

УДК 524.338.5:520.84

ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ДВОЙНОЙ ЗВЕЗДЫ Ве ХЕРБИГА HD 200775: НОВЫЙ МАКСИМУМ АКТИВНОСТИ И УТОЧНЕНИЕ ПЕРИОДА ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

© 2015 А. П. Бисярина*, А. М. Соболев, С. Ю. Горда, С. Ю. Парфенов

Коуровская астрономическая обсерватория, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620000 Россия

Поступила в редакцию 20 января 2015 года; принята в печать 29 апреля 2015 года

Проведено уточнение орбитального периода двойной звезды Ве Хербига HD 200775 на основе данных как новых, так и архивных наблюдений, выполненных на спектрометрах высокого разрешения в оптическом диапазоне в течение 20 лет. Новые спектральные наблюдения были проведены на 1.2-м телескопе Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета в 2012–2014 гг. и на 6-м телескопе БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН в 2013 г. Показано, что интервал этих наблюдений включает новый максимум активности HD 200775 в 2012 г. и последующий переход звезды в спокойное состояние. Подтверждено, что максимумы активности HD 200775, характеризующиеся увеличением эквивалентной ширины линии $H\alpha$, проявляются с периодичностью около 3.7 лет. По изменениям лучевых скоростей, определенных по линии $He\ I\ 5876\ \text{\AA}$, был найден стабильный орбитальный период системы $1361^{\pm 3} \pm 2^{\pm 2}$. Показано, что лучевые скорости, найденные по смещениям линии излучения $H\alpha$ и компонентам линии $He\ I\ 5876\ \text{\AA}$, возникающей в атмосфере более массивного главного компонента системы, близки по величине и синхронно меняются со временем. Наличие этой синхронизации говорит о том, что основная часть излучения линии $H\alpha$ у HD 200775 образуется в веществе, связанном с более массивным компонентом системы.

Ключевые слова: *звёзды: двойные: спектральные — звёзды: переменные: Тельца, Ae/Ве Хербига — звёзды: индивидуальные: HD 200775*

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда HD 200775 (V380 Ser, MWC 361) — яркая (видимая звездная величина порядка 7^m4) массивная звезда Ве Хербига, находящаяся на расстоянии около 430 пк от Солнца [1]. Спектральные и интерферометрические наблюдения показали, что объект представляет собой двойную систему, суммарная масса компонентов которой более $10 M_{\odot}$ (например, [2, 3]). Monnier et al. [3] и Okamoto et al. [4] наблюдали диффузное ИК-излучение от системы и интерпретировали его как излучение диска, который является общим для обоих компонентов двойной системы. Monnier et al. [5] и Benisty et al. [6] привели свидетельства наличия у главного компонента системы аккреционного диска. Этот диск образуется, вероятно, из-за аккреции вещества общего диска на главный компонент [6].

По опубликованным данным и собственным наблюдениям Мирошниченко и др. [7] сделали вывод, что эмиссионная линия $H\alpha$ звезды HD 200775 меняется с периодом около 1345^d (примерно 3.68 лет).

В 1997 г. авторы [7] наблюдали звезду в активной фазе. Фазы максимума активности отличаются повышенными значениями эквивалентной ширины линии и изменением ее профиля: вблизи максимума в профиле появляются дополнительные компоненты. Было высказано предположение, что подобные изменения связаны с двойственностью системы.

Следующие максимумы активности были зафиксированы в 2001 [8] и 2004 гг. [9]. Бескровной и др. [10] и Benisty et al. [6] было проведено исследование параметров линии $H\alpha$ на других фазах активности звезды. Времена наступления новых фаз максимума активности в целом соответствовали периоду, найденному Мирошниченко и др. [7].

Оценки орбитального периода и других параметров орбиты двойной системы были проведены различными методами. В работе [11] приведена кривая лучевых скоростей звезды HD 200775, построенная по линиям гелия. Автор использовал данные из литературы с 1994 г. и данные собственных наблюдений в 1998–2001 гг. Найденный им орбитальный период оказался равным $1180^d \pm 60^d$.

*E-mail: bisyarina_nastya@mail.ru

По данным 1994–2002 гг. Погодин и др. [8] построили кривую лучевых скоростей, определенных по биссектору линии излучения $H\alpha$ на уровне $1.5-2I_c$, а также по смещению некоторых линий поглощения. Полученный ими орбитальный период равнялся $1341^d \pm 23^d$. По предположению авторов [8] смещение линий поглощения коррелировало со смещением линии $H\alpha$. При этом точность полученных ими оценок скоростей по смещению линий поглощения была низкой по сравнению с таковыми по смещению линии излучения $H\alpha$.

По интерферометрическим наблюдениям системы в 2003–2005 гг. с использованием данных о положениях компонентов за 1998 г. из работы [12] Mognier et al. [3] получили оценки параметров орбиты и значение орбитального периода 1377 ± 25 дней.

Еще одна оценка периода была получена Alecian et al. [2]. Авторы разделили профили линий поглощения звезды HD 200775 на две компоненты. Один из компонентов системы имел узкие профили, второй — более широкие. Разделение линий на компоненты было проведено с помощью построения их синтетических профилей. По данным наблюдений 2004–2007 гг. для каждого из компонентов были построены кривые лучевых скоростей. Полученная авторами оценка орбитального периода составляла $1412^d \pm 54^d$. В работе Alecian et al. [2] присутствует отмеченное самими авторами работы противоречие: какой из компонентов системы является более массивным? По параметрам синтетических спектров авторы связали более узкую и глубокую компоненту линий с главной, более массивной, звездой. При этом из построенных ими кривых лучевых скоростей следует обратное, а именно, что узкая компонента связана с менее массивной звездой. Смещение линии $H\alpha$ коррелировало с изменением скорости компонента с широкими линиями в спектре. Авторы сделали вывод, что основная часть излучения в линии $H\alpha$ образована вблизи этого компонента двойной системы.

Benisty et al. [6] на основе данных интерферометрических наблюдений Mognier et al. [3] и лучевых скоростей из работы Alecian et al. [2] получили орбитальный период $1433^d \pm 17^d$. Интерферометрические наблюдения авторов [6] в линии $H\alpha$ были проведены с угловым разрешением порядка 2.5 mas , достаточным для пространственного разделения компонентов системы. По данным о распределении излучения в этой линии был сделан вывод о том, что оно образуется в основном вблизи массивного компонента. Вклад вещества вблизи второго компонента в линию $H\alpha$ незначителен. Авторы связывают переменность линии $H\alpha$ с переменностью звездного или дискового ветра главного компонента. Увеличение темпа потери массы, по

мнению авторов, обусловлено возрастанием темпа аккреции на главную компоненту, вызванным гравитационным возмущением от вторичного компонента при его близком прохождении в периастре.

Итак, различия полученных ранее значений орбитального периода звезды HD 200775 достигают более 200 дней, что превышает точность отдельных оценок. Одной из возможных причин такого разброса является то, что исследуемый временной интервал в предыдущих исследованиях не превышал десяти лет, что составляет менее трех орбитальных периодов порядка 3.7 лет.

