



ISSN 1607–2855

Том 8 • № 1 • 2012 С. 6 – 12

УДК 524.3–333

Новые массы звезд, вычисление прямыми методами

М.А. Бабенко¹, В.А. Захожай²

¹Херсонский государственный университет

²Харьковский национальный университет им. В.Н.Каразина

Детально рассматриваются прямые методы определения масс звезд, которые основаны на анализе двойных и кратных систем. Приводятся теоретические обоснования прямых методов, дается полный вывод формул для расчета массы на основе астрометрических и спектроскопических данных, а также погрешности их определения. Анализируются результаты расчета прямыми методами масс 156 звезд, входящих в состав двойных и кратных систем.

НОВІ МАСИ ЗІР, РОЗРАХУНОК ПРЯМИМИ МЕТОДАМИ, Бабенко М.О., Захожай В.А. — Детально розглядаються прямі методи визначення мас зір, які засновані на аналізі подвійних і кратних систем. Наводяться теоретичні обґрунтування прямих методів, дається повне виведення формул для розрахунку маси на основі астрометричних і спектроскопічних даних, а також похибки їх визначення. Аналізуються результати розрахунку прямыми методами мас 156 зірок, що входять до складу подвійних і кратних систем.

NEW STELLAR MASSES, THE CALCULATION OF THE DIRECT METHODS, by Babenko M.O., Zakhzhay V.A. — Direct methods of determining stellar masses, which are based on the analysis of binary and multiple systems are considered detail. Theoretical basis of direct methods, a complete derivation of the formulas for calculating masses based on the astrometric and spectroscopic data and errors of their determination are given. The results of calculation by direct methods of 156 stellar masses, members of the binary and multiple systems.

Ключевые слова: физические свойства звезд; кратные звездные системы.

Key words: physical characteristics of stars; multiple stellar systems.

ВВЕДЕНИЕ

Масса является важнейшим параметром звезд, поскольку определяет их эволюцию и принадлежность к соответствующему классу космических объектов. Их значения устанавливаются с помощью прямых, спектроскопических и статистических методов.

В двойных и кратных звездных системах массы звезд могут быть определены *прямыми методами* [1, 3, 7–9]. Астрометрические наблюдения визуальных пар позволяют вычислить по третьему закону Кеплера сумму масс компонентов. Отношения масс этих компонентов могут быть определены астрометрическим и спектроскопическим методами. Это и позволяет вычислить абсолютные значения звездных масс. Если такие двойные звезды входят в систему более высокой кратности, массы этих компонентов также могут быть определены после специально проведенных астрометрических и спектроскопических измерений и дополнительно выполненного анализа. Это же относится к определению масс невидимых (астрометрических и спектральных) спутников и компонентов затменных систем. К *спектроскопическим методам* относят:

- 1) метод исследования звездной атмосферы, который требует задания определенной модели атмосферы, данных об эффективной температуре, светимости и ускорении силы тяжести [9];
- 2) метод исследования звездного ветра [12, 16], применимый только для горячих звезд и основанный на оценке массы при использовании предельной и параболической скорости расширения звездного ветра, данных о светимости, радиусе, ускорении силы тяжести;
- 3) метод исследования красного смещения [17], в котором кроме данных о красном смещении необходимо знать отношение массы к радиусу.

К *статистическим* относят методы определения массы по статистическим зависимостям «масса — светимость», «масса — радиус», «масса — эффективная температура», «масса — время жизни на главной последовательности» (см., например, [2, 5, 6, 10]).

