

УДК 524.3-3:52.13/17

## УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРЕДКАТАКЛИЗМИЧЕСКОЙ ПЕРЕМЕННОЙ С sdB-СУБКАРЛИКОМ SDSS J162256.6+473051

© 2022 Н. Р. Дёминова<sup>1\*</sup>, В. В. Шиманский<sup>2</sup>, Н. В. Борисов<sup>2</sup>, Э. Н. Иртуганов<sup>1,3</sup><sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>3</sup>Академия наук Республики Татарстан, Казань, 420013 РоссияПоступила в редакцию 8 февраля 2022 года; после доработки 13 сентября 2022 года;  
принята к публикации 14 сентября 2022 года

В работе представлены результаты уточнения характеристик затменной предкатаклизмической переменной SDSS J162256.6+473051 на основе модельного анализа ее оптического излучения. Используются спектры системы, полученные на 6-м телескопе БТА САО РАН, и данные ее многополосных фотометрических наблюдений на 1.5-м Российско-Турецком телескопе РТТ-150. Расчеты оптического излучения SDSS J162256.6+473051 проводились с применением метода моделей облучаемых атмосфер. При анализе спектров системы в минимуме блеска найдены оценки параметров атмосферы sdB-субкарлика:  $T_{\text{eff}} = 30\,900 \pm 700$  К,  $\lg g = 5.85 \pm 0.12$ ,  $[\text{He}/\text{H}] = -0.57 \pm 0.05$ . Проведено моделирование кривых блеска SDSS J162256.6+473051 и получен полный набор фундаментальных параметров системы. Их удовлетворительное соответствие литературным данным позволяет сделать вывод о том, что характеристики аналогичных систем со слабыми эффектами отражения могут анализироваться совместно даже при их определении с помощью разных методов моделирования излучения.

Ключевые слова: звезды: фундаментальные параметры — методы: наблюдательные — методы: численные — звезды: отдельные: SDSS J162256.6+473051

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Предкатаклизмические переменные (ПП) являются одной из групп разделенных тесных двойных систем (ТДС). Они были выделены в отдельный класс Риттером (Ritter 1986). Главным компонентом этих систем является горячий субкарлик или остывающий белый карлик, а вторичным компонентом — звезда-карлик позднего спектрального класса. Критическое различие характеристик компонентов приводит к формированию в ПП эффектов отражения. Они обусловлены облучением поверхности холодного спутника жестким ультрафиолетовым излучением горячей звезды с его поглощением и частичной переработкой в оптическое. По своему эволюционному статусу ПП занимают промежуточное положение между системами с общей оболочкой (ОО) и катаклизмическими переменными (КП). Принято разделять класс ПП на три группы в зависимости от эволюционной природы и физического состояния главных компонентов: молодые ПП с sdO-субкарликами (время эволюции после стадии ОО  $t < 2 \times 10^6$  лет) или с

sdB-субкарликами ( $t < 5 \times 10^6$  лет) и старые ПП с остывающими белыми карликами ( $t > 10^7$  лет) (Shimansky et al. 2003).

Молодые ПП с sdB-субкарликами относятся к звездам типа HW Vir и встречаются довольно редко. Изучение таких объектов представляет интерес для развития теории эволюции ТДС, в том числе для понимания физики существования систем в стадии ОО. Однако звезды типа HW Vir недостаточно изучены из-за методических сложностей их обнаружения и анализа. Основной проблемой является доминирование в оптическом диапазоне излучения sdB-субкарлика. По этой причине наблюдаемые спектры объектов содержат только абсорбционные линии главных компонентов и не позволяют получить информацию о физическом состоянии и о характеристиках их холодных спутников.

Система SDSS J162256.66+473051.1 (далее SDSS J162256), принадлежащая, согласно Ritter (1986), к типу HW Vir, является молодой ПП и показывает слабые эффекты отражения ( $\Delta m < 0^{\text{m}}1$ ). Schaffenroth et al. (2014) определили фундаментальные параметры этой системы: орбитальный период  $P = 0^{\text{d}}0697885$ , размер большой