Цель данной работы — проанализировать наблюдательные данные на временном интервале около 20 лет, что составляет более пяти орбитальных периодов системы. Такой временной промежуток представляется достаточным для выводов о том, изменяются ли период и параметры орбиты системы со временем. Новые наблюдения позволяют проанализировать изменение профиля линии $H\alpha$ на наличие новой прогнозируемой фазы максимума активности.

В разделе 2 данной статьи приводится информация о новых спектральных данных и использованных в работе архивных данных. В разделе 3 описывается изменение параметров профиля линии $H\alpha$ и делается вывод о наличии новой фазы максимума активности. В начале раздела 4 дается описание профилей некоторых фотосферных линий спектра. В разделе 4.1 приводятся полученные в данной работе параметры синтетического спектра звезды HD 200775, а также описывается процедура их получения. Этот синтетический спектр используется в разделе 4.2 для нахождения кривой лучевых скоростей. В этом же разделе даны уточненные в данной работе значения орбитального периода и других параметров орбиты системы. В разделе 4.3 сопоставляются скорости, определенные по смещению линии $H\alpha$ и компонент линии He I 5876 Å. В разделе 5 перечислены основные результаты работы.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе были использованы результаты спектральных наблюдений звезды HD 200775, которые проводились в период с мая 2012 г. (вблизи предполагаемого максимума активности звезды) по апрель 2014 г. на 1.2-метровом телескопе Коуровской астрономической обсерватории Уральского федерального университета (КАО УрФУ) с использованием оптоволоконного эшелле-спектрографа высокого разрешения ($R = 30\,000$ и $R = 15\,000$) [13, 14]. Рабочий диапазон длин волн — $4000-7800 \text{ Å}$ — регистрировался в 60 частично перекрывающихся порядках

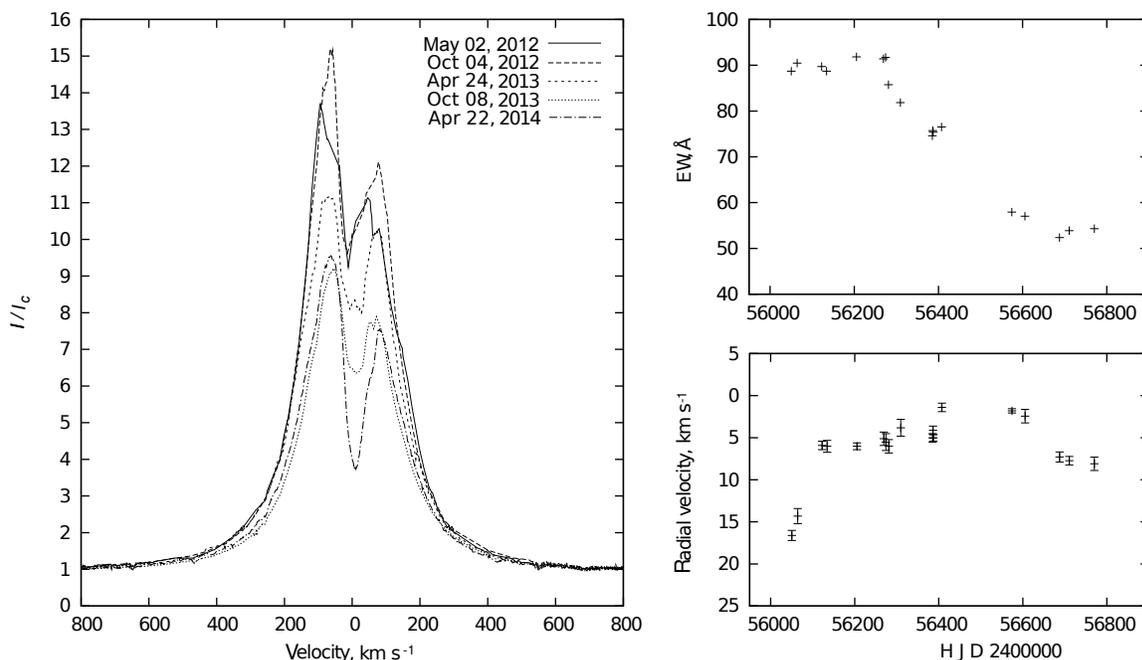


Рис. 1. Изменение параметров профиля линии $H\alpha$. На левой панели представлены профили линии в различные ночи. Вблизи максимума активности в профиле присутствовали дополнительные компоненты, в целом росла интенсивность линии. На правой верхней панели показано изменение эквивалентной ширины линии. Максимальное значение эквивалентной ширины — порядка 92 \AA (4 октября 2012 г.). На правой нижней панели представлено изменение скорости, определенной по смещению биссектора линии на уровне $1.5-2 I_c$.

эшелле-спектра. Всего было получено 17 спектров с эффективной экспозицией один час. Каждый такой снимок получался в результате медианного усреднения трех двадцатиминутных ПЗС-кадров спектра звезды для устранения влияния космических частиц.

Наряду со спектрами, полученными на 1.2-метровом телескопе КАО УрФУ, для построения общей кривой лучевых скоростей в данной работе также были использованы 19 спектров из электронных архивов обсерватории ОНР (Observatoire de Haute-Provence, Франция) и Специальной астрофизической обсерватории РАН (САО РАН). Спектры были получены на спектрографах ELODIE [15] и SOPHIE [16] 1.93-метрового телескопа обсерватории ОНР и на спектрографе НЭС [17] 6-метрового телескопа БТА САО РАН.

Для сравнения с синтетическими спектрами (см. раздел 4.1) М. В. Юшкиным 8 октября 2013 г. были получены наблюдения HD 200775 на эшелле-спектрографе НЭС САО РАН. Спектр был получен в фазе, когда относительное смещение линий двух компонентов в суммарном спектре звезды было близко к максимальному за период наших наблюдений (см. раздел 4.2). Этот спектр имеет наибольшее отношение сигнал-шум из всех использованных в данной работе спектров. Количество исследуемых спектров, даты их наблюдений,

использованные приборы и разрешение спектрографов приведены в таблице 1.

Все значения скоростей, приведенные в данной статье, являются гелиоцентрическими. Обработка данных наблюдений проводилась с помощью программного пакета Dech20T, разработанного в САО РАН и широко применяемого для работы с эшелле-спектрограммами [18]. Исследуемые линии в спектре звезды имеют широкие крылья, поэтому автоматическое определение уровня континуума затруднено и может привести к различиям в профилях линий в спектрах, полученных на разных спектрографах. Вследствие этого проведение уровня континуума выполнялось вручную. Использование единой методики позволило получить однородные данные о лучевых скоростях, что является важным при проведении оценок периода и других параметров системы.

3. ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЛИНИИ $H\alpha$ В СПЕКТРЕ ЗВЕЗДЫ HD 200775

Линия $H\alpha$ в спектре звезды HD 200775 имеет сложный профиль, который заметно менялся за время наблюдений (см. рис. 1). Крылья линии простираются до скоростей 600 км с^{-1} . В период с мая по декабрь 2012 г. максимальная интенсивность линии находилась в пределах $13-16 I_c$, где

Таблица 1. Сведения о наблюдениях

Период наблюдений	Число ночей	Обсерватория	Спектрограф	Спектральное разрешение
Aug 27, 1994–Jul 09, 1997	9	ONP	ELODIE [15]	42 000
Apr 26, 2002	1	SAO RAS	НЭС [17]	60 000
Jul 21, 2002–Oct 08, 2013	9	SAO RAS	НЭС [17]	75 000
Nov 18, 2011	1	ONP	SOPHIE [16]	40 000
May 02, 2012–Apr 24, 2013	13	КАО УрФУ	UFES [13, 14]	30 000
Nov 07, 2013–Apr 22, 2014	4	КАО УрФУ	UFES [13, 14]	15 000

I_c — уровень непрерывного спектра. В это время в профиле можно было наблюдать многочисленные компоненты, количество которых изменялось со временем. Такое изменение профиля линии $H\alpha$ характерно для фазы максимума активности звезды [8]. С января 2013 г. по апрель 2014 г. максимальная интенсивность линии существенно уменьшилась до 9–10 I_c , профиль линии стал более симметричным и близким к простому двугорбому профилю. Такой вид профиля в соответствии с результатами более ранних наблюдений характерен для периода низкой активности звезды (см., например, [7, 8]). Для каждого спектра звезды HD 200775, полученного на 1.2-метровом телескопе КАО УрФУ, а также для спектра, полученного в САО РАН, были определены эквивалентные ширины линии $H\alpha$ (см. рис. 1). Максимальное значение эквивалентной ширины наблюдалось 4 октября 2012 г. и составляло порядка 92 Å. В период с мая по декабрь 2012 г. значения эквивалентной ширины находились в пределах 85–92 Å. Эти величины характерны для фазы максимума активности звезды HD 200775 [7, 8]. Затем эквивалентная ширина линии $H\alpha$ уменьшилась, и звезда перешла в спокойное состояние. С октября 2013 г. по апрель 2014 г. эквивалентная ширина изменялась в пределах 50–60 Å. Таким образом, во второй половине 2012 г. звезда находилась вблизи фазы максимума активности, что соответствовало прогнозам Миросниченко и др. [7].

Итак, наши наблюдения подтвердили, что для линии $H\alpha$ звезды HD 200775 характерна периодическая переменность, которая может быть объяснена двойственностью системы. На текущий момент имеются данные о переменности на протяжении более пяти периодов. Это предоставляет возможность оценить параметры орбиты двойной системы по результатам наблюдений линии $H\alpha$ (подобные оценки были проведены, например, в

работе [8]). При этом необходимо сделать важное допущение, что распределение околозвездного вещества, в котором образуется излучение в крыльях линии $H\alpha$, симметрично относительно оси вращения звезды. Однако распределение околозвездного вещества может быть неоднородным и его параметры могут изменяться со временем, например, из-за взаимодействия со вторым компонентом двойной системы. В этом случае параметры орбиты, полученные по измерениям смещения $H\alpha$, могут быть неточны. Более правильным было бы измерять значение периода и орбитальных параметров звезды по фотосферным линиям.

Тем не менее оценки скорости, полученные по смещению линии $H\alpha$, важны для понимания процессов, происходящих в системе. Для сравнения с предыдущими исследованиями смещение линии $H\alpha$ было определено по биссектору линии на уровне 1.5–2 I_c , то есть на участке линии, свободном от влияния возникающих дополнительных компонент (см. рис. 1). Формальная ошибка определения скорости по смещению линии не превышала 2 км с⁻¹. Реальные ошибки полученных оценок скорости могут быть больше, в том числе из-за неточности в проведении уровня непрерывного спектра.

4. КРИВАЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

В данной работе кривые лучевых скоростей обоих компонентов двойной системы были построены по линии He I 5876 Å. Эта линия была выбрана как одна из наиболее сильных фотосферных линий в спектре, профиль которой не искажен влиянием бленд, эмиссионных компонент и пр. Немаловажным является и тот факт, что эта линия хорошо видна не только во вновь полученных спектрах, но и во всех использованных нами спектрах из архивов. Значения скоростей, измеренные по этой линии в период 1994–2001 гг., приведены в литературе [11, 19]. В профиле линии проявляется присутствие

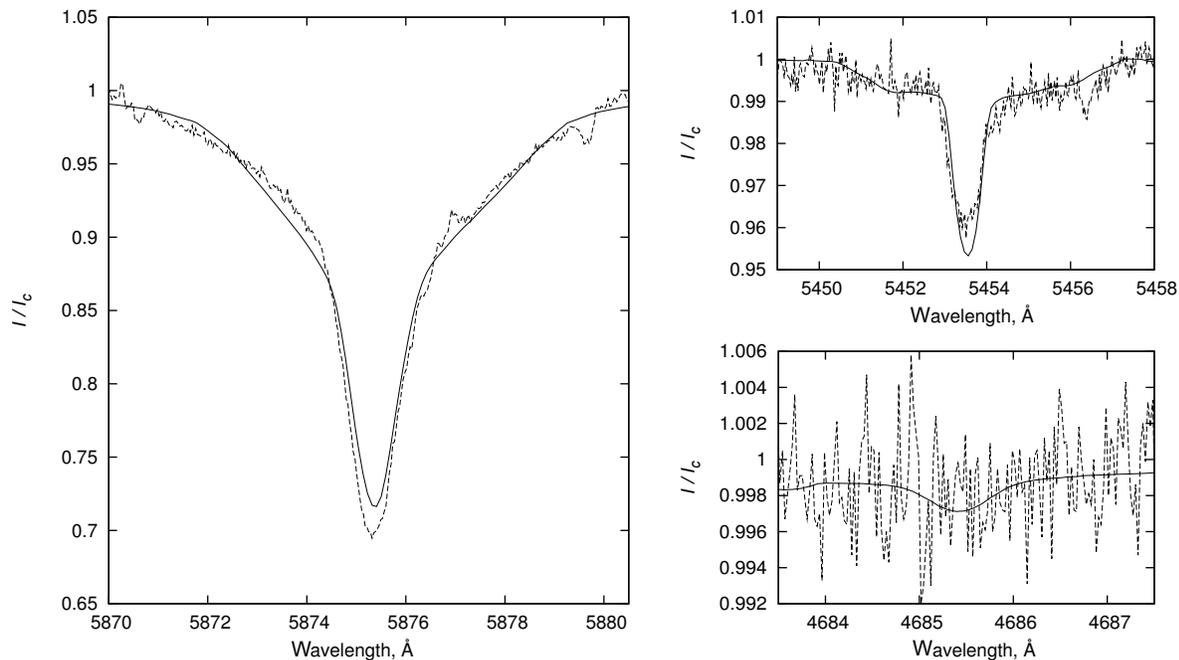


Рис. 2. Аппроксимация линий звезды HD 200775 синтетическим спектром. Левая панель — линия He I 5876 Å, правая верхняя панель — линия S II 5454 Å, правая нижняя панель — линия He II 4686 Å. Наблюдаемые спектры показаны пунктирной линией. Представлены спектры, полученные в CAO РАН 8 октября 2013 г., то есть вблизи того момента, когда относительное смещение двух компонент линий в суммарном спектре звезды было близко к максимальному за период наших наблюдений.

