

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК Lap 30 ПО ОПТИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2021 г. Н. Р. Дёминова^{1*}, В. В. Шиманский^{2,1}, Н. В. Борисов², М. М. Габдеев^{1,3}

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

²Специальная астрономическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

³Институт прикладных исследований АН РТ, Казань, Россия

Поступила в редакцию 24.03.2021 г.

После доработки 30.03.2021 г.; принята к публикации 30.03.2021 г.

Выполнен модельный анализ оптического излучения молодой предкатаклизмической переменной Lap 30 и определен набор ее фундаментальных характеристик. Спектроскопические и многополосные фотометрические наблюдения проведены на телескопах БТА и Цейсс-1000 Специальной астрофизической обсерватории РАН. Для расчетов синтетических спектров и кривых блеска использовалась методика моделирования облучаемых атмосфер звезд в тесных двойных системах. Установлено доминирование в оптическом диапазоне излучения sdV-субкарлика с параметрами атмосферы $T_{\text{eff}} = 30\,500 \pm 1100$ К, $\log g = 5.60 \pm 0.10$ при умеренном влиянии эффектов отражения на кривые блеска и профили линий H β . Измеренные наборы лучевых скоростей главной компоненты проанализированы с учетом возможного влияния на них эффектов отражения и уточнена их полуамплитуда $K_1 = 56.3 \pm 2.0$ км/с. Найдено, что близкая к синусоидальной форма кривых блеска Lap 30 позволяет установить только верхний предел значений угла наклона орбиты. На основе согласования модельных и наблюдаемых кривых блеска получены оценки радиусов компонент при разных значениях угла наклона. Для определения их нижнего предела использованы эволюционные оценки радиусов маломассивных звезд Главной Последовательности. Масса главной компоненты принята равной нормальной массе одиночных sdV-субкарликов $M_1 = 0.47 M_{\odot}$. В итоге определены диапазоны возможных изменений угла наклона $i = 33^{\circ} - 45^{\circ}$ и большой полуоси орбиты, радиусов компонент и массы $M_2 = 0.127 - 0.175 M_{\odot}$ красного карлика.

Ключевые слова: наблюдения: спектры, звезды: параметры, моделирование: эффекты отражения, звезды: Lap 30.

DOI: 10.31857/S032001082105003X

ВВЕДЕНИЕ

Предкатаклизмические переменные (ПП) были впервые выделены в отдельный класс Риттером в середине 80-х гг. XX в. (Риттер, 1986). Главными компонентами таких тесных двойных систем (ТДС) являются горячие субкарлики или остывающие белые карлики, а вторичными — маломассивные звезды поздних спектральных классов. По эволюционному статусу ПП считаются промежуточной стадией между системами с общими оболочками и катаклизмическими переменными. Физическое состояние главной компоненты определяет внутреннее разделение класса ПП на старые системы с белыми карликами и молодые с sdO-субкарликами и sdV-субкарликами, сильно различающиеся по

наблюдаемым характеристикам и распределению в Галактике. Высокая эффективная температура и светимость главных компонент многих ПП обуславливают ультрафиолетовое облучение поверхности их холодных спутников с его переработкой в оптические кванты. В итоге в излучении ТДС формируются эффекты отражения, амплитуда которых в основном зависит от температуры главной компоненты и площади отражающей поверхности холодной звезды. К системам типа HW Vir относят молодые ПП, содержащие sdV-субкарлики (звезды на постгоризонтальной ветви (post-HV)) в паре с красными или коричневыми карликами с массой $M_2 < 0.40 M_{\odot}$. При исследовании таких систем основной проблемой является умеренно высокая температура sdV-субкарликов $T_{\text{eff}} \leq 40\,000$ К и небольшие размеры вторичных компонент, сильно ограничивающие амплитуды эффектов отражения

* Электронный адрес: nellyrd@mail.ru

($\Delta m_V \leq 0.2^m$). В результате оптические спектры систем содержат линии только главных компонент без присутствия деталей, формирующихся в излучении холодных спутников.

Первые результаты проводимых нами в текущем десятилетии исследований звезд типа HW Vir обобщены в работе Дёминовой и др. (2017). Анализ известных к настоящему времени параметров этих систем показал наличие у них значимых аномалий. В частности, в выборке из 17 объектов обнаружен систематический избыток (на 5–40%) радиуса вторичных компонент относительно звезд Главной Последовательности (ГП) аналогичной массы. Аналогичные избытки радиуса зарегистрированы у некоторых молодых ПП с sdO-субкарликами (Шиманский и др., 2009), что объясняется их остаточным возбуждением после выхода систем из стадии общей оболочки. Однако у систем типа HW Vir не обнаружены избытки светимости вторичных компонент, характерные для молодых ПП с sdO-субкарликами (Дёминова и др., 2017). Поэтому можно предположить, что аномалии параметров холодных звезд в двух типах ПП имеют разную природу. Для уточнения этой природы в ПП с sdB-субкарликами требуется высокоточное, комплексное исследование большой выборки объектов. Особое внимание следует уделить слабо изученным в настоящее время объектам, среди которых в основном доминируют незатменные ПП. При их исследовании, кроме стандартного для звезд типа HW Vir отсутствия информации об излучении вторичной компоненты, возникают сложности с точным определением угла наклона орбиты. В работе Шиманского и др. (2012б) показано, что в системах с эффектами отражения не менее $\Delta m_V = 0^m40$ точность современных фотометрических наблюдений позволяет из моделирования кривых блеска получить оценку угла наклона с ошибкой $\delta i = 2^\circ - 3^\circ$. Однако у многих звезд типа HW Vir фотометрические эффекты отражения не превосходят $\Delta m_V = 0^m20$, что ставит вопрос о возможности определять наклоны их орбит с допустимой точностью.