\*E-mail: nellyrd@mail.ru

полуоси  $a = 0.58 \pm 0.02 R_{\odot}$ , угол наклона орбиты  $i = 72^{\circ}33 \pm 1^{\circ}11$ , массы, радиусы и эффективные температуры компонентов, соответственно  $M_1 = 0.48 \pm 0.03 M_{\odot}$ ,  $M_2 = 0.064 \pm 0.004 M_{\odot}$ ,  $R_1 = 0.168 \pm 0.007 R_{\odot}$ ,  $R_2 = 0.085 \pm 0.004 R_{\odot}$ ,  $T_1 = 29\,000 \pm 600$  К и  $T_2 = 2500 \pm 900$  К, а также силу тяжести на поверхности sdB-субкарлика  $\lg g_1 = 5.65 \pm 0.06$ . Индексом «1» здесь и далее по тексту обозначены параметры главного компонента, а индексом «2» — параметры вторичного. Полуамплитуда лучевой скорости главного компонента и гамма-скорость составили  $K_1 = 47.2 \pm 2.0$  км с<sup>-1</sup> и  $\gamma = -54.7 \pm 1.5$  км с<sup>-1</sup> соответственно. В работе Deminova et al. (2020) с применением метода моделей облучаемых атмосфер мы провели анализ оптического излучения SDSS J162256 с переопределением части ее параметров.

Заметим, что в исследовании Schaffneroth et al. (2014) расчеты эффектов отражения проводились на основе чернотельного приближения. При таком подходе отказ от моделирования облучаемой атмосферы приводит к невозможности физически корректно оценить и должным образом учесть ряд важных параметров: эффективность переработки внешнего излучения, коэффициент потемнения к краю, влияние абсорбционных и эмиссионных линий на интегральное излучение и т.д. Как правило, они заменяются приближениями, задаваемыми из анализа результатов наблюдений или выбираемыми авторами по иным соображениям. Метод моделей атмосфер позволяет достаточно корректно вычислить данные характеристики, что с одной стороны сокращает число неизвестных параметров систем, а с другой — повышает точность их определения. Отметим, что чернотельное приближение используется в подавляющем большинстве работ по исследованию эффектов отражения у звезд типа HW Vir. Поэтому для общего статистического анализа его результатов совместно с результатами, предлагаемыми методом моделей атмосфер, полезно сравнить их для нескольких общих звезд. В работе Deminova et al. (2020) метод моделей атмосфер применен при анализе кривых блеска и лучевых скоростей sdB-субкарлика без учета оптических спектров SDSS J162256. В результате оценки параметров атмосферы этой звезды могут содержать неопределенности, влияющие на корректность последующего модельного анализа кривых блеска. Кроме того, при рассмотрении изменений блеска в работе Deminova et al. (2020) не учитывалось влияние ошибок оценки параметров (температуры главного компонента, масс компонентов и размеров большой полуоси системы на определяемые величины радиусов звезд и угла наклона орбиты).

Руководствуясь такими соображениями, в данной работе мы провели комплексный модельный анализ спектров и кривых блеска с уточнением всех параметров SDSS J162256. Данный подход применяется нами при изучении и других систем типа HW Vir, что позволит в дальнейшем провести статистический анализ их параметров, полученных однотипным образом. В настоящей работе мы анализируем тот же набор фотометрических данных, что и использованный нами ранее в работе Deminova et al. (2020), включив дополнительно в рассмотрение результаты спектроскопии SDSS J162256. Наблюдательный материал и детали его обработки описаны в Разделе 2. В Разделе 3 представлены методика моделирования кривых блеска и спектров, а также результаты определения параметров системы. В Разделе 4 приведен анализ результатов и даны общие выводы работы.