двух компонент, образующихся в атмосферах разных звезд, составляющих двойную систему: менее глубокой широкой компоненты, а также более глубокой узкой компоненты (см. рис. 2).

Ни в одной линии поглощения в спектрах звезды HD 200775 не наблюдалась четкая раздвоенность. В других интенсивных линиях гелия две компоненты не проявляются явным образом. Это связано с влиянием бленд или мультиплетной структурой линии, а также с трудностями в определении уровня непрерывного спектра вблизи крыльев линии. Что касается более слабых линий поглощения, большинство из них не видны или плохо видны в спектрах, полученных на 1.2-метровом телескопе КАО УрФУ. В окрестностях этих линий также возникают трудности в определении уровня непрерывного спектра. В профилях рассмотренных нами слабых линий неглубокая и широкая компонента явно не выделяется. Исключением является линия S II 5454 Å (см. рис. 2).

Компоненты линии He I 5876 Å блендируются и также не образуют раздвоенных абсорбций. Тем не менее по центру острого профиля узкой компоненты можно уверенно определять скорость соответствующей звезды, входящей в двойную систему. Параметры широкой компоненты линии определяются существенно менее уверенно. Поэтому для более точного определения скорости этой звезды в данной работе был использован метод сравнения

наблюдаемых спектров с синтетическим спектром двойной системы.

4.1. Построение синтетического спектра звезды HD 200775

Для построения синтетического спектра применялся пакет программ Synspec 48 [20]. В данной работе использовалась сетка моделей звездных атмосфер BSTAR2006 [21] с солнечной металличностью, рассчитанная с помощью программного кода Tlusty. Шаг сетки моделей по эффективной температуре равен 1000 К, а по логарифму ускорения силы тяжести — 0.25. Для свертки полученного синтетического спектра с профилем вращения звезды использовалась программа ROTIN3, входящая в пакет Synspec 48. Главной задачей моделирования было нахождение синтетического профиля, который наилучшим образом описывает наблюдаемый профиль линии He I 5876 Å.

Следует отметить, что расчеты синтетического спектра для системы HD 200775 проводились ранее в работе Alecian et al. [2]. Вычисления этих авторов, выполненные для некоторых линий поглощения, показали, что компоненты двойной системы имеют проекции скорости осевого вращения $v \sin i = 26 \text{ км с}^{-1}$ и 59 км с^{-1} . При этом если суммировать теоретические профили широкой и

узкой компонент линии He I 5876 Å, вычисленные с параметрами из работы [2], то суммарный профиль плохо описывает широкую компоненту наблюдаемого профиля. Варьируя $v_1 \sin i$ широкой компоненты, мы установили, что для получения лучшего совпадения суммарного теоретического и наблюдаемого профилей значение $v_1 \sin i$ должно быть значительно больше, чем в работе Alecian et al. [2]. По нашим предварительным оценкам, $v_1 \sin i$ находится в пределах от 150 до 200 км с⁻¹. Большие отличия в скоростях осевого вращения могут привести к значительным изменениям остальных параметров компонентов двойной системы, определенных с помощью приближения наблюдаемых профилей синтетическими спектрами. Несоответствие теоретического профиля, построенного с параметрами из работы [2], наблюдаемому не позволяет провести оценку смещения линии He I 5876 Å с помощью синтетического спектра, поэтому в данной работе была произведена новая оценка параметров компонентов двойной системы.

Чтобы построить синтетический спектр, который описывает не только линию He I 5876 Å, но и другие фотосферные линии, был использован спектр, полученный 8 октября 2013 г. на 6-метровом телескопе БТА, так как этот спектр имеет наибольшее отношение сигнал—шум из всех использованных в данной работе спектров. Предварительный анализ смещения второй компоненты в линии He I 5876 Å показал, что данный спектр был получен вблизи фазы, когда относительное смещение линий двух компонентов в суммарном спектре звезды было близко к максимальному за период наших наблюдений. Синтетический спектр строился для следующих интервалов длин волн, которые соответствуют профилям спектральных линий и небольшому участку континуума вокруг них:

- 5865–5886 Å, соответствующий линии He I 5876 Å, в профиле которой хорошо проявляется излучение обоих компонентов;
- 4683–4688 Å — линии He II 4686 Å, которая является индикатором верхней температурной границы (эта линия возникает при высоких эффективных температурах; в наблюдаемых спектрах звезды HD 200775 линия просматривается, но ее глубина мала);
- 5448–5459 Å — линии S II 5454 Å, так как зависимость остаточной интенсивности линий серы от эффективной температуры существенно отличается от таковой для линии нейтрального гелия в диапазоне температур, соответствующем оценкам спектрального класса компонентов системы.

Эти участки были выбраны еще и по той причине, что в них проведение уровня континуума в наблюдаемом спектре не вызывает больших трудностей.

При аппроксимации профилей наблюдаемых линий обоих компонентов их теоретическими аналогами параметры моделей атмосфер и синтетических спектров варьировались в следующих пределах:

- эффективная температура звезд T_{eff} от 15 000 К до 28 000 К с шагом в 1000 К;
- ускорение силы тяжести $\lg g$ (g в см с⁻²) от 2.75 до 4.75 с шагом 0.25;
- скорость микротурбулентности v_{micr} — 2, 6 и 10 км с⁻¹;
- $v_1 \sin i$ для широкой компоненты от 150 до 200 км с⁻¹ с шагом 10 км с⁻¹;
- $v_2 \sin i$ для узкой компоненты от 20 до 30 км с⁻¹ с шагом 5 км с⁻¹.

Для широкой компоненты мы использовали диапазон $v_1 \sin i$, соответствующий нашим предварительным оценкам. Для узкой компоненты был рассмотрен узкий диапазон $v_2 \sin i$, так как профиль рассматриваемых нами линий хорошо описывается значением скорости осевого вращения, полученным ранее в работе [2]. При построении синтетического спектра отклонения от солнечного содержания элементов не рассматривались, как и в работе [2].