Как следует из анализа, проведенного в [4], к началу 1990-х гг. прямым методом были определены массы звезд около 250 звезд. За последние 20 лет ситуация с астрометрическими и спектроскопическими наблюдениями одних и тех же двойных звезд, позволяющими вычислять суммы и отношения масс компонентов двойных звезд изменилась. Появились новые результаты [11, 14, 15], позволяющие расширить список звезд с измеренными массами прямым методом. В настоящей статье приводятся основные рабочие формулы, позволяющие это осуществить и результат вычисления новых звездных масс.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЯМОГО МЕТОДА

Рассмотрим двойную кратную звездную систему, А и В компоненты которой, движутся по эллиптическим орбитам относительно общего центра масс — точки С на рис. 1. Такие орбиты назовем абсолютными. Обозначим массы и большие полуоси этих компонентов через m_1, a_1 и m_2, a_2 соответственно. Очевидно, что если связать начало координат с одним из компонентов, движение второго компонента осуществляется по эллиптической орбите с большой полуосью $a_{от} = a_1 + a_2$. Эти орбиты будем называть относительными. Для абсолютных и относительных орбит компонентов А и В будут равными: периоды движения T , эксцентриситеты e , долготы перигентра ω , истинные аномалии v и наклоны орбит i .

Рассмотрим А-компоненту двойной звезды. Из первого закона Кеплера следует, что

$$r_1(1 + e \cos v) = a_1(1 - e^2), \quad (1)$$

где r_1 — радиус-вектор компонента А относительно центра масс.

Из второго закона Кеплера можно записать

$$2\pi a_1^2 \sqrt{1 - e^2} = r_1^2 \dot{v} T. \quad (2)$$

Как видно из рис. 1, расстояние от компонента А до плоскости, перпендикулярной лучу зрения, которая проходит через центр масс С, равно

$$z_1 = r_1 \sin i \sin(\omega + v). \quad (3)$$

Тогда, с учетом формул (1)–(2), можно получить лучевую скорость компонента А относительно центра масс

$$\dot{z}_1 = K_1 (\cos(\omega + v) + e \cos \omega) \quad (4)$$

где амплитуда кривой лучевой скорости компонента А есть

$$K_1 = \frac{2\pi a_1 \sin i}{T \sqrt{1 - e^2}}. \quad (5)$$

Из третьего закона Кеплера следует, что сумма масс компонентов равна

$$m_1 + m_2 = \frac{4\pi^2 a_{от}^3}{GT^2}. \quad (6)$$

С другой стороны, в соответствии с решением задачи двух тел имеем

$$a_{от} = \frac{(m_1 + m_2)a_1}{m_2} \quad (7)$$

Подставив выражения (5)–(6) в (7), после определенных преобразований, получим:

$$K_1 = \frac{GT}{2\pi a_1^2 \sqrt{1 - e^2}} \frac{m_2^3 \sin i}{(m_1 + m_2)^2}. \quad (8)$$

Избавившись от a_1 и подставляя сумму масс компонентов из (6), получим выражения для определения масс компонентов системы:

$$m_1 = \frac{2\pi a_{от}^2 K_2 \sqrt{1 - e^2}}{GT \sin i}, \quad m_2 = \frac{2\pi a_{от}^2 K_1 \sqrt{1 - e^2}}{GT \sin i}. \quad (9)$$

Чтобы выразить в (9) большую полуось $a_{от}$ в астрономических единицах, T — в годах, а m — в массах Солнца, перепишем третий закон Кеплера для системы Земля–Солнце в следующем виде:

$$\frac{4\pi^2}{G} \approx \frac{T_{\oplus}^2 m_{\odot}}{a_{\oplus}^3}, \quad (10)$$

где $T_{\oplus} = 1$ год — период движения Земли вокруг Солнца; $a_{\oplus} = 1$ а.е. — большая полуось орбиты Земли; m_{\odot} — масса Солнца.

Подставив формулы (10) в (9), получим следующие выражения для расчета масс компонентов:

$$\frac{m_1}{m_{\odot}} \approx \frac{T_{\oplus}}{2\pi a_{\oplus}} \frac{a_{a.e.}^2 K_2 \sqrt{1 - e^2}}{T_r \sin i}; \quad \frac{m_2}{m_{\odot}} \approx \frac{T_{\oplus}}{2\pi a_{\oplus}} \frac{a_{a.e.}^2 K_1 \sqrt{1 - e^2}}{T_r \sin i}; \quad (11)$$

где $a_{a.e.}$ — большая полуось орбиты звезды в астрономических единицах; T_r — период движения звезды в годах.