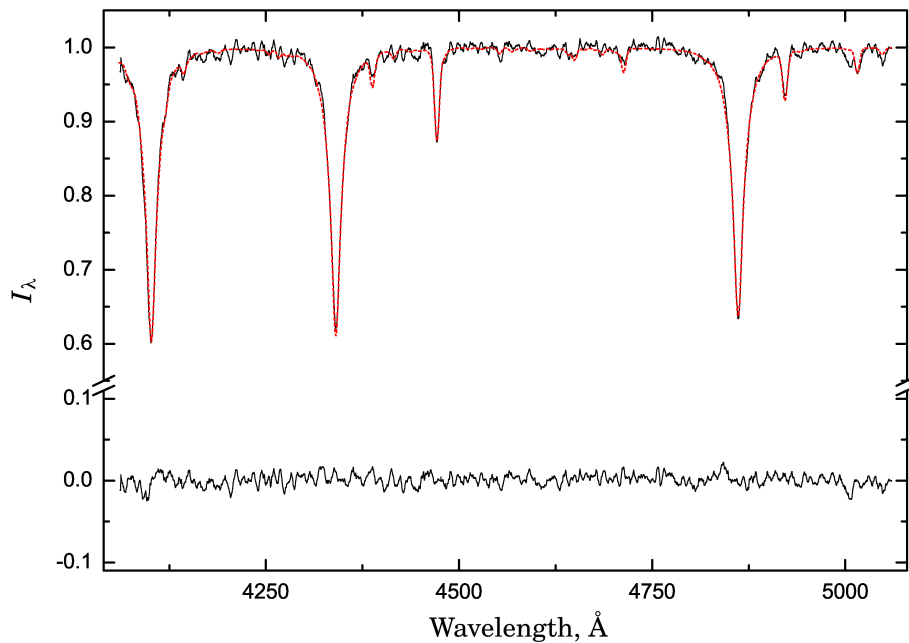
## 2. НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА

Наблюдения SDSS J162256 в фильтрах  $B, V$  и  $R_c$  (далее по тексту  $R$ ) системы Джонсона–Казинса проведены в ночь 18.06.2017 на телескопе РТТ-150 с помощью прибора TFOSC<sup>1</sup> и азотно-охлаждаемой до  $-100^{\circ}\text{C}$  ПЗС-матрицы CCD-447. При чередовании фильтров накоплено по 42 изображения поля объекта в каждом фильтре с равной длительностью экспозиций в 60 с. Полная длительность фотометрических наблюдений составила 4.25 часа, то есть охватила более двух орбитальных периодов системы. Для редукции данных использовался программный пакет Maxim DL<sup>2</sup>. В качестве двух объектов сравнения выбирались звезды близкой яркости и цвета в окрестности объекта. Одновременно для контроля точности результатов выполнена фотометрия почти всех звезд поля, считавшихся постоянными. Анализ зависимостей флуктуаций их блеска от яркости показал, что среднеквадратичные ошибки дифференциальной фотометрии объекта составили  $\delta m_B = 0^{\text{m}}106$ ,  $\delta m_V = 0^{\text{m}}098$  и  $\delta m_R = 0^{\text{m}}083$ .

Наблюдения SDSS J162256 в режиме спектроскопии с длинной щелью выполнены в ночи 30.04.2017 и 04.05.2017 на 6-м телескопе БТА с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005). Были использованы гризма VPHG1200g (1200 штр./мм) и CCD-приемник EEV 42–40 (2048 × 2048 пикселей размером 13.5 × 13.5 мкм). Итоговое спектральное разрешение составило

<sup>1</sup><https://tug.tubitak.gov.tr/tr/icerik/tfosc-tug-faint-object-spectrograph-and-camera>

<sup>2</sup><https://diffractionlimited.com/product/maxim-dl/>



**Рис. 1.** Наблюдаемый (сплошная линия) и теоретический (красная штриховая линия) спектры SDSS J162256 и распределение их взаимных уклонений  $O-C$ .

$\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$  в интервале длин волн 4050–5850  $\text{\AA}$ . Наблюдения проведены при хороших астроклиматических условиях с размером изображений звезд  $2''0$  при зенитных расстояниях объекта не более  $20^\circ$ . Накоплено 27 экспозиций объекта продолжительностью 300 с и 600 с, обеспечивших отношение  $S/N$  в спектрах не менее 48. Продолжительность всего ряда наблюдений составила 168 минут. Первичная редукция выполнена с помощью специализированного пакета (Afanasiev and Moiseev 2005), реализованного на языке программирования IDL<sup>3</sup>, а последующий анализ, включая нормировку — средствами программ Origin.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Переход от шкалы гелиоцентрических юлианских дат наблюдений HJD к шкале фаз орбитального периода  $\varphi \equiv E$  проведен на основе эфемериды из работы Schaffneroth et al. (2014):

$$\text{HJD} = 2455359.58306(2) + 0.0697885(53)E.$$

Последующий анализ положения главных затмений в фазовой кривой блеска показал, что ошибка эфемериды Schaffneroth et al. (2014) на эпоху наших наблюдений не превышает  $\Delta E = 0.003$ .