Для определения параметров синтетических спектров использовалась процедура предварительного анализа, при которой рассматривалось только совпадение остаточной интенсивности в центре линии без учета расхождений в форме профиля. Для каждой из перечисленных выше линий определялся диапазон остаточных интенсивностей компонент в наблюдаемом спектре с учетом уровня шума и ошибок в проведении уровня континуума. Для каждого набора параметров (T_{eff} , $\lg g$, v_{micr} и $v \sin i$) строился синтетический спектр. Затем для каждой линии автоматически вычислялся диапазон возможных значений коэффициентов c_1 и c_2 , задающих вклады остаточных интенсивностей компонент в суммарный спектр. Возможные значения коэффициентов определялись в результате сравнения интенсивностей компонент в синтетическом профиле с соответствующими интенсивностями, определенными по наблюдаемому спектру. Наличие разброса в наблюдаемых значениях приводит к тому, что возможные значения коэффициентов c_1 и c_2 распределены в пределах соответствующих диапазонов. После этого значения диапазонов для разных линий сравнивались между собой. В результате для некоторого заданного набора параметров (T_{eff} , $\lg g$, v_{micr} и $v \sin i$) находился диапазон

Таблица 2. Параметры синтетических спектров для звезды HD 200775

№	T_{eff_1} , K	$\lg g_1$	v_{micr_1} , км с ⁻¹	$v_1 \sin i$, км с ⁻¹	c_1	T_{eff_2} , K	$\lg g_2$	v_{micr_2} , км с ⁻¹	$v_1 \sin i$, км с ⁻¹	c_2
1	19000	4.75	2	180	0.57	17000	4.5	2	30	0.43
2	21000	4.5	2	160	0.59	22000	4.5	2	20	0.41
3	22000	4.5	2	170	0.60	22000	4.5	2	25	0.40

значений коэффициентов c_1 и c_2 , который являлся общим для всех рассматриваемых спектральных линий и для которого удовлетворялось равенство суммы коэффициентов единице: $c_1 + c_2 = 1$. Для другого набора параметров (T_{eff} , $\lg g$, v_{micr} и $v \sin i$) находился свой диапазон значений коэффициентов c_1 и c_2 . В рассматриваемых диапазонах дополнительно определялось отношение масс M_1/M_2 . При этом использовалось соотношение:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{M_1}{M_2} \left(\frac{T_{\text{eff}_1}}{T_{\text{eff}_2}} \right)^4 \frac{g_2}{g_1}, \quad (1)$$

где $L_1/L_2 = c_1/c_2$ — отношение светимостей компонентов. По оценкам предыдущих исследований отношение масс M_1/M_2 составляет порядка 1.2 [2, 6], поэтому в нашей работе мы рассматривали только модели, в которых отношение масс звезд системы не превышало 3.

В результате предварительного анализа из всего диапазона рассматриваемых параметров синтетических спектров удалось выделить 15 наборов T_{eff} и $\lg g$, удовлетворяющих приведенным выше критериям. Для всех отобранных синтетических спектров скорость микротурбулентности оказалась равной 2 км с⁻¹. Диапазон значений коэффициентов c_1 и, соответственно, c_2 для всех наборов параметров получился довольно узким: коэффициенты c_1 лежат в пределах от 0.568 до 0.615.

При таком предварительном анализе не учитывались расхождения в форме профиля. Поэтому далее 15 синтетических спектров сравнивались «на глаз» с наблюдаемым путем совмещения профилей с учетом возможных сдвигов по оси скоростей, вычисленных диапазонов коэффициентов c_1 и c_2 и значений скоростей вращения. В результате для дальнейшего рассмотрения было отобрано три синтетических спектра, параметры которых приведены в таблице 2. Остальные 12 синтетических спектров имели формы профилей, значительно отличающиеся от наблюдаемых. Спектр номер 3 из таблицы 2 соответствовал наименьшей сумме квадратов отклонений остаточных интенсивностей синтетического спектра от наблюдаемого. Именно этот спектр был использован в дальнейшем для нахождения скоростей компонентов системы. Полученный результат аппроксимации профилей линий

показан на рис. 2. При таком наборе параметров отношение масс компонентов двойной системы, полученное по формуле (1), равно 1.5 ± 0.6 . Приведенная ошибка была получена с учетом выражения (1) в предположении, что ошибки T_{eff} и $\lg g$ равны шагу сетки моделей атмосфер, деленному пополам.

4.2. Построение кривой лучевых скоростей по линии He I 5876 Å

Построение кривой лучевых скоростей, нахождение возможного стабильного орбитального периода и других параметров орбиты двойной системы выполнялось с использованием данных о лучевых скоростях, определенных по смещению узкой компоненты линии He I 5876 Å. Точность определения лучевой скорости по смещению более узкой компоненты существенно выше точности определения по широкой компоненте. Ее величина слабо зависела от ошибок проведения уровня непрерывного спектра. Использование данных из электронных архивов позволило увеличить исследуемый временной интервал до 20 лет.

Оценка скорости по смещению узкой компоненты для всех спектров, включая спектры из архивов, осуществлялась методом зеркального отражения с помощью программного пакета Dech20T. Для минимизации неопределенности, связанной с проведением уровня континуума, при определении смещения мы ориентировались на ядро линии, то есть на участок профиля с остаточной интенсивностью менее 0.8 (см. рис. 2). Результаты измерений представлены в таблице 3. Среднеквадратическая ошибка определения скорости по смещению узкой компоненты не превосходит 3.5 км с⁻¹.

Так как широкую компоненту трудно выделить в профиле линии He I 5876 Å, смещения этой компоненты находились с помощью синтетического спектра. Для определения параметров орбиты важна однородность оценки смещения компоненты. Оценка смещения широкой компоненты линии существенно зависит от того, как проведен уровень непрерывного спектра. Поскольку для различных инструментов проведение непрерывного спектра отличается, для обеспечения однородности мы оценивали смещение широкой компоненты только по

Таблица 3. Лучевые скорости, определенные по смещению широкой (V_1) и узкой (V_2) компонент линии He I 5876 Å прямым измерением (V^M) или с помощью синтетического спектра (V^S)

HJD 2400000+	V_2^M	ΔV_2^M	S/N	Спектро- граф	HJD 2400000+	V_1^S	ΔV_1^S	V_2^S	ΔV_2^S	V_2^M	ΔV_2^M	S/N	Спектро- граф
49591.624	-17.2	3.2	201	ELODIE	56050.274	-19	7	0.4	1.0	0.7	3.0	72	UFES
49595.45	-16.8	3.2	72	ELODIE	56064.341	-23	9	-3.9	2.5	-3.0	3.0	65	UFES
49675.367	-16.7	3.2	69	ELODIE	56122.299	-11	9	-3.2	2.3	-3.0	3.5	32	UFES
49875.591	-11.2	3.2	224	ELODIE	56134.330	-12	8	-6.1	1.9	-6.5	3.5	44	UFES
49940.532	-10.5	3.2	66	ELODIE	56205.378	-8	4	-12.7	1.0	-13.6	2.5	120	UFES
49968.411	-11	3.2	77	ELODIE	56269.190	-7	6	-15.5	1.4	-15.0	3.5	45	UFES
50293.608	2.7	3.2	110	ELODIE	56274.327	-7	5	-15	1.2	-16.8	3.5	42	UFES
50635.559	-2.3	3.2	162	ELODIE	56281.179	-6	7	-16.7	1.7	-16.5	3.5	30	UFES
50638.501	-1.2	3.2	202	ELODIE	56309.503	-4	7	-16.4	1.9	-16.6	3.5	35	UFES
52391.461	-16.7	2.1	240	НЭС	56385.420	-5	9	-16.1	2.2	-15.4	3.5	25	UFES
52477.237	-15.5	2.1	315	НЭС	56386.398	-2	5	-17.2	1.3	-19.0	3.5	45	UFES
53285.447	4.6	2.1	185	НЭС	56387.407	-2	4	-18.6	1.1	-18.7	3.5	50	UFES
53424.627	-7.9	2.1	254	НЭС	56407.400	0	5	-18.3	1.2	-18.1	3.5	40	UFES
53425.610	-7.3	2.1	230	НЭС	56574.276	-4	3	-16.4	0.6	-17.5	1.1	340	НЭС
53607.248	-7.1	2.1	295	НЭС	56605.331	-3	3	-14.4	0.8	-12.5	2.8	70	UFES
55113.412	-15.9	2.1	146	НЭС	56688.179	-6	3	-13.4	0.7	-15.0	2.2	83	UFES
55460.414	-7.9	2.1	255	НЭС	56710.520	-8	3	-13.2	0.7	-13.8	2.2	92	UFES
55461.409	-9.6	2.1	298	НЭС	56770.374	-6	4	-12	0.9	-10.9	2.2	78	UFES
55883.649	6.9	2.8	130	SOPHIE									