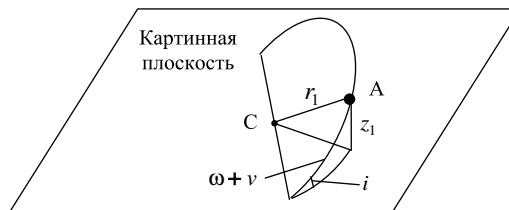


Рис. 1. Орбита компонента А двойной звезды относительно центра масс С.

Как известно, линейное значение большой полуоси относительной орбиты, выраженное в астрономических единицах, определяется как

$$a_{\text{а.е.}} \approx \frac{a}{p}, \quad (12)$$

где a и p — угловые значения большой полуоси относительной орбиты и параллакса, выраженные в секундах дуги.

Тогда при подстановке численных значений постоянных выражения (11) примут следующий вид:

$$m_1 \approx 12,26 \left(\frac{a}{p} \right)^2 \frac{K_2 \sqrt{1-e^2}}{T \sin i}; \quad m_2 \approx 12,26 \left(\frac{a}{p} \right)^2 \frac{K_1 \sqrt{1-e^2}}{T \sin i}, \quad (13)$$

где a , p — угловое значение большой полуоси относительной орбиты и параллакс, выраженные в секундах дуги, K — амплитуда кривой лучевой скорости, выраженная в км/с, T — период движения, выраженный в сутках, m — масса в массах Солнца.

Погрешности измерения масс можно получить после последовательного логарифмирования и дифференцирования выражений (13). Выполнив эти операции, получим:

$$\begin{aligned} \Delta_{m1} &\approx m_1 \left[\frac{\Delta_T}{T} + 2 \left(\frac{\Delta_a}{a} + \frac{\Delta_p}{p} \right) + \frac{e \Delta_e}{1+e^2} + \frac{\Delta_i}{\operatorname{tg} i} + \frac{\Delta_{K2}}{K_2} \right]; \\ \Delta_{m2} &\approx m_2 \left[\frac{\Delta_T}{T} + 2 \left(\frac{\Delta_a}{a} + \frac{\Delta_p}{p} \right) + \frac{e \Delta_e}{1+e^2} + \frac{\Delta_i}{\operatorname{tg} i} + \frac{\Delta_{K1}}{K_1} \right], \end{aligned} \quad (14)$$

где Δ — абсолютные погрешности параметров, выраженные в тех же единицах, что и сами параметры (для наклона орбиты Δ_i определяется в радианах).

2. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Выше отмечалось, что прямые вычисления масс могут быть осуществлены только в том случае, если имеются значения сумм и отношений масс компонентов одних и тех же двойных звезд, т.е. эти системы наблюдаются и как визуально-двойные, и как спектрально-двойные. Такие объекты могут быть обнаружены или по индивидуальному поиску данных о конкретных объектах, или по выявлению одних и тех же звезд, кинематические данные о которых есть в каталогах визуальных и спектроскопических орбит.

Здесь мы пошли по второму варианту, воспользовались данными Шестого каталога орбит визуально-двойных звезд VB6 [11], Девятого каталога спектрально-двойных звезд SB9 [14] и CHARA-каталогу элементов орбит спектрально-двойных звезд [16]. Численные значения астрометрических и спектроскопических данных взяты непосредственно из оригинальных публикаций, параллаксы двойных звезд — из уточненного каталога звезд Гиппаркос [13].

Расчеты проводились по формулам (13) и (14), а их результаты приведены в табл. 1. В первой колонке указан номер звезды по каталогу звезд Гиппаркос (HIP), во второй — спектральный тип (Sp), в третьей — рассчитанная нами масса звезды в массах Солнца (m/m_\odot), в четвертой — её абсолютная погрешность (Δ_m/m_\odot), в пятой и шестой колонках приведены бибкоды: ссылки на астрометрические и спектроскопические данные, соответственно, которые были использованы для расчета масс.