<sup>3</sup><http://www.itervis.com/idl>

В спектрах SDSS J162256 во всех фазах орбитального периода наблюдаются только абсорбционные линии sdB-субкарлика (H $\beta$   $\lambda$  4861, H $\gamma$   $\lambda$  4340, H $\delta$   $\lambda$  4102, He I  $\lambda$  4387,  $\lambda$  4471,  $\lambda$  4921,  $\lambda$  5015,  $\lambda$  5047, He II  $\lambda$  4686, C III–N III  $\lambda$  4635–4650). В совокупности перечисленные спектральные детали характерны для излучения одиночных sdB-субкарликов пониженной металличности с дефицитом гелия. Однако в работе Shimanskii et al. (2012b) ранее показано наличие искажений профилей абсорбционных линий H I эмиссионными линиями, формирующимися в излучении горячего пятна в фазах с существенным проявлением эффектов отражения. Поэтому при усреднении спектров SDSS J162256 мы использовали наблюдательные данные в диапазоне фаз  $\varphi = 0.85-0.15$ , где действие таких эффектов несущественно. Полученный усредненный и сглаженный по трем точкам наблюдаемый спектр ( $S/N \approx 145$ ) представлен на рис. 1. Для его анализа мы применили методику моделирования синтетических спектров звезд.

Расчеты оптического излучения SDSS J162256 проводились с помощью метода моделей облучаемых атмосфер и программного комплекса SPECTR (Shimansky et al. 2002; 2003). Модели атмосфер и спектры компонентов системы вычислялись с учетом эффектов отражения по методике Сахибуллина и Шиманского (Ivanova et al. 2002).

Интегральный спектр ТДС получался сложением спектров обоих компонентов с учетом их ин-

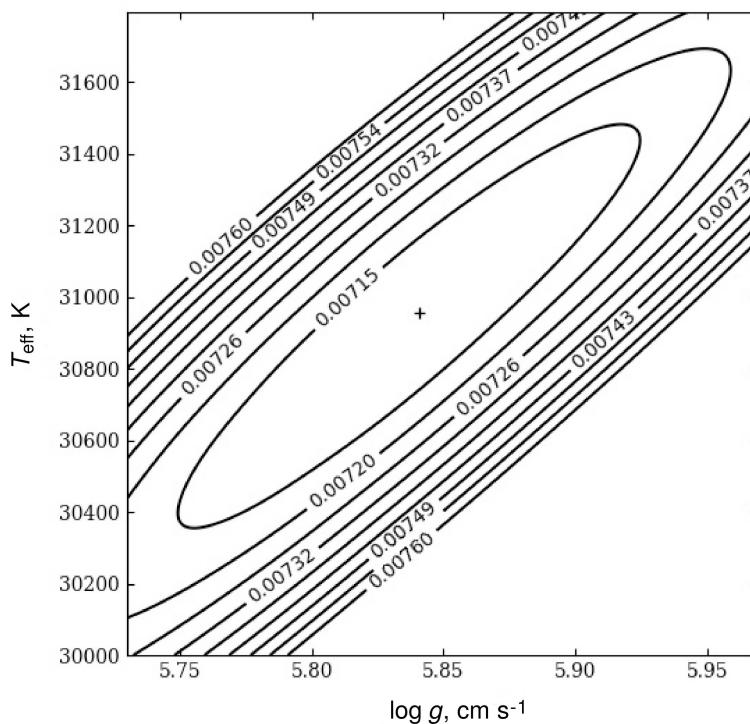


Рис. 2. Карта распределения  $\sigma$  по параметрам атмосферы sdB-субкарлика.

дивидуальных лучевых скоростей и условий видимости. Для корректного моделирования излучения sdB-субкарлика при вычислении профилей линий H I, He I, He II, C II, C III, Mg II учитывались отклонения от ЛТР по методике Shimanskii et al. (2012a). Необходимые не-ЛТР населенности рассчитывались с применением оригинальных моделей атомов этих элементов и комплекса NONLTE3 (Sakhbullin 1983) и импортировались комплексом SPECTR.

