, эти орбиты могут считаться только предварительными, хотя в динамическом отношении (при данных параллаксах и лучевых скоростях) они и представляют определенный интерес, так как соответствуют массам 1.9 M_{\odot} (нормальная), 25 M_{\odot} (избыточная) и 7300 M_{\odot} (черная дыра?).

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретической основой выполненного исследования является метод ПВД. В настоящей работе показана возможность определения орбит и масс широких двойных звезд с медленным орбитальным движением. Наиболее надежные результаты получены для звезд на расстоянии до 50 пк. Определены орбиты 6 звезд с периодами обращения от 500 до 20 000 лет. В двух системах избытки масс составляют 1 и 3 M_{\odot} . Для 5 звезд получены вероятные орбиты и оценки масс. Плоскости большинства орбит круто наклонены к плоскости Галактики.

Авторы выражают благодарность всем наблюдателям 26-дюймового рефрактора, особенно соавторам каталогов [1—3]. Мы предполагаем продолжать наблюдения и исследования визуальнодвойных звезд Пулковской программы, в том числе широких пар с медленным орбитальным движением.

Обращаемся с призывом к астрономическому сообществу поддержать космические проекты (типа GAIA), которые могли бы доставить информацию о параллаксах визуально-двойных звезд, особенно — слабых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- А. А. Киселев, О. А. Калиниченко, Г. А. Плюгин и др., Каталог относительных положений и движений 200 визуально-двойных звезд по наблюдениям в Пулкове на 26-дюймовом рефракторе в 1960–1986 гг. (Л.: Наука, 1988).
- A. A. Kiselev, O. A. Kalinichenko, O. V. Kijaeva, et al., *Pulkovo Visual Double Star Catalogue*, VizieR On-line Data Catalog: I/292, 2004.
- А. А. Киселев, О. А. Калиниченко, О. В. Кияева и др., Каталог относительных положений 234 визуально-двойных звезд, http://www.puldb.ru, 2006.
- А. А. Киселев, О. В. Кияева, Астрон. журн. 57, 1227 (1980).
- 5. А.А. Киселев, *Теоретические основания фото-ерафической астрометрии* (М.: Наука, 1989).
- Л. Г. Романенко, Е. Л. Ченцов, Астрон. журн. 71, 278 (1994).

- 7. А. А. Токовинин, Астрон. журн. 71, 293 (1994).
- 8. A. A. Tokovinin and M. G. Smekhov, Astron. and Astrophys. **382**, 118 (2002).
- 9. C. R. Tolbert, Astrophys. J. 139, 1105 (1964).
- 10. B. D. Mason, G. L. Wycoff, W. I. Hartkopf, *et al.*, Astron. J. **122**, 3466 (2001).
- 11. M. A. C. Perryman, E. Hoeg, *et al.*, *The HIPPARCOS and TYCHO Catalogs* (Noordwijk, ESA, 1997).
- 12. А. А. Киселев, О. В. Кияева, Письма в "Астрон. журн." **29**, 46 (2003).
- 13. А. А. Киселев, О. В. Кияева, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове № 217, 275 (2004).
- А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, Астрон. журн. 73, 875 (1996).
- А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, И. С. Измайлов, Е. А. Грошева, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове № 214, 239 (2000).
- 16. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове № 216, 269 (2002).
- A. A. Kisselev and L. G. Romanenko, ASP Conf. Ser. 316, 250 (2004).
- А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, О. А. Калиниченко, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове № 217, 279 (2004).
- А. А. Киселев, О. А. Калиниченко, О. П. Быков, Изв. Гл. астрон. обсерв. в Пулкове № 208, 9 (1994).
- O. Heckmann, AGK-3. Star catalogue of positions and proper motions north of -2.5 degree declination (Hamburg-Bergedorf: Hamburger Sternwarte, 1975).
- L. F. Jenkins, *General catalogue of trigonometric stellar parallaxes* (New Haven: Yale Univ. Observ., 1952).
- 22. П. П. Паренаго, *Курс звездной астрономии* (М.: ГИТТЛ, 1954), с. 74.
- 23. К. У. Аллен, *Астрофизические величины* (М.: Мир, 1977), с. 295.

A Dynamical Study of 12 Wide Visual Binaries

A. A. Kisselev, L. G. Romanenko, and O. A. Kalinichenko

We have carried out the first dynamical studies of the relative motions of the components of 12 wide binaries: ADS 497, ADS 2427 (GL 130.1), ADS 3593, ADS 5436, ADS 6646, ADS 6783, ADS 9559 (б Тюю), ADS 10329, ADS 10759 (ψ Dra), ADS 14878, ADS 15229, and ADS 16558. The analysis is based on series of photographic observations made with the 26" refractor of Pulkovo Observatory, supplemented by data from the WDS Catalog and HIPPARCOS radial velocities and parallaxes. We used the parameters of the apparent motions, which can yield the orbit and mass of a binary from observations over a short arc of the orbit occupying of the order of $5^{\circ}-10^{\circ}$. The orbits and masses for six stars with orbital periods from 500 to 20 000 years have been reliably determined. For five stars with periods from 2000 to 100z,000 years, we obtained probable orbits and mass estimates. For ADS 497 and ADS 10329, the mass excesses in their systems are 1 and 3 M_{\odot} , respectively, relative to the masses expected from the mass-luminosity dependence. In three cases, for ADS 3593, ADS 14878, and ADS 16558, the obtained estimates of the combined component masses are 46, 25, and 7300 M_{\odot} , respectively, if the parallaxes are correct. A perturbation with amplitude 0.3'' and period 40 yrs has been detected in the orbital motion of the system ADS 10759, possibly indicating the presence of an invisible satellite with a mass of the order of 0.4 M_{\odot} . The orientations of the orbits in the Galactic reference frame have been determined for all 12 binaries. The planes of most of the obtained orbits are steeply inclined to the plane of the Galaxy, as was noted in previous studies.