Буквы после номера звезды по Гиппаркос-каталогу обозначают соответствующий компонент двойной звезды воспользовавшись общепринятыми обозначениями: А, В, С и т.д. Более детальную информацию о звезде можно получить в международной базе данных CDS в Интернет-сайте по адресу: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-basic?Ident=hipXXX>, где XXX — номер звезды по каталогу Гиппаркос.

Символ «*», которым помечены некоторые спектральные типы (например, B8IV*) означает, что для данной двойной системы не определены пока спектральные типы компонент, а указан лишь суммарный спектральный тип двойной звезды.

Относительная погрешность определения всех вычисленных масс не превышает 40%, для 80 звезд — 10% и меньше. Столь значительные погрешности объясняются тем, что в формулы (13) входит 6 измеряемых параметров и погрешность каждого из них вносит свой вклад в общую погрешность. Ссылки в последних двух колонках таблицы 1 указаны в виде бибкодов, которые используются в международной базе данных ADS. Для просмотра той или иной ссылки необходимо перейти на Интернет-сайт, введя его адрес <http://adsabs.harvard.edu/abs/бибкод>.

По обсуждаемому выше алгоритму удалось надежно определить массы 156 звезд, которые расположены в радиусе 1 кпк от Солнца (т.е. в пределах Местной звездной системы). Они входят в 58 двойных и 23 кратных системы. В таблицу 1 не вошли те компоненты, которые сами являются двойными или кратными системами, а также звезды с большими погрешностями, содержащихся в астрометрических или спектроскопических данных. Это выявилось при расчете масс компонентов и привело к некорректным их значениям. Подавляющее число звезд (146 или 94%) находится в пределах 100 пк (т.е. в поясе Гулда). До 25 пк находится 63 звезды (40%), до 10 пк — всего 15 ($\approx 10\%$).