Варьирование эффективной температуры sdB-субкарлика прежде всего влияет на изменение ионизационного баланса He I/He II и отношение интенсивностей соответствующих линий, что обуславливает оптимальность применения этого критерия при определении значения  $T_{\text{eff}}$ . Однако оценить отношение интенсивностей при анализе всего наблюдаемого спектра, включающего линии H I, He I и He II, крайне затруднительно из-за слабости наблюдаемой линии He II  $\lambda$  4686. Поэтому для определения величин  $T_{\text{eff}}$  и [He/H] мы анализировали только спектральные диапазоны с линиями He I  $\lambda$  4471,  $\lambda$  4921 и He II  $\lambda$  4686, а для получения значения  $\lg g$  — диапазоны с линиями H I. Предварительно мы рассчитали сетки теоретических спектров с варьированием  $T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ , [He/H] в широких интервалах значений. Степень согласия каждого теоретического спектра с наблюдаемым определялась их среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  друг от друга в указанных диапазонах длин

волн. Таким образом, строились два распределения среднеквадратичных уклонений по параметрам атмосферы sdB-субкарлика, в которых при анализе линий H I фиксировалась величина [He/H], а при анализе линий He I и He II — величина  $\lg g$ . Процесс построения распределений носил итеративный характер до достижения полной сходимости. По положению их минимумов мы получили следующие оценки параметров атмосферы:  $T_{\text{eff}} = 30\,900 \pm 700$  K,  $\lg g = 5.85 \pm 0.12$ , [He/H] =  $-0.57 \pm 0.05$ . Карта распределения  $\sigma$  при фиксированном [He/H] с учетом всех диапазонов длин волн показана на рис. 2.

Для определения возможных ошибок параметров вычислялась «ошибка модели» при описании наблюдений  $\sigma_M$  как разница среднеквадратичных уклонений  $\sigma$  и уклонений, обусловленных белым шумом. Удвоение  $\sigma_M$  относительно ее минимальных значений в каждом распределении определяло границы изменения параметров атмосферы. Полученные нами значения параметров существенно отличаются от оценок  $T_1 = 29\,000 \pm 600$  K и  $\lg g_1 = 5.65 \pm 0.06$  из работы Schaffenroth et al. (2014). По нашему мнению, основной причиной различий является использование нами линии He II  $\lambda$  4686, наблюдаемая интенсивность которой требует более высокой эффективной температуры sdB-субкарлика. Примененный нами подход, с одной стороны, физически более корректен, но с

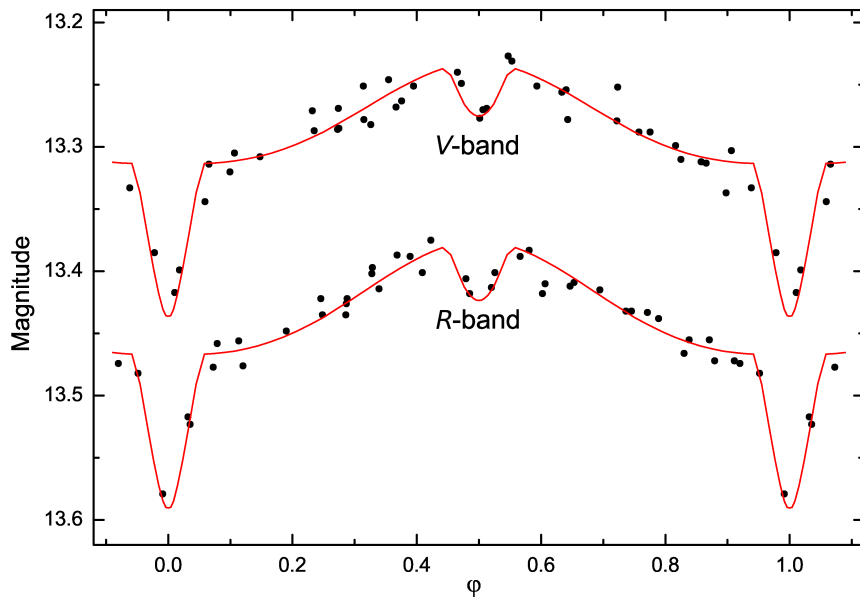


Рис. 3. Наблюдаемые (точки) и модельные (линии) кривые блеска SDSS J162256 в полосах  $V$  и  $R$ .

другой — его результаты могут искажаться шумом в условиях слабости линии  $\text{He II } \lambda 4686$ .