К группе незатменных систем типа HW Vir в настоящее время относят звезду Lap 30 ($\alpha_{2000} = 03^h28^m55^s$, $\delta_{2000} = +50^\circ35'29''$; $m_V = 14^m3$), классифицированную в работе Вербека и др. (2012) как ТДС, содержащую sdB-субкарлик с параметрами атмосферы $T_{\text{эф}} = 28\,500\text{ K}$ и $\log g = 5.5$. Значения орбитального периода системы $P_{\text{orb}} = 0^d11017$ и полуамплитуды лучевых скоростей sdB-субкарлика $K_1 = 64\text{ км/с}$ найдены Купфер и др. (2014). Предполагая массу главной компоненты равной средней массе sdB-субкарликов ($M = 0.47 M_\odot$), Хебер (2016) получил оценку массы холодного спутника $M_2 > 0.1 M_\odot$. Основная

трудность при определении более точных параметров Lap 30 заключается в отсутствии затмений в ее кривых блеска. На основе их численного анализа Купфер и др. (2014) представили оценки массы $M_1 = 0.49 M_\odot$ для sdB-субкарлика и $M_2 = 0.12 M_\odot$ для красного карлика. В результате Lap 30 классифицирована как короткопериодическая незатменная ПП типа HW Vir. Однако ее параметры найдены с применением чернотельного моделирования кривой блеска и могут содержать значимые ошибки вследствие некорректного учета эффектов отражения.

В данной работе мы провели комплексный анализ спектроскопических и фотометрических наблюдений Lap 30 с применением моделей облучаемых звездных атмосфер. В следующем разделе представлена информация о выполненных наблюдениях, их первичной обработке, качественном анализе кривых блеска и спектров, а также измерениях и исследованиях лучевых скоростей. Далее описаны методика расчетов излучения ТДС с эффектами отражения и результаты ее применения при модельном анализе спектров и кривых блеска Lap 30.

НАБЛЮДЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ

Наблюдения Lap 30 в фильтрах *B*, *V* и *Rc* (далее *R*) фотометрической системы Коузинса проведены в ночь 7/8 декабря 2015 г. на телескопе Цейсс-1000 САО РАН с применением штатного фотометра и ПЗС-матрицы EEV 42-40. При равной продолжительности экспозиций 60 с и чередовании фильтров накоплено 410 ПЗС-изображений поля объекта, из которых 134 — в полосе *R*, 137 — в *V* и 139 — в *B*. Наблюдения охватывают более одного орбитального периода, что позволило проверить соответствие значений блеска звезды в одинаковых орбитальных фазах и гарантировать отсутствие их систематического тренда в течение ночи.

Для обработки фотометрических наблюдений применялся стандартный пакет редукции астрономических данных Maxim DL. Объектами сравнения выбраны две звезды близкой яркости и цвета, а контрольными считались все звезды, попадающие в поле ПЗС-матрицы. Анализ флуктуаций их блеска показал, что ошибки дифференциальной фотометрии объекта оказались равными $\delta m \approx 0.01^m$ в полосах *R*, *V* и $\delta m \approx 0.02^m$ в полосе *B*.

Переход от шкалы гелиоцентрических юлианских HJD к шкале фаз орбитального периода $\varphi \equiv E$ выполнен с применением оценки орбитального периода $P_{\text{orb}} = 0^d11017$ из работы Купфер и др. (2014). Отсутствие в Купфер и др. (2014) информации о моменте минимума блеска HJD_{min} не позволяет уточнить значение периода Lap 30.