спектрам, полученным на одном и том же инструменте. Большинство спектров, использованных в данной работе, получено на 1.2-метровом телескопе КАО УрФУ. Именно эти спектры мы и выбрали для построения кривой лучевых скоростей звезды с широкими профилями в спектре и определения смещения компонент линий путем аппроксимации наблюдаемых профилей линии He I 5876 Å профилям в синтетическом спектре двойной системы.

Синтетический спектр двойной системы получался суммированием синтетических спектров обоих компонентов с фиксированными параметрами из строки 3 таблицы 2 и со значениями лучевых скоростей двух компонентов, которые являлись свободными параметрами и изменялись непрерывно. Для нахождения лучевых скоростей компонентов, при которых отклонения наблюдаемого профиля от теоретического минимально, использовалась процедура, входящая в состав пакета программ SciPy,

реализующая нелинейный метод наименьших квадратов Марквардта. Таким способом были определены лучевые скорости двух компонентов двойной системы в 18 новых спектрах, полученных в ходе данного исследования (см. таблицу 3). В зависимости от соотношения сигнал-шум в наблюдаемом спектре и пр. формальные ошибки определения скорости по смещению широкой компоненты линии, рассчитываемые процедурой, реализующей метод Марквардта, находились в пределах от 3 до 9 км с⁻¹. Ошибки определения скорости по смещению узкой линии не превосходили величины 2.5 км с⁻¹. Различия в значениях скорости звезды с узкими профилями, полученных с помощью синтетических спектров и ранее прямыми измерениями, не превышают 2 км с⁻¹. Таким образом, изменение формы суммарного профиля за счет смещения широкой компоненты не влияет существенно на измерение скорости компонента с узкими профилями,

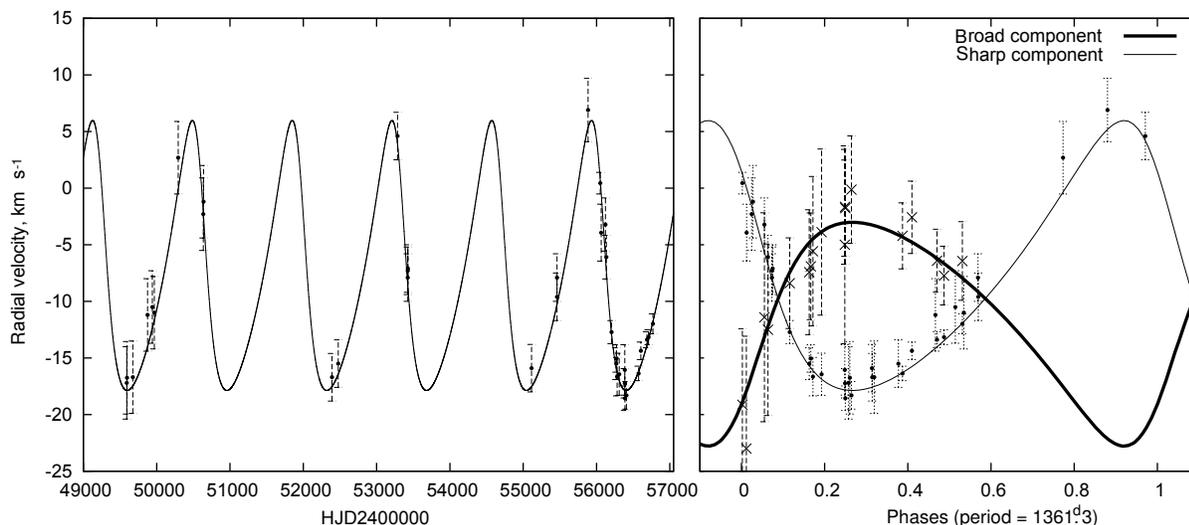


Рис. 3. Кривые лучевых скоростей, построенные по смещению линии He I 5876 Å. На левой панели показано изменение лучевых скоростей узкой компоненты линии со временем. На правой панели — кривые лучевых скоростей обоих компонентов системы как функции орбитальной фазы. Жирной линией показана кривая лучевых скоростей по широкой компоненте линии; крестики с барами ошибок — результаты измерения ее значений в наблюдаемых спектрах. Тонкая линия — кривая лучевых скоростей по узкой компоненте линии; точки с барами ошибок — результаты измерений по архивным и новым, полученным в ходе данной работы, спектрам.

полученной по смещению ядра линии. Для нахождения параметров орбиты в дальнейшем использовались оценки скорости по узкой компоненте линии He I 5876 Å, полученные с помощью синтетических спектров.

Полученный с помощью программы CLEAN Фурье-спектр временного ряда лучевых скоростей, определенных по смещению узкой компоненты линии He I 5876 Å, имел заметный пик, который более чем в десять раз превышал уровень шума. Этот пик соответствовал орбитальному периоду 1362 дня. Такое значение периода было использовано в качестве начального приближения для дальнейшего анализа.

Теоретическая кривая лучевых скоростей может быть описана следующими параметрами: полуамплитудой K , периодом P , моментом прохождения перицентра орбиты T_0 , долготой перицентра w , эксцентриситетом e , скоростью центра масс системы V_c . Все шесть параметров неизвестны. Их значения и ошибки определения находились с помощью метода Марквардта путем минимизации суммы квадратов отклонений временного ряда скоростей компонента с узкими профилями, полученного из наблюдений, от теоретической кривой вида:

$$V(t) = V_c + K \cos(\theta(t) + w) + e \cos w, \quad (2)$$

где V — лучевая скорость компонента, θ — истинная аномалия, которую можно выразить через P и T_0 и момент времени t . В качестве начальных значений всех параметров, кроме периода, мы использовали произвольные значения.