Последующее определение значений радиусов компонентов  $R_1$ ,  $R_2$  и угла наклона орбиты  $i$  проводилось путем моделирования кривых блеска системы в полосах  $V$ ,  $R$  и их согласования с наблюдаемыми (см. рис. 3). Данные в полосе  $V$  принимались контрольными для отбраковки заведомо непригодных решений. На орбитальной кривой блеска SDSS J162256 выделяются три участка переменности:

- 1) главное затмение обусловлено закрытием холодной звездой части поверхности sdB-субкарлика;
- 2) внезатменное изменение блеска связано с изменением условий видимости наблюдателем горячего пятна на поверхности холодной звезды;
- 3) вторичное затмение формируется при закрытии sdB-субкарликом горячего пятна на поверхности вторичного компонента.

Умеренная амплитуда главного затмения  $\Delta m \approx 0^m 12$  при заметной амплитуде вторичного затмения указывает на значительное превышение радиуса sdB-субкарлика над радиусом холодной звезды. Наличие в кривых блеска главного и вторичного затмений позволяет определить все параметры системы, включая эффективную температуру sdB-субкарлика. Однако полученные значения  $R_1$ ,  $R_2$  будут отягощены существенными ошибками вследствие определяющего влияния  $T_{\text{eff}}$  на амплитуду эффектов отражения. Поэтому

при анализе кривых блеска температура главного компонента  $T_{\text{eff}} = 30\,900 \pm 700$  К считалась установленной в ходе моделирования спектров. Для исследования влияния ее ошибок на точность оценок остальных параметров мы провели расчеты для нескольких вариантов с варьированием  $T_{\text{eff}}$ . Температура вторичного компонента не сказывается на оптическом излучении SDSS J162256 во всех орбитальных фазах. Полученные оценки параметров этой звезды позволяют принять значение температуры  $T_{\text{eff}} = 2400$  К в предположении близости к параметрам звезд главной последовательности. Однако из-за ограничений сеток моделей атмосфер Schaffenroth et al. (2014) потребовалось зафиксировать ее на уровне  $T_{\text{eff}} = 3250$  К. Тестовые расчеты с варьированием температуры вторичного компонента показали отсутствие ее влияния на результаты.

При согласовании модельных и наблюдаемых кривых блеска учитывались следующие факторы:

1. Амплитуда внезатменных изменений блеска в основном определяется значением радиуса вторичного компонента.
2. Изменение угла наклона орбиты влечет синхронное изменение глубины главного и вторичного затмений.
3. Соотношение радиусов компонентов изменяет соотношение глубин главного и вторичного затмений.
4. Значение радиуса главного компонента в небольшой степени влияет на отношение амплитуд внезатменных изменений блеска в разных полосах.

**Таблица 1.** Параметры SDSS J162256 для разных значений температуры sdB-субкарлика

Параметр	$T_{\text{eff}}$ , К		
	30 200	30 900	31 600
$i$ , deg	69.0	69.4	70.1
$R_1, R_{\odot}$	0.198	0.196	0.191
$R_2, R_{\odot}$	0.095	0.094	0.092

Определение параметров системы проводилось итеративным путем с контролем соответствия наблюдаемых и теоретических кривых блеска по результатам анализа распределения их взаимных уклонений  $\Delta m$  по фазе и вычисления среднеквадратичных уклонений  $\sigma(\Delta m)$ . На основе найденной величины  $i$  и полученной Schaffenroth et al. (2014) функции масс  $f(M_2) = 0.000832 \pm 0.000015 M_{\odot}$  с учетом принимаемой массы sdB-субкарлика  $M_1 = 0.47 \pm 0.01 M_{\odot}$  (Heber 2016) вычислялись масса вторичного компонента  $M_2$  и размер большой полуоси  $a$ . Найденное в итоге оптимальное решение соответствует минимуму значений  $\sigma(\Delta m)$  и обеспечивает описание наблюдаемых кривых блеска без появления участков систематических изменений  $\Delta m$ . Аналогично анализу спектров при анализе кривых блеска определялась «ошибка модели» на основе значений  $\sigma(\Delta m)$  и оценок точности дифференциальной фотометрии в полосах  $V$  и  $R$ . Предельные значения параметров  $i$ ,  $R_1$  и  $R_2$  задавались из условия достижения «ошибкой модели» значения в два раза больше минимального. Величины  $\sigma(\Delta m)$  и «ошибка модели» в полосе  $V$  оказываются намного более чувствительными к изменению параметров системы, чем в полосе  $R$ . Поэтому окончательные оценки ошибок параметров, возникающих при анализе кривых блеска, приняты нами по данным полосы  $V$ . Они сложены с ошибками, обусловленными варьированием значений функции масс SDSS J162256 и эффективной температуры sdB-субкарлика. В таблице 1 даны оценки  $R_1$ ,  $R_2$  и  $i$  для трех значений температуры главного компонента, а описание наблюдаемых кривых блеска в полосах  $V$  и  $R$  соответствующей моделью показано на рис. 3.