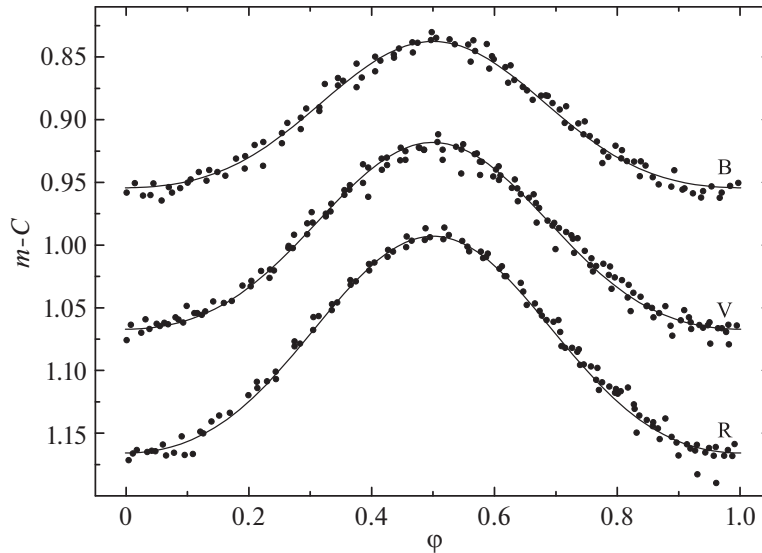


Рис. 1. Наблюдаемые кривые блеска (точки) и теоретические (модельные) кривые блеска (линии) для угла наклона 35° .

Поэтому мы получили значение HJD_{\min} из анализа наших наблюдений и в дальнейшем использовали эфемериду

$$HJD_{\min} = 2457364.2067(\pm 0.0002) + \quad (1) \\ + 0.11017(\pm 0.00011) \times E.$$

На рис. 1 представлены итоговые орбитальные кривые блеска Lap 30 в полосах B , V , R вместе с их оптимальным описанием на основе численного моделирования (см. ниже). Их форма с высокой точностью близка к синусоидальной, а амплитуда возрастает с увеличением длины волны от $\Delta m_B = 0^m.117$ до $\Delta m_R = 0^m.173$. Такое изменение амплитуды характерно для действия эффектов отражения в ПП с sdB-субкарликом, а ее значение близко к найденному у других объектов с умеренным облучением: HW Vir (Ибаноглу и др., 2004, $\Delta m_V = 0^m.19$), NY Vir (Килкенни и др., 1998, $\Delta m_V = 0^m.18$), V1828 Aql (Алмейда и др., 2012, $\Delta m_V = 0^m.15$). Однако в подобных системах при угле наклона $i > 55^\circ$ фазы минимума блеска имеют большую на 7–15% продолжительность, чем фазы максимума. Отсутствие данного эффекта в кривых блеска Lap 30 позволяет при их модельном анализе установить верхний предел значений угла наклона i .

Спектроскопические наблюдения Lap 30 проведены в ночь 8/9 октября 2016 г. с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005) БТА САО, работающего в режиме спектроскопии с длинной щелью. При наблюдениях использовались гризма VPHG1200g (1200 штр./мм) и CCD-приемник

EEV 42-40 (2048 × 2048 пикселей размером 13.5×13.5 мкм), обеспечивающие спектральное разрешение $\Delta\lambda \approx 5.0 \text{ \AA}$ в интервале длин волн $\lambda = 4050\text{--}5850 \text{ \AA}$. В хороших климатических условиях с размером изображений звезд $1.8''$ при зенитных расстояниях объекта не более 20° и длительности экспозиций в 300 с накоплено 26 спектральных ПЗС-изображений с охватом всех фаз орбитального периода, а также изображения спектров Ar–Ne–He-лампы и спектрофотометрического стандарта BD 28°3211 из обзора Бохлин (1996). Первичная редукция наблюдений проходила по стандартной методике в среде IDL¹. Последующая нормировка спектров выполнена в пакете Origin на основе их сравнения с калиброванными спектрами молодых ПП HW Vir и V1828 Aql. Статистический анализ полученных наблюдений показал, что отношение сигнал/шум в них превышает $S/N = 90$ для диапазона $\lambda = 4200\text{--}5200 \text{ \AA}$.

Нормированные спектры Lap 30 в нескольких фазах орбитального периода представлены на рис. 2а. В них наблюдаются абсорбционные линии водорода (H_β 4861 Å, H_γ 4340 Å, H_δ 4102 Å), гелия (HeI $\lambda\lambda$ 4387, 4471, 4921, 5015, 5047 Å, HeII λ 4686 Å) и бленда CIII–NIII, формирующиеся в атмосфере sdB-субкарлика. Слабость линии HeII λ 4686 Å указывает на эффективную температуру звезды не выше $T_{\text{eff}} = 33\,000 \text{ K}$ и затрудняет определение параметров ее атмосферы из анализа наблюдений (см. ниже). В спектрах не обнаружены какие-либо эмиссионные детали, вызванные