Таблица 1. Массы компонентов двойных звезд

HIP	Sp	m/m_{\odot}	$\Delta m/m_{\odot}$	Бибкоды	
				Данные астрометрии	Данные спектроскопии
1	2	3	4	5	6
677A	B8 IV*	3,56	0,21	2000A&AS..145..215P	1999A&A...351..963
677B	B8 IV*	1,77	0,09	2000A&AS..145..215P	1999A&A...351..964
2941 A	G8 V	1,00	0,11	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
2941 B	G8 V	0,79	0,10	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
3810 A	F8 V	1,26	0,05	1999ApJ...527..360B	1999ApJ...527..360B
3810 B	F8 V	1,21	0,05	1999ApJ...527..360B	1999ApJ...527..360B
4463 A	G8 III	2,10	0,22	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
4463 B	G8 III	1,98	0,21	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
7564 A	K1 IV	1,18	0,08	2006ApJ...644.1193B	2006ApJ...644.1193B
7564 B	K0 V	0,92	0,06	2006ApJ...644.1193B	2006ApJ...644.1193B
7580 A	F5 V	1,36	0,25	2000A&AS..145..215P	1993AstL...19...73T
7580 B	F5 V	1,13	0,18	2000A&AS..145..215P	1993AstL...19...73T
8903 A	A5V*	2,06	0,09	2000A&AS..145..215P	1990ApJ...356..641P
8903 B	A5V*	1,05	0,05	2000A&AS..145..215P	1990ApJ...356..641P
10064 A	A5 III*	3,18	0,21	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
10064 B	A5 III*	1,24	0,11	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
10644 A	G0 V	0,55	0,15	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
10644 B	K4 V	0,49	0,13	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
12390 A	F5 V	1,37	0,31	2000A&AS..145..215P	1976ApJS...30..273A
12390 B	F6 V	0,89	0,22	2000A&AS..145..215P	1976ApJS...30..273A
12623 A	F8 V	1,36	0,06	2006AJ....131.2695B	1998AJ....115.2555B
12623 B	G1,5 V	1,20	0,05	2006AJ....131.2695B	1998AJ....115.2555B
14328 A	G8 III	3,04	0,32	2000A&AS..145..215P	1999A%26A...348..127P
14328 B	A3 V	2,24	0,23	2000A&AS..145..215P	1999A%26A...348..127P
14576 A	B8 V	3,50	0,75	2011ApJ...737..104P	1971ApJ...168..443H
4576 B	K2 IV	0,77	0,17	2011ApJ...737..104P	1971ApJ...168..443H
14576 C	F1 V	1,48	0,19	2011ApJ...737..104P	1971ApJ...168..443H
16042 A	G5V	1,16	0,10	2011ApJ...737..104P	2008AJ....135..209M
16042 B	K0IV	1,06	0,10	2011ApJ...737..104P	2008AJ....135..209M
20087 A	A8 V	1,68	0,16	2000A&AS..145..215P	1997ApJ...474..256T
20087 B	G0 V	1,36	0,20	2000A&AS..145..215P	1997ApJ...474..256T
20284 A	F6 V	1,48	0,24	2004ApJ...610..443K	2004ApJ...610..443K
20284 B	F6 V	1,46	0,24	2004ApJ...610..443K	2004ApJ...610..443K
20661 A	F7V*	1,34	0,26	2000A&AS..145..215P	1997ApJ...479..268T
20661 B	F7V*	1,22	0,24	2000A&AS..145..215P	1997ApJ...479..268T
20894 A	A7 III*	2,64	0,14	2011A&A...525A..50T	2011A&A...525A..50T
20894 B	A7 III*	2,05	0,11	2011A&A...525A..50T	2011A&A...525A..50T
23453 A	K4 I	5,04	0,91	1996ApJ...471..454B	1996ApJ...471..454B
23453 B	B5 V	4,17	0,69	1996ApJ...471..454B	1996ApJ...471..454B
24608 A	G8 III	2,60	0,08	2000A&AS..145..215P	1994AJ....107.1859H
24608 B	G0 III	2,48	0,06	2000A&AS..145..215P	1994AJ....107.1859H
28360 A	A2 IV*	2,50	0,15	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
28360 B	A2 IV*	2,50	0,13	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
30351 A	B4 V	5,74	2,05	2011PASJ...63.1079B	2010NewA...15....1B
30351 B	B6,5 V	3,48	1,27	2011PASJ...63.1079B	2010NewA...15....1B
30920 A	M4,5V*	0,20	0,02	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
30920 B	M4,5V*	0,10	0,01	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
36850 C	M1 V	0,81	0,14	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
36850 F	M1 V	0,81	0,15	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
38382 A	G2V*	0,96	0,07	2000A&AS..145..215P	1976ApJS...30..273A
38382 B	G2V*	0,91	0,11	2000A&AS..145..215P	1976ApJS...30..273A
41824 A	M3,5V*	0,32	0,13	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S