Найденные нами величины фундаментальных параметров SDSS J162256 приведены в таблице 2, там же для сравнения указаны наши более ранние оценки параметров из работы Deminova et al. (2020). Из-за небольшого различия оценок угла наклона орбиты, полученных нами в настоящей работе и ранее, вычисленные значения  $M_2$  и  $a$  остались прежними. Величины радиусов обоих компонентов по данным двух исследований также согла-

**Таблица 2.** Полученные параметры SDSS J162256

Параметр	D20	tw
$R_1, R_{\odot}$	$0.195 \pm 0.01$	$0.191 \pm 0.008$
$R_2, R_{\odot}$	$0.093 \pm 0.01$	$0.094 \pm 0.004$
$i$ , deg	$70.0 \pm 0.3$	$69.4 \pm 0.8$
$M_2, M_{\odot}$	$0.0657 \pm 0.001$	$0.066 \pm 0.002$
$a, R_{\odot}$	$0.580 \pm 0.01$	$0.580 \pm 0.003$

Примечание: D20 — Deminova et al. (2020), tw — эта работа;  $M_1 = 0.47 \pm 0.01 M_{\odot}$ , согласно Heber (2016).

суются в пределах ошибок определения. Сравнение наших результатов с данными Schaffenroth et al. (2014) показывает хорошее согласие не для всех параметров. Так, использование в обеих работах одинаковой функции масс привело к практически совпадающим значениям масс компонентов и большой полуоси орбиты, а полученная нами оценка  $R_2$ , несмотря на принятую по результатам моделирования в нашей работе более высокую эффективную температуру sdB-субкарлика, превышает значение  $R_2$  из работы Schaffenroth et al. (2014) на 10%. Данное различие может объясняться некорректным учетом эффектов отражения в рамках чернотельного приближения и, в частности, неверной оценкой переработки внешнего УФ-облучения в оптическое на поверхности холодной звезды. Более существенно расходятся оценки угла наклона орбиты и радиуса sdB-субкарлика. Причиной этих расхождений следует считать большую величину радиуса вторичного компонента. Возрастание этого параметра приводит при анализе профилей затмений к уменьшению угла наклона и соответствующему увеличению  $R_1$ . Следует отметить слабое покрытие нашими наблюдениями фаз обоих затмений, что могло обусловить рост ошибок определения  $i$  и  $R_1$ . Добавим, что вычисленная на основе оценок массы и радиуса sdB-субкарлика величина его поверхностной силы тяжести  $\lg g = 5.55 \pm 0.03$  отличается от данных спектроскопического анализа  $\lg g = 5.85 \pm 0.12$ . Возможно, большей неточностью обладает последнее значение, так как на наблюдаемые крылья линий H I и определяемую по ним величину  $\lg g$  сильное влияние оказывает процедура нормировки спектров.

В целом можно констатировать, что использование разных наборов наблюдательных данных и методов их анализа может приводить к вариациям значений радиусов компонентов при хорошей стабильности остальных параметров. На точность определения радиусов, вероятно, влияет коррект-