¹ <http://www.itvis.com/idl>

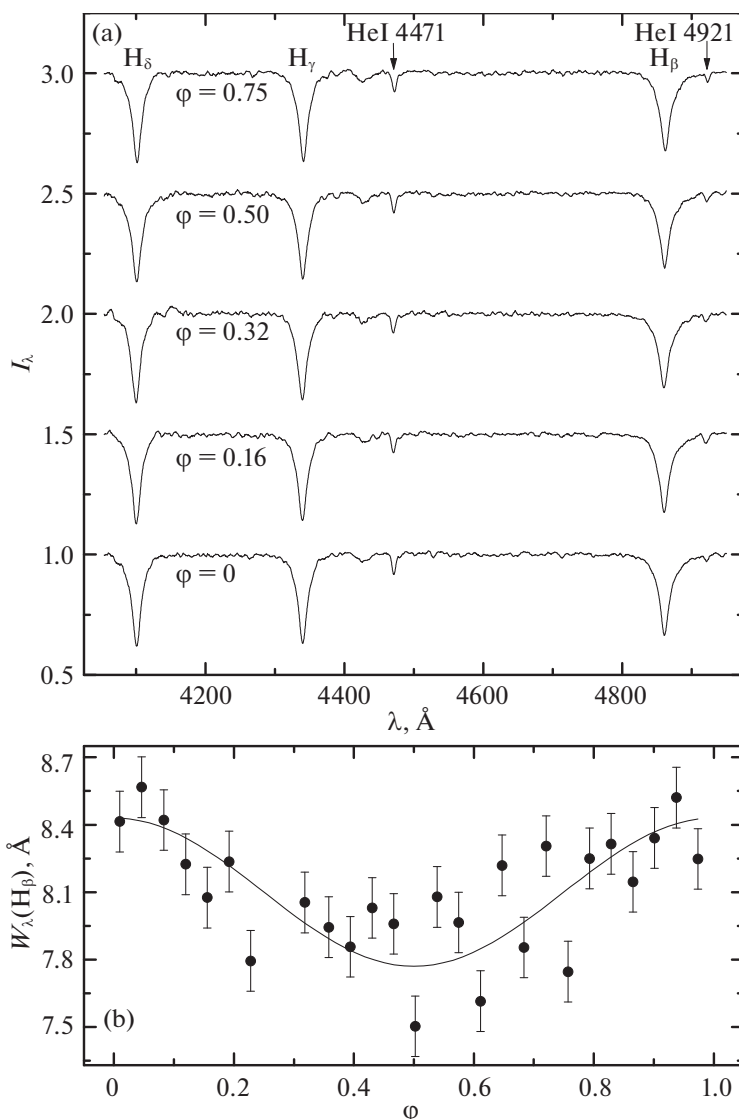


Рис. 2. Наблюдаемые спектры Lan 30 в разных фазах (а); изменение эквивалентной ширины W_λ линии H_β с фазой орбитального периода (б).

действием эффектов отражения на поверхности вторичной компоненты. Данное явление объясняется относительно невысокой температурой sdB-субкарлика при одновременном доминировании его излучения в оптическом диапазоне. Однако в работе Шиманского и др. (2012б) установлено, что эффекты отражения формируют слабые эмиссионные компоненты линий H I, ослабляющие их наблюдаемые абсорбционные профили в фазах максимума блеска. Поэтому мы измерили эквивалентные ширины W_λ линий H I и построили их зависимости от фазы орбитального периода. Пример наблюдаемых фазовых изменений W_λ для линии H_β с их аппроксимацией синусоидой показан на рис. 2б. Ошибки определения W_λ оценены из наблюдаемого отношения $S/N = 115$ в области линии H_β и средней точности нормировки на уровне 0.102%. Очевидно,

что эквивалентная ширина линии испытывает колебания с амплитудой около 7% и достигает минимума вблизи фазы $\varphi = 0.5$. Аналогичные изменения для линий H_γ и H_δ выражены намного слабее и их амплитуда не превышает ошибок измерения W_λ . В работе Шиманского и др. (2012б) показано, что эмиссионные компоненты линий H I, кроме ослабления абсорбционных профилей, вызывают их небольшой сдвиг ($\Delta\lambda = 0.2\text{--}0.3 \text{ \AA}$) по длине волны и искажают измеряемые значения лучевых скоростей V_r sdB-субкарлика. В результате амплитуды лучевых скоростей K_1 для разных линий могут различаться на величину, большую ошибок измерений. Для минимизации описанных искажений V_r предпочтительно использовать линии H_γ и H_δ с более слабыми эмиссионными компонентами.