Теоретическая кривая лучевых скоростей (2) хорошо аппроксимирует наблюдательные данные (см. рис. 3). Параметры орбиты, найденные нами по кривой лучевых скоростей линии He I 5876 Å, а также данные других авторов представлены в таблице 4. Долгота перицентра w определяется неоднозначно, но ее значение не оказывает существенного влияния на оценки других параметров, в частности, периода P . В результате аппроксимации наблюдаемой кривой лучевых скоростей теоретической кривой было получено уточненное значение орбитального периода двойной системы, равное 1361.3 ± 2.2 д. Стоит отметить, что данная оценка периода совпадает в пределах ошибок измерений с начальной оценкой, приведенной выше и полученной из анализа Фурье-спектра временного ряда лучевых скоростей компонента с узкими профилями в спектре.

На основе этих данных была также оценена полуамплитуда кривой лучевых скоростей компонента системы, ответственного за образование широкой линии He I 5876 Å. При проведении процедуры аппроксимации кривой лучевых скоростей этого компонента теоретической кривой все параметры, кроме полуамплитуды, фиксировались на значениях, полученных по узкой линии. Значение полуамплитуды представлено в таблице 4. Найденное значение отношения масс компонентов $q = K_2/K_1 = M_1/M_2 = 1.21$ согласуется с результатами предыдущих исследований [2, 6]. Таким образом, широкая и менее глубокая компонента

Таблица 4. Параметры орбиты двойной системы

Параметры	Эта работа, He I 5876 Å	Pogodin et al. [8], H α	Ismailov [11], He lines	Monnier et al. [3], интерферометрия	Alecian et al. [2], синт. спектр	Benisty et al. [6], орбита + линии
Period, days	1361.3 \pm 2.2	1341 \pm 23	1180 \pm 60	1377 \pm 25	1412 \pm 54	1433 \pm 17
T_0 , HJD 2400000+	49241 \pm 14	49149 \pm 87	52157	49152 \pm 90	48991 \pm 152	48962 \pm 55
V_c , km s $^{-1}$	-9.7 \pm 2.6	-5 \pm 0.6	5 \pm 0.3	—	-7.9 \pm 0.9	-8.1 \pm 0.3
w , deg	234 \pm 4	203 \pm 22	251 \pm 5	224 \pm 16	216 \pm 12	224 \pm 1
e	0.295 \pm 0.025	0.29 \pm 0.07	0.103 \pm 0.010	0.30 \pm 0.06	0.32 \pm 0.06	0.30 \pm 0.02
K_1 , km s $^{-1}$	9.9 \pm 0.6	11.2 \pm 0.7	—	—	17.0 \pm 2.5	16.1 \pm 0.5
K_2 , km s $^{-1}$	11.92 \pm 0.29	—	15.5 \pm 0.5	—	20.9 \pm 2.5	19.8 \pm 0.5

линии образуется в атмосфере главной, более массивной, звезды двойной системы.

Полуамплитуды кривых лучевых скоростей, найденные нами по линии He I 5876 Å, в отличие от других параметров оказались существенно меньше значений, определенных в предыдущих исследованиях (см. таблицу 4). Скорее всего, на точность ранних оценок полуамплитуд кривых лучевых скоростей повлиял недостаток наблюдательных данных на тех фазах, где лучевая скорость менее массивной звезды системы принимает максимальное значение. Масса M_1 компонента, имеющего широкие линии в спектре, примерно равна $0.6 M_\odot / \sin^3 i$, где i — угол наклона плоскости орбиты (угол между лучом зрения и перпендикуляром к плоскости орбиты). Если принять величину угла $i = 65^\circ$, приведенную в работе [3], то из найденных нами значений $M_1 \sin^3 i \approx 0.6 M_\odot$ и $M_1/M_2 = 1.21$ оценки масс компонентов получаются $M_1 \approx 0.8 M_\odot$ и $M_2 \approx 0.7 M_\odot$, что много меньше ожидаемых для составляющих данную систему В-звезд. Типичные для звезд Ве Хербига массы $M_1 \approx 10 M_\odot$ можно получить при значении угла $i \approx 23^\circ$. Причина этого расхождения неясна. Оно может быть вызвано в том числе сложностью измерения орбит по ИК-наблюдениям в объекте, содержащем протяженный диск, который ярко излучает в ИК-диапазоне [4]. В результате могли быть завышены значения угла наклона i .

4.3. Изменение положения линии H α

Было проведено сравнение лучевых скоростей, определенных по смещениям компонент фотосферной линии He I 5876 Å и эмиссионной линии H α , образующейся в аккреционных дисках или истечениях (см. рис. 4). Из рисунка видно, что оценки

скоростей, полученные по смещению линии H α и широкой компоненте линии He I 5876 Å, близки по величине и синхронно меняются со временем. Следовательно, основная часть излучения в линии H α образуется в веществе, связанном с главным компонентом системы.

5. ВЫВОДЫ

В работе было проведено исследование изменения линий He I 5876 Å и H α в спектре двойной системы HD 200775. Спектральные наблюдения звезды на 1.2-метровом телескопе Коуровской астрономической обсерватории УрФУ проводились с мая 2012 г. (то есть вблизи предполагаемого максимума активности звезды) по апрель 2014 г. В ходе работы было подтверждено наступление нового максимума активности звезды во второй половине 2012 г. и ее последующий переход в спокойное состояние. В максимуме активности эквивалентная ширина линии H α возросла и изменялась в пределах 85–92 Å. Ее профиль имел сложный вид со множеством дополнительных компонент. С октября 2013 г. по апрель 2014 г. эквивалентная ширина линии уменьшилась до значений 50–60 Å.

Построен синтетический спектр двойной системы в окрестностях линий He I 5876 Å, He II 4686 Å и S II 5454 Å. Наилучшее приближение наблюдаемого спектра теоретическим реализуется при следующих параметрах компонентов двойной системы:

- $T_{\text{eff}1} = T_{\text{eff}2} = 22\,000$ К;
- $\lg g_1 = \lg g_2 = 4.50$;
- $v_1 \sin i = 170$ км с $^{-1}$, $v_2 \sin i = 25$ км с $^{-1}$;
- $c_1 = 0.60$, $c_2 = 0.40$.