ность моделирования оптического излучения и эффектов отражения, а также объем и качество фотометрических данных. Однако для SDSS J162256 различия результатов двух исследований не превысили 10–13%, что не представляется нам критической величиной.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе нами переопределен набор параметров ПП SDSS J162256 на основе модельного анализа ее спектров и кривых блеска с физически корректным учетом эффектов отражения и отклонений от ЛТР. Критериями оптимального согласования наблюдаемых и теоретических данных считались достижения минимума их среднеквадратичных уклонений, что позволяло получить более объективные значения параметров системы и математически обоснованные оценки их ошибок. Найденные в нашей работе и в работах Deminova et al. (2020) и Schaffenroth et al. (2014) значения параметров SDSS J162256 в основном согласуются между собой в пределах точности определения, характерной для таких объектов. Однако применение разных методик учета эффектов отражения, возможно, приводит к различиям в оценках радиусов компонентов на уровне 10–15%. Мы считаем эти различия некритическими, но требующими учета при изучении физики таких систем. Аналогичное сравнение результатов при использовании двух методик желательнее провести для звезд типа HW Vir с амплитудой эффектов отражения  $\Delta m > 0^m2$ . В этом случае эмиссии в излучении горячего пятна могут сильно исказить профили линий в наблюдаемом спектре, а модельное распределение энергии в нем — значительно отклониться от чернотельного. Такое сравнение позволит при проведении обобщающего статистического анализа параметров большой выборки систем типа HW Vir взвешенно учитывать результаты исследований с применением близких, но не полностью аналогичных методик наблюдений и их анализа.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Часть наблюдательных данных получена на уникальной научной установке БТА САО РАН. Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего

образования Российской Федерации. Обновление приборной базы осуществляется в рамках национального проекта «Наука и университет». Авторы благодарят ТЮБИТАК, КФУ, АН РТ, ИКИ РАН за частичную поддержку в использовании РТТ-150 (Российско-турецкий телескоп 1.5-м в Анталье).

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа по обработке наблюдательных данных и моделированию звездных спектров выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31** (3), 194 (2005).
2. N. Deminova, V. Shimansky, N. Borisov, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev, pp. 260–266 (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020).
3. U. Heber, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **128** (966), 082001 (2016).
4. D. V. Ivanova, N. A. Sakhbullin, and V. V. Shimanskii, *Astronomy Reports* **46** (5), 390 (2002).
5. H. Ritter, *Astron. and Astrophys.* **169**, 139 (1986).
6. N. A. Sakhbullin, *Trudy Kazanskoj Gorodkoj Astronomicheskoi Observatorii* **48**, 9 (1983) [In Russian].
7. V. Schaffenroth, S. Geier, U. Heber, et al., *Astron. and Astrophys.* **564**, id. A98 (2014).
8. V. V. Shimanskii, E. A. Karitskaya, N. G. Bochkarev, et al., *Astronomy Reports* **56** (10), 741 (2012a).
9. V. V. Shimanskii, D. G. Yakin, N. V. Borisov, and I. F. Bikmaev, *Astronomy Reports* **56** (11), 867 (2012b).
10. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, N. A. Sakhbullin, et al., *Astronomy Reports* **46** (8), 656 (2002).
11. V. V. Shimansky, N. V. Borisov, and N. N. Shimanskaya, *Astronomy Reports* **47** (9), 763 (2003).

## Refined Parameters of the Pre-Cataclysmic Variable with the sdB Sub-Dwarf SDSS J162256.6+473051

N. R. Deminova<sup>1</sup>, V. V. Shimansky<sup>2</sup>, N. V. Borisov<sup>2</sup>, and E. N. Irtuganov<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

<sup>2</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>3</sup>Academy of Sciences of Tatarstan, Kazan, 420111 Russia

In this paper, we present results of refining the characteristics of the eclipsing pre-cataclysmic variable SDSS J162256.6+473051 based on a model analysis of its optical radiation. We used the spectra of the system obtained with the 6-m BTA telescope of SAO RAS and the data from its multi-band photometric observations with the 1.5-m Russian-Turkish telescope RTT150. Calculations of the optical radiation of SDSS J162256.6+473051 were carried out using the method of irradiated atmosphere models. When analyzing the spectra of the system at the minimum brightness, we found the following atmospheric parameter estimates of the sdB sub-dwarf:  $T_{\text{eff}} = 30\,900 \pm 700$  K,  $\log g = 5.85 \pm 0.12$ ,  $[\text{He}/\text{H}] = -0.57 \pm 0.05$ . The light curves of SDSS J162256.6+473051 were modeled and a complete set of fundamental parameters of the system was obtained. Their satisfactory agreement with the literature data allows us to conclude that the characteristics of similar systems with weak reflection effects can be analyzed together, even when they are determined using different methods of radiation modeling.

Keywords: *stars: fundamental parameters—methods: observational—methods: numerical—stars: individual: SDSS J162256.6+473051*