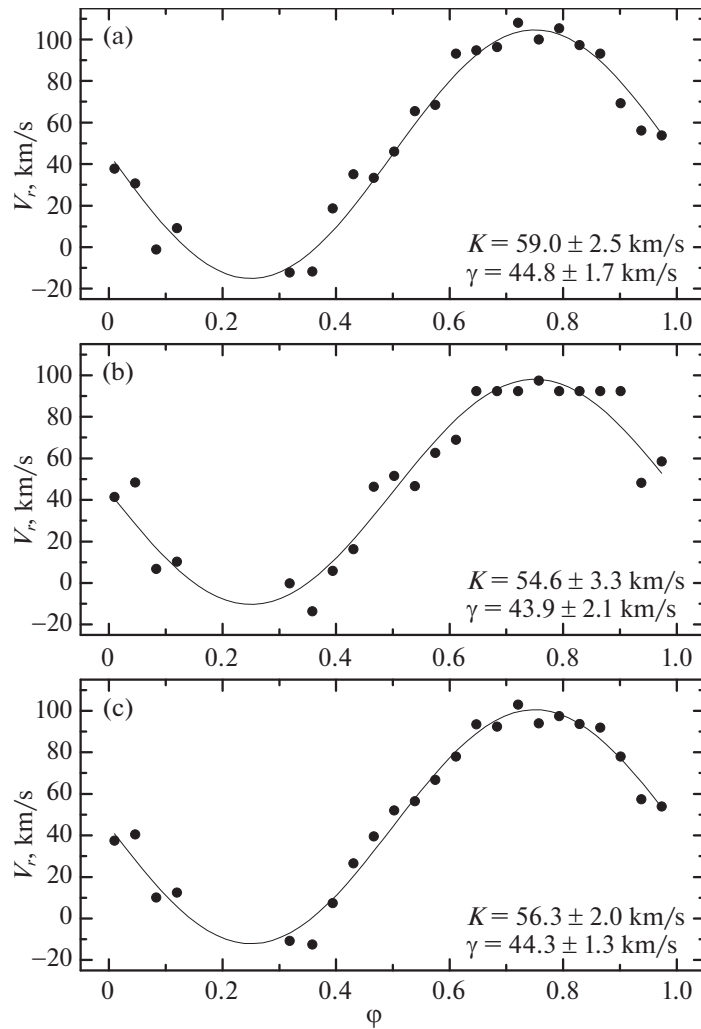


Рис. 3. Кривые лучевых скоростей sdV-субкарлика по линиям H_β (a), H_γ (b) и в сумме по четырём линиям $H\text{I}$ и HeI (c).

Однако измерения по этим линиям обладают меньшей точностью вследствие пониженного отношения S/N в синем диапазоне. Поэтому мы определили лучевые скорости sdV-субкарлика из анализа смещений всех линий $H\text{I}$ с контролем различий между ними.

Измерение лучевых скоростей выполнено методом многополосной кросс-корреляции. В качестве спектра сравнения использовалось усреднение всех наблюдаемых спектров после их перевода в лабораторную шкалу длин волн. Значения V_r находились с использованием как отдельных линий H_δ , H_γ и H_β , так и их различных комбинаций, в том числе с дополнительным учетом наиболее сильной линии гелия $\text{HeI } \lambda 4471 \text{ \AA}$. При измерении скоростей из спектров Lap 30 выделялись интервалы шириной $\Delta\lambda = 130 \text{ \AA}$ для линий $H\text{I}$ или $\Delta\lambda = 40 \text{ \AA}$ для линии $\text{HeI } \lambda 4471 \text{ \AA}$ с центрами на их лабораторных длинах волн. Средняя ошибка лучевых скоростей при анализе одной линии соста-

вила $\delta V_r \approx 15 \text{ км/с}$, а при совместном учете всех линий $\delta V_r \approx 8 \text{ км/с}$. Полученные зависимости V_r от фаз орбитального периода аппроксимировались в приближении круговой орбиты. Анализ лучевых скоростей с применением модели эллиптической орбиты показал, что значение ее эксцентриситета не превышает $e = 0.02 \pm 0.02$. Результаты аппроксимаций для линий H_β и H_γ , а также для варианта совместного анализа всех линий представлены на рис. 3. Полуамплитуды лучевых скоростей составили $K_1 = 59.0 \pm 2.5 \text{ км/с}$ для линии H_β , $K_1 = 54.6 \pm 3.3 \text{ км/с}$ для линии H_γ , $K_1 = 55.6 \pm 2.9 \text{ км/с}$ для линии H_δ и $K_1 = 56.3 \pm 2.0 \text{ км/с}$ при совместном учете всех линий. Можно предположить, что описанные дополнительные смещения линии H_β увеличили амплитуду лучевых скоростей на $\Delta K_1 \approx 4.0 \text{ км/с}$, что превышает ошибку определения K_1 . Однако включение этой линии в совместный анализ позволяет заметно снизить случайные ошибки измерений V_r . Поэтому в ка-

честве окончательной мы приняли величину K_1 , найденную по всем линиям. Соответствующая ей функция масс вторичной компоненты составила $f(m) = 0.00204 \pm 0.000020 M_{\odot}$. В статье Купфера и др. (2014) для главной компоненты Lap 30 представлено 38 значений V_r со средней точностью $\delta V_r = 5-20$ км/с и оценка их полуамплитуды $K_1 = 64.0 \pm 1.5$ км/с. Авторы не описывают выбранный способ измерений V_r , но их результаты неравномерно распределены по орбитальному периоду с наличием только трех значений в диапазоне фаз $\varphi = 0.46-0.93$. Поэтому мы считаем найденную нами оценку K_1 более корректной.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ

Вычисление теоретических спектров и кривых блеска Lap 30 проводилось с применением метода моделей облучаемых атмосфер, разработанного Шиманским и др. (2002) и реализованного в программном комплексе SPECTR (Шиманский и др., 2003). Температурная структура атмосферы рассчитывалась по методике учета баланса функций нагрева и охлаждения звездного газа (Иванова и др., 2002). Для необлученных атмосфер использовались сеточные модели Куруца (1993) для красного карлика и Митрофановой и др. (2014) для sdB-субкарлика. Модели интерполировались или экстраполировались на заданные параметры $T_{\text{эф}}$ и $\log g$ по методике Сулейманова (1996). Солнечный химический состав задавался, согласно данным Андерс, Гревес (2005). На основе наборов моделей атмосфер компонент для 72 фаз орбитального периода вычислялись их спектры, излучаемые в направлении наблюдателя. При их расчете использовались источники непрозрачности, затабулированные в комплексах STARDISK (Сулейманов, 1992) и SPECTR (Шиманский и др., 2003), а также 2 500 000 атомарных и молекулярных линий по данным Каstellли, Куруц (2003). Для линий H I, He I, He II, Mg II, Si II учитывались отклонения от ЛТР согласно методике Шиманского и др. (2012a). Спектры компонент складывались с учетом лучевых скоростей их орбитального движения и сворачивались с аппаратной функцией редуктора светосилы SCORPIO (Афанасьев, Моисеев, 2005), а при расчете кривых блеска дополнительно сворачивались с кривыми пропускания светофильтров системы Коузинса (Страйжис, 1977).

Для определения параметров атмосферы sdB-субкарлика мы применили модельный анализ спектра с минимальным влиянием эффектов отражения, полученного усреднением шести наблюдаемых спектров в диапазоне фаз $\varphi = 0.0 \pm 0.1$. Отсутствие затмения в Lap 30 указывает на возможность

наблюдения горячего пятна на поверхности вторичной компоненты в течение всего орбитального периода. Однако расчеты кривых блеска при ограничениях на угол наклона орбиты $i = 35^\circ-45^\circ$ (см. ниже) показали, что в выбранных фазах излучение пятна не способно исказить профили линий H I и He I более, чем на 1.5%. Параметры атмосферы (эффективная температура $T_{\text{эф}}$, поверхностная сила тяжести $\log g$ и содержания гелия [He/H]) находились путем варьирования их значений до оптимального согласования теоретических и наблюдаемых профилей линий H I, He I $\lambda\lambda$ 4387, 4471, 4921, 5015 Å и He II λ 4686 Å. При поиске оптимального набора параметров учитывалось, что эффективная температура влияет на соотношение глубин линий He I и He II, $\log g$ — на интенсивность крыльев и глубину водородных линий, а [He/H] — на глубину всех гелиевых линий. Наилучшее согласование теоретического и наблюдаемого спектров определялось минимумом их суммарных среднеквадратичных уклонений в названных линиях. Отметим, что слабость линии He II λ 4686 Å обуславливает появление заметных погрешностей в значениях $T_{\text{эф}}$ и $\log g$. В частности, нам не удалось корректно описать ядра линий H I. Требуемое для этого повышение $T_{\text{эф}}$ до 33 000 К приводит к росту интенсивности линии He II λ 4686 Å намного сильнее наблюдаемой. В итоге мы нашли следующие параметры атмосферы sdB-субкарлика: $T_{\text{эф}} = 30\,500 \pm 1100$ К, $\log g = 5.60 \pm 0.10$, [He/H] = -1.1 ± 0.1 . Соответствующее сравнение теоретического и наблюдаемого спектров показано на рис. 4.

На форму и амплитуду кривых блеска основное влияние оказывают пять параметров системы: температуры $T_{\text{эф}}$ и относительные радиусы R/a обеих компонент, а также угол наклона орбиты i . Их одновременное определение из численного анализа многополосной фотометрии возможно только при наличии у системы полных затмений. Для уменьшения числа неизвестных параметров при моделировании кривых блеска эффективная температура sdB-субкарлика принималась фиксированной $T_{\text{эф}}^1 = 30\,500$ К по результатам исследования наблюдаемого спектра. Расчеты показали, что доля собственного излучения вторичной компоненты при $T_{\text{эф}}^2 = 3700$ К, соответствующей максимальной оценке ее массы $M_2 = 0.32 M_{\odot}$ (Жирарди и др., 2000), не превышает 0.2% от полной светимости Lap 30 в полосе R . Поэтому эффективная температура холодной звезды считалась недоступной для измерения и задавалась на уровне $T_{\text{эф}}^2 = 3250$ К для наиболее вероятного значения $M_2 = 0.15 M_{\odot}$ (см. ниже). В итоге при моделировании мы варьировали относительные радиусы компонент (R_1/a и R_2/a) и угол наклона орбиты до достижения наилучшего