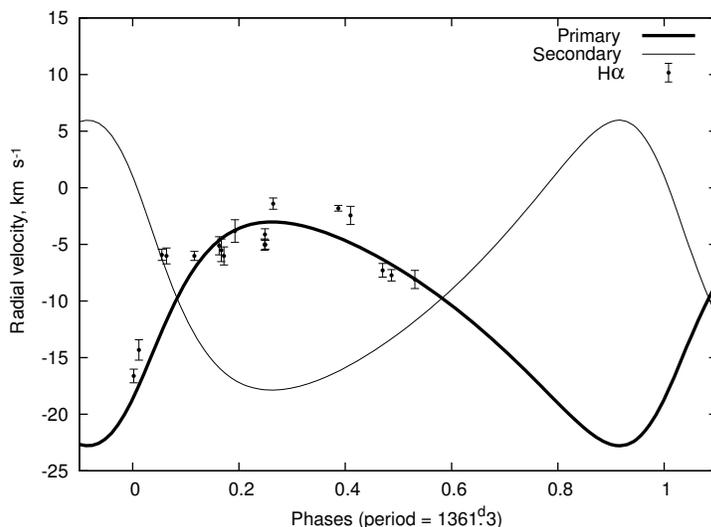


Рис. 4. Сравнение скоростей, определенных по смещению линии $H\alpha$ и компонентам линии $He I 5876 \text{ \AA}$. Жирной линией показана кривая лучевых скоростей для главного компонента системы, тонкой — для вторичного. Точки с барами ошибок — скорости, определенные по смещению биссектора линии $H\alpha$. По горизонтальной оси — орбитальная фаза. Скорость, определенная по смещению линии $H\alpha$, близка к скорости главного (более массивного) компонента системы.

При таком наборе параметров отношение масс компонентов двойной системы равно 1.5 ± 0.6 . При этом более широкая и менее глубокая компонента линии образована в атмосфере более массивного главного компонента системы.

Построена кривая лучевых скоростей, определенных по смещениям фотосферной линии $He I 5876 \text{ \AA}$. Полученная кривая хорошо аппроксимирует наблюдательные данные. Использование данных из электронных архивов позволило расширить исследуемый временной интервал до 20 лет, то есть охватить более пяти орбитальных периодов двойной системы. Показано, что на рассмотренном временном интервале существует решение со стабильным орбитальным периодом, равным 1361.3 ± 2.2 суток. По отношению амплитуд кривых лучевых скоростей получена оценка отношения масс компонентов двойной системы, равная 1.21.

Показано, что скорость, определенная по смещению линии $H\alpha$, близка к скорости главного компонента системы, то есть линия $H\alpha$ образована в веществе, связанном с главным компонентом. Фазы активности, при которых эквивалентная ширина линии $H\alpha$ была более 80 \AA , наблюдались в течение 260 дней в начале наших наблюдений (со 2 мая 2012 г. по 16 января 2013 г.). Согласно полученным в работе оценкам параметров орбиты, прохождение компонентами своих перицентров произошло примерно за три дня до начала наших наблюдений. Следует также отметить, что момент соединения в двойной системе (то есть момент пересечения кривых лучевых скоростей) по нашим оценкам наступает примерно через 115 дней после прохождения перицентра.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят М. В. Юшкина за проведение наблюдений на 6-м телескопе САО РАН. Основные результаты получены на оборудовании уникальной научной установки «Коуровская астрономическая обсерватория». Работы проведены при финансовой поддержке государства в лице Министерства образования и науки Российской Федерации (проектная часть государственного задания № 3.1781.2014/К, уникальный идентификатор проекта RFMEFI59114X0003; соглашение № 14.619.21.0004, идентификатор проекта RFMEFI61914X0004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. M. E. van den Ancker, P. S. The, H. R. E. Tjin A Dje, et al., *Astron. and Astrophys.* **324**, L33 (1997).
2. E. Alecian, C. Catala, G. A. Wade, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **385**, 391 (2008).
3. J. D. Monnier, J.-P. Berger, R. Millan-Gabet, et al., *Astrophys. J.* **647**, 444 (2006).
4. Y. K. Okamoto, H. Katata, M. Honda, et al., *Astrophys. J.* **706**, 665 (2009).
5. J. D. Monnier, P. G. Tuthill, M. Ireland, et al., *Astrophys. J.* **700**, 491 (2009).
6. M. Benisty, K. Perraut, D. Mourard, et al., *Astron. and Astrophys.* **555**, A113 (2013).
7. A. S. Miroshnichenko, C. L. Mullis, K. S. Bjorkman, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 883 (1998).
8. M. A. Pogodin, A. S. Miroshnichenko, A. E. Tarasov, et al., *Astron. and Astrophys.* **417**, 715 (2004).
9. N. Z. Ismailov and A. A. Aliyeva, *Inform. Bull. Var. Stars*, No. 5634 (2005).

10. N. G. Beskrovnaya, M. A. Pogodin, A. G. Shcherbakov, and A. E. Tarasov, *Astron. and Astrophys.* **287**, 564 (1994).
11. N. Z. Ismailov, *Astronomy Reports* **47**, 206 (2003).
12. R. Millan-Gabet, F. P. Schloerb, and W. A. Traub, *Astrophys. J.* **546**, 358 (2001).
13. V. E. Panchuk, M. V. Yushkin, and M. V. Yakopov, *Astrophysical Bulletin* **66**, 355 (2011).
14. V. V. Krushinsky, A. A. Popov, and A. F. Punanova, *Astrophysical Bulletin* **69**, 497 (2014).
15. A. Baranne, D. Queloz, M. Mayor, et al., *Astron. and Astrophys. Suppl.* **119**, 373 (1996).
16. S. Perruchot, D. Kohler, F. Bouchy, et al., *Proc. SPIE* **7014**, 12 (2008).
17. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *J. Optical Technology* **76**, 42 (2009).
18. Г. А. Галазутдинов, Препринт № 92 (Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 1992).
19. M. A. Pogodin, A. S. Miroshnichenko, K. S. Bjorkman, et al., *Astron. and Astrophys.* **359**, 299 (2000).
20. I. Hubeny and T. Lanz, *Astron. and Astrophys.* **262**, 501 (1992).
21. T. Lanz and I. Hubeny, *Astrophys. J. Suppl.* **169**, 83 (2007).

Optical Spectroscopic Monitoring of the Herbig Be Binary Star HD 200775: New Maximum of Activity and Refinement of the Orbital Period

A. P. Bisyarina, A. M. Sobolev, S. Yu. Gorda, and S. Yu. Parfenov

We refined the orbital period of the Herbig Be binary star HD 200775 using both new and archive observed data which has been obtained with high-resolution spectrometers at optical wavelengths over 20 years. The new spectroscopic observations were performed with the 1.2-m telescope of the Kourovka Astronomical Observatory of Ural Federal University during 2012–2014 and the 6-m BTA telescope of the Special Astrophysical Observatory in 2013. We show that the period of these observations has a new maximum of activity in 2012 and the following transition of the star to the quiescent state. We confirmed that activity maxima of HD 200775, which are characterized by the increase of the H α equivalent width, appear at intervals of about 3.7 years. A stable orbital period of the system of $1361^{\text{d}}3 \pm 2^{\text{d}}2$ days was found from radial velocity variations obtained for the He I 5876 Å line. It is shown that the radial velocities determined from the H α emission line and the He I 5876 Å absorption line, which is formed in the photosphere of the more massive primary component of the system, are close and change synchronously with time. This synchronization indicates the fact that the major portion of the HD 200775 H α emission originates in the material associated with the more massive component of the system.

Keywords: stars: binaries: spectroscopic—stars: variables: TTauri, Herbig Ae/Be—stars: individual: HD 200775