1	2	3	4	5	6
41824 B	M3,5V*	0,29	0,12	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
44892 A	G6 III	1,16	0,04	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
44892 B	K2 III	1,00	0,03	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
45170 A	G8 V	0,86	0,04	2000A&AS..145..215P	1996AJ....112..276M
45170 B	G8 V	0,90	0,05	2000A&AS..145..215P	1996AJ....112..276M
46404 A	G2 V	1,19	0,25	2000A&AS..145..215P	1988A&A...195..129
46404 B	G9 V	0,69	0,12	2000A&AS..145..215P	1988A&A...195..129
47508 A	A5 V	1,74	0,04	2001AJ....121.1623H	2001AJ....121.1623H
47508 B	F9 III	1,97	0,05	2001AJ....121.1623H	2001AJ....121.1623H
51233 A	G8 III	2,53	0,20	2001IAUDS.144....1M	2008Obs...128..176G
51233 B	F8 IV	1,54	0,09	2001IAUDS.144....1M	2008Obs...128..176G
57029 A	F4 V*	1,32	0,19	2010AJ....139.1975R	1999Obs...119..213G
57029 B	F4 V*	1,23	0,17	2010AJ....139.1975R	1999Obs...119..213G
57565 A	G5 III	2,04	0,24	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
57565 B	A7 V	1,87	0,15	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
65378 A	A2 V*	2,77	0,50	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
65378 B	A2 V*	2,70	0,49	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
69226 A	F8 IV	1,48	0,09	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
69226 B	F9 IV	1,43	0,09	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
69974 A	A1 V	2,19	0,09	2007ApJ...659..626Z	2007ApJ...659..626Z
69974 B	A1 V	1,99	0,09	2007ApJ...659..626Z	2007ApJ...659..626Z
71683 A	G2 V	1,09	0,02	2000A&AS..145..215P	1999A&A...344..172P
71683 B	K1 V	0,92	0,02	2000A&AS..145..215P	1999A&A...344..172P
73182 B	M1,5 V	0,44	0,16	2000A&AS..145..215P	1998AJ....115.2555B
73182 C	M3 V	0,31	0,11	2000A&AS..145..215P	1998AJ....115.2555B
73184 B	M1 V	0,59	0,02	1999A&A...351..619F	1999A&A...351..619F
73184 C	M3 V	0,39	0,01	1999A&A...351..619F	1999A&A...351..619F
75312 A	G2 V	1,13	0,07	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
75312 B	G2 V	1,01	0,06	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
77725 A	K7 V	0,65	0,17	2000AstL...26..668T	2000AstL...26..668T
77725 B	M0 V	0,61	0,17	2000AstL...26..668T	2000AstL...26..668T
78820 A	B0,5 V	11,34	2,88	1997A&A...322..565H	1979PASP...91...87P
78820 B	B1,5 V	7,18	1,68	1997A&A...322..565H	1979PASP...91...87P
82817 A	M3 V	0,33	0,02	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
84949 A	G8 III	2,93	0,47	2008AJ....135..766M	1994AJ....107.1529S
85209 A	G5 V	1,27	0,20	2006AJ....132..836H	2006AJ....132..836H
85209 B	M5 V	1,13	0,18	2006AJ....132..836H	2006AJ....132..836H
85365 A	F3 V	1,42	0,20	1997ASPC...130...19H	1915PDO.....2..329P
85365 B	F3 V	1,33	0,19	1997ASPC...130...19H	1915PDO.....2..329P
85667 A	G9 IV	0,98	0,05	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
85667 B	G9 IV	0,91	0,05	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
86201 A	F5 V*	1,40	0,08	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
86201 B	F5 V*	1,14	0,06	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
87895 A	G2 V	1,37	0,21	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..366M
87895 B	K2 V	0,88	0,13	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..366M
88601 A	K0 V	0,86	0,04	2000A&AS..145..215P	1991PASP..103..546B
88601 B	K5 V	0,75	0,03	2000A&AS..145..215P	1991PASP..103..546B
88637 B	G1 V	0,90	0,14	1982PASP...94..705H	1979PASP...91..304B
89937 A	F7 V	1,05	0,08	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
89937 B	K0 V	0,74	0,05	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
91009 A	K6 V	0,77	0,03	2012MNRAS.419.1285H	2012MNRAS.419.1285H
91009 B	K7 V	0,68	0,03	2012MNRAS.419.1285H	2012MNRAS.419.1285H
92420 A	B6 II	3,37	1,28	2008ApJ...684L..95Z	1992SvAL...18..287S
92420 B	B8 II	15,12	5,29	2008ApJ...684L..95Z	1992SvAL...18..287S
94076 A	GI V	1,67	0,60	2000AstL...26..116T	2000AstL...26..116T