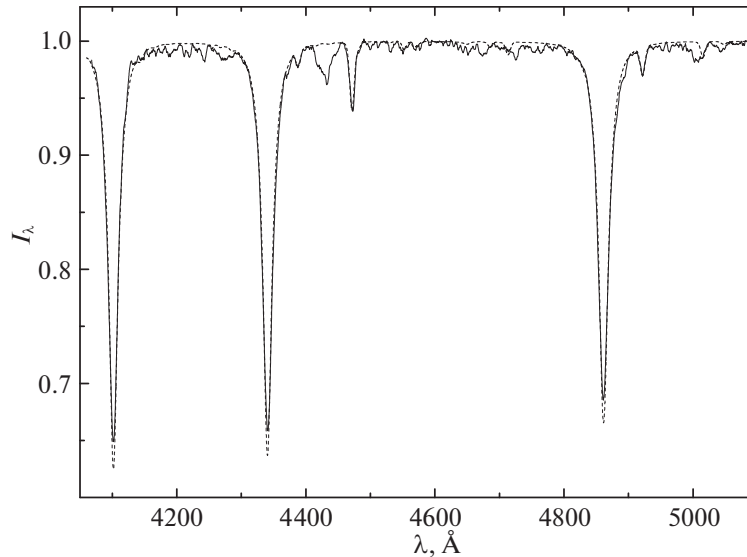


Рис. 4. Теоретический (штриховая линия) и наблюдаемый (сплошная линия) спектры Lap 30 в минимуме блеска.

описания наблюдаемых кривых блеска. Согласно нашим модельным расчетам, их синусоидальная форма может быть корректно описана только при угле наклона орбиты не более $i = 45^\circ$. Одновременно найдено, что объем и точность фотометрических данных не позволяют найти три параметра из анализа наблюдений. В результате мы выполнили моделирование для ряда углов в интервале $i = 20^\circ - 45^\circ$ с шагом $\Delta i = 5^\circ$, определив в каждом случае радиусы обеих компонент из наилучшего согласования теоретических и наблюдаемых кривых блеска. Критерием согласования являлось достижение минимума их суммарных среднеквадратичных уклонений в фильтрах B , V , R . Отметим, что радиус вторичной компоненты прежде всего определяет амплитуду изменений блеска Lap 30, а радиус главной — разницу амплитуд в разных фильтрах. В результате нахождение значений радиусов оказалось возможным при всех значениях i . Отметим, что при $i \geq 40^\circ$ возникают заметные сложности в одновременном описании формы и амплитуды кривых блеска во всех фильтрах. Пример описания наблюдаемых кривых блеска при $i = 35^\circ$ представлен на рис. 1.

Отсутствие наблюдательных данных о собственном излучении и лучевых скоростях красного карлика делает невозможным определение параметров Lap 30 без внесения дополнительных предположений. Поэтому мы зафиксировали массу главной компоненты как $M_1 = 0.47 M_\odot$ на основании результатов исследований параметров sdB-субкарликов (Хебер, 2016). В итоге для любого принятого значения угла наклона i оказывается возможным вычислить массу вторичной компоненты M_2 и большую полуось системы a .

Теоретический радиус R_{mod} звезды ГП с массой M_2 мы находили с применением моделей эволюции маломассивных звезд (Жирарди и др., 2000) солнечного химического состава. Одновременно знание величины a и относительных радиусов компонент R/a (см. выше) позволяет найти их абсолютные значения R_1 и R_2 . В табл. 1 даны оценки a , R_1 , R_2 и M_2 при различных значениях i , а на рис. 5 показана зависимость отношения радиуса вторичной компоненты R_2 к теоретическому радиусу звезды ГП R_{mod} от угла наклона орбиты. Радиус звезды ГП является наименьшим из возможных при заданном значении массы. Поэтому мы отклонили все решения, для которых выполнено $R_2/R_{\text{mod}} < 1$, и ограничили интервал возможных значений угла наклона в пределах $i = 33^\circ - 45^\circ$. Предположение о нахождении вторич-

Таблица 1. Параметры Lap 30 при различных углах наклона орбиты

i°	a/R_\odot	M_2/M_\odot	R_1/R_\odot	R_2/R_\odot	R_{mod}/R_\odot
20	0.891	0.316	0.173	0.255	0.309
25	0.861	0.239	0.173	0.223	0.248
30	0.842	0.193	0.172	0.202	0.210
35	0.829	0.163	0.172	0.187	0.184
40	0.820	0.142	0.171	0.174	0.162
45	0.813	0.127	0.171	0.167	0.147