1	2	3	4	5	6
94076 B	KI V	1,31	0,45	2000AstL...26..116T	2000AstL...26..116T
94349 A	M3,5V*	0,37	0,03	2001AJ....121.1607B	2001AJ....121.1607B
94349 B	M3,5V*	0,19	0,01	2001AJ....121.1607B	2001AJ....121.1607B
94643 B	F2 II	2,03	0,15	2001IAUDS.145....1H	1975AJ.....80..844F
95995 A	K1 V*	0,86	0,11	2000A&AS..145..215P	1983PASP...95..201M
95995 B	K1 V*	0,80	0,10	2000A&AS..145..215P	1983PASP...95..201M
96656 A	K2 V	0,77	0,06	2007A&A...464..635B	2007A&A...464..635B
96656 B	K4 V	0,70	0,05	2007A&A...464..635B	2007A&A...464..635B
96683 A	K0 III	3,16	0,32	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
96683 B	K0 III	3,06	0,31	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
98416 A	F8 V*	2,72	0,62	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
98416 B	F8 V*	2,75	0,54	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
99376 A	G4 V	1,07	0,19	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
99376 B	G8 V	0,83	0,16	2000A&AS..145..215P	1991A&A...248..485D
99473 A	B9,5III*	4,62	0,83	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
99473 B	B9,5III*	3,70	0,66	2000A&AS..145..215P	1995AJ....110..376H
101382 A	K0 V	0,89	0,03	2002AJ....124.1716T	2002AJ....124.1716T
101382 B	K7 V	0,70	0,02	2002AJ....124.1716T	2002AJ....124.1716T
101955 A	K5 V	1,06	0,31	2007AstBu..62..111M	1987A&A...178..114D
101955 B	M1 V	0,69	0,20	2007AstBu..62..111M	1987A&A...178..114D
102431 A	F8 V	1,27	0,23	2010AJ....139.2308F	1999Obs...119..272G
102431 B	F9 V	1,23	0,22	2010AJ....139.2308F	1999Obs...119..272G
103055 A	G8 V*	0,75	0,09	1986A&AS...65..411H	1984Obs...104..143G
103055 B	G8 V*	0,69	0,09	1986A&AS...65..411H	1984Obs...104..143G
103641 A	G0 V*	1,21	0,06	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
103641 B	G0 V*	0,96	0,05	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
104858 A	F7 V*	1,23	0,06	2008AJ....135..766M	2008AJ....135..766M
104858 B	F7 V*	1,15	0,06	2008AJ....135..766M	2008AJ....135..766M
104987 A	G2 III	2,54	0,42	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
104987 B	A5 V	2,12	0,34	2000A&AS..145..215P	2008AJ....135..209M
106255 A	M4,5V*	0,28	0,04	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
106255 B	M4,5V*	0,16	0,02	2000A&A...364..665S	2000A&A...364..665S
106595 A	F0 V	1,47	0,13	2009ApJ...695.1527F	2009ApJ...695.1527F
106595 B	F2 V	1,30	0,11	2009ApJ...695.1527F	2009ApJ...695.1527F
108317 A	M2 I	19,40	5,97	1960AJ....65..628F	1977JRASC..71..152W
108317 B	O8 V	19,70	6,06	1960AJ....65..628F	1977JRASC..71..152W
108478 A	F3 V*	1,46	0,13	2011MNRAS.414.2479R	2010NewA...15....1B
108478 B	F3 V*	1,31	0,12	2011MNRAS.414.2479R	2010NewA...15....1B
108917 A	A3 V	1,26	0,20	2000A&AS..145..215P	1976PASP...88..944V
108917 B	F7 V	0,45	0,09	2000A&AS..145..215P	1976PASP...88..944V
109176 A	F5 V	1,38	0,03	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
109176 B	G8 V	0,86	0,02	2010ApJ...719.1293K	2010ApJ...719.1293K
111170 A	F7 V*	1,36	0,14	2000A&AS..145..215P	1988A&AS...75..167
111170 B	F7 V*	0,74	0,06	2000A&AS..145..215P	1988A&AS...75..167
111528 A	G0 IV*	1,09	0,24	2000A&AS..145..215P	1993AstL...19...73T
111528 B	G0 IV*	1,03	0,23	2000A&AS..145..215P	1993AstL...19...73T
112158 A	G2 II	3,18	0,31	1998AJ....116.2536H	1998AJ....116.2536H
112158 B	A5 V	2,02	0,20	1998AJ....116.2536H	1998AJ....116.2536H
114576 B	G3 V	1,02	0,24	2000A&AS..145..215P	1987A&A...178..114D

3. ВЫВОДЫ

Приведенные формулы (13) для расчета масс компонентов двойной звезды не единственно возможные. Они получены путем комбинации формул (5)–(7), (12), которые представляют собой математические записи известных законов физики и астрономии или выводов из них. Формулы для расчета массы могут принять и другой вид (например, при использовании соотношения $m_1/m_2 = a_2/a_1$, которое является

следствием решения задачи двух тел). Тогда и формулы для расчета погрешностей также примут другой вид. Число параметров, входящих в эти формулы, а также степень, в котором они туда входят, могут быть другими. Нами были проанализированы несколько вариантов формул для расчета массы. Анализ проведенных результатов расчетов показал, что погрешности определения масс получаются наименьшие при расчетах именно по формулам (13) и (14).

Из формул (13) также видно, что точности определения масс компонентов ожидаются меньшими для систем, которые имеют наклон орбиты i близкий к 0° или 180° , поскольку в этом случае трудно определить лучевые скорости.

Как видно из табл. 1, большинство звезд (116) — это звезды главной последовательности и всех спектральных типов: звезд типа O — 1, B — 12, A — 18, F — 38, G — 43, K — 25, M — 19, среди которых 70% принадлежит к спектральным типам F и G. Прослеживается тенденция уменьшения числа звезд с вычисленными массами в пределах спектральных типов: от G к O и от G к M.

1. Бэттен А. Двойные и кратные звезды. — М.: Мир, 1976. — 324 с.
2. Де Ягер К. Звезды наибольшей светимости. — М.: Мир, 1984. — 493 с.
3. Дейч А.Н. Двойные звезды / В кн.: Курс астрофизики и звездной астрономии, т. II. — М.: Физматгиз, 1962. — С. 60–86.
4. Захожай В.А. Массы ближайших звезд // Кинем. и физ. неб. тел. — 1994. — **10**, № 2. — С. 68–73.
5. Захожай В.А. Статистические закономерности в звездных системах: Дисс. ... д-ра физ.-мат. наук. — Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина, 2007. — 317 с.
6. Захожай В.А. Статистические свойства звезд и кратных систем в области 10 пк / В сб.: Астрономо-геодезические исследования: Близкие двойные и кратные звезды. — Свердловск: УрГУ, 1990. — С. 44–54.
7. Куто П. Наблюдения визуально-двойных звезд. — М.: Мир, 1981. — 240 с.
8. Мартынов Д.Я. Курс общей астрофизики. — М.: Наука, 1971. — 616 с.
9. Сахибулин Н.А. Методы моделирования в астрофизике. II. Определение фундаментальных параметров звезд. — Казань: Фэн, 2003. — 389 с.
10. Свечников М.А., Тайдакова Т.А. О зависимости масса-спектр для звезд главной последовательности // Астрономический журнал — 1984. — **61**, вып.1. — С. 143–151.
11. Hartkopf W.I., Mason B.D. Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars. — URL: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>. — Update: 1 January 2012.
12. Kudritzki R.P., Pauldrach A., Puls J., Abbott D.C. Radiation-driven winds of hot stars. VI — Analytical solutions for wind models including the finite cone angle effect // Astronomy and Astrophysics. — 1989. — **219**, № 1–2. — P. 205–218.
13. Leeuwen F. Validation of the new Hipparcos reduction // Astronomy and Astrophysics. — 2007. — **474**, Issue 2. — P. 653–664.
14. Pourbaix D., Tokovinin A.A., Batten A.H., et al. SB9: 9th Catalogue of Spectroscopic Binary Orbits. — URL: <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?source=B/sb9>. — Update: 02 May 2011.
15. Taylor S.F., McAlister H.A., Harvin J.A. The CHARA Catalog of Orbital Elements of Spectroscopic Binary Stars. — URL: <http://www.chara.gsu.edu/~taylor/catalogpub/catalogpub.html>. — Update: 03 January 2003.
16. Vink Jorick S., De Koter A., Lamers H.J.G.L.M. Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity // Astronomy and Astrophysics. — 2001. — **369**. — P. 574–588.
17. Von Hippel T. Main-Sequence Masses and Radii from Gravitational Redshifts // Astrophysical Journal Letters. — 1996. — **458**. — L37.

Поступила в редакцию 16.08.2012