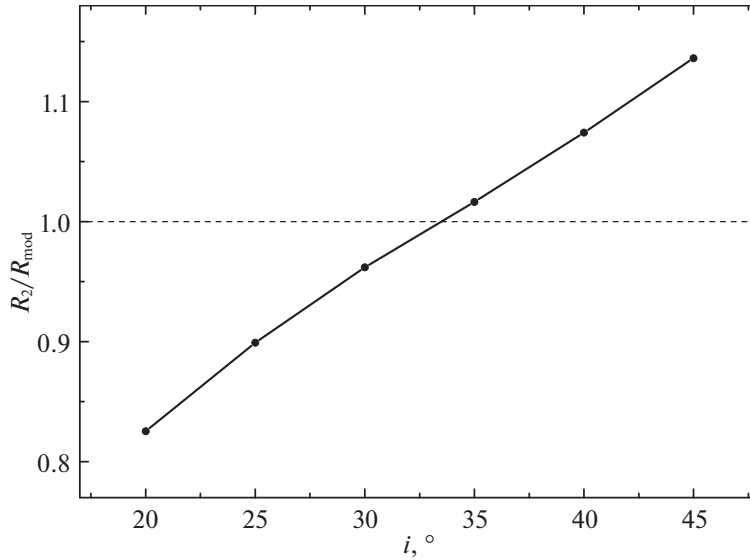


Рис. 5. Зависимость отношения наблюдаемого радиуса вторичной компоненты к модельному радиусу звезды ГП R_2/R_{mod} от угла наклона системы i .

ной компоненты на ГП требует предпочтительного выбора значения $i = 33^\circ$. Однако анализ параметров изученных ПП типа HW Vir (Дёминова и др., 2017) показывает наличие у их вторичных компонент систематических избытков радиуса в пределах 5–40%. Поэтому мы считаем наиболее предпочтительным значение угла наклона орбиты Lan 30 $i = 37^\circ \pm 2^\circ$, соответствующее избытку радиуса красного карлика $4 \pm 2\%$.

Применение гипотезы о соответствии массы главной компоненты средней массе $M = 0.47 M_\odot$ одиночных sdB-субкарликов требует проверки

устойчивости найденных нами оценок остальных параметров. Расчеты показали, что при повышении принятого значения массы до $M_1 = 0.49 M_\odot$ (Купфер и др., 2014) масса вторичной компоненты возрастает на 2.3–2.5% или на $\Delta M_2 = 0.003\text{--}0.004 M_\odot$ в диапазоне углов $i = 33^\circ\text{--}45^\circ$. Одновременное увеличение размеров большой полуоси Lan 30 и радиусов ее компонент на 1.2% обуславливает очень слабое изменение отношения R_2/R_{mod} . В результате можно сделать вывод, что вариации значения массы sdB-субкарлика в пределах $\Delta M_1 = 0.02\text{--}0.03 M_\odot$ не способны существенно скорректировать представленные диапазоны возможных значений угла наклона орбиты и параметров вторичной компоненты.

Итоговые предпочтительные и допустимые значения параметров Lan 30 обобщены в табл. 2. В ряде случаев они показывают заметные отличия от оценок, представленных в литературе. В частности, Вербеек и др. (2012) определили температуру sdB-субкарлика как $T_{\text{eff}} = 28\,500\text{ K}$, т.е. на $\Delta T_{\text{eff}} = 2000\text{ K}$ ниже нашего значения. Позднее Купфер и др. (2014) из исследования кривых блеска получили массы компонент $M_1 = 0.49 M_\odot$ и $M_2 = 0.12 M_\odot$. Авторы не указали найденной ими оценки i , но опубликованные значения M_1 , M_2 и K_1 соответствуют $i = 60^\circ$. Данная величина представляется нам неоправданно высокой с учетом почти синусоидальной формы кривой блеска Lan 30.

Таблица 2. Предпочтительные и допустимые (в скобках) фундаментальные параметры Lan 30

Звезда	Главная	Вторичная
P_{orb} , d	$0.11017 \pm 0.00011^*$	
a/R_\odot	$0.825 (0.813\text{--}0.833)$	
T_{eff} , K	$30\,500 \pm 1100$	
$\log g$	5.60 ± 0.10	
R/R_\odot	$0.172 (0.171\text{--}0.172)$	$0.181 (0.167\text{--}0.193)$
M/M_\odot	0.470	$0.154 (0.127\text{--}0.175)$
i°	$37 (33\text{--}45)$	

* Купфер и др., 2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном исследовании оптического излучения молодой ПП Lan 30 нами обнаружены

серьезные затруднения при определении параметров незатменных систем типа HW Vir со слабыми эффектами отражения. Наше моделирование показывает, что в таких системах при углах наклона $i = 40^\circ - 50^\circ$ длительность фаз минимума блеска увеличена на 2–3% орбитального периода. Амплитуда блеска $\Delta m = 0^m.4$ в сочетании с хорошей точностью ($\delta m = 0.01^m$) и низкой скважностью ($\delta \varphi = 0.01 P_{\text{orb}}$) дифференциальной фотометрии позволяет выявить и модельно анализировать такие искажения (Шиманский и др., 2012б). Однако для ПП с амплитудой переменности $\Delta m \approx 0^m.2$ требуется фотометрия с вдвое меньшей временной скважностью, которая может оказаться невыполнимой в силу различных наблюдательных ограничений. Поэтому отсутствие необходимой плотности фотометрических наблюдений Lap 30 позволило нам установить лишь верхнюю границу значений для угла наклона орбиты.

При определении характеристик Lap 30 мы использовали дополнительное предположение о массе главной компоненты $M_1 = 0.47 M_\odot$, соответствующей ее значению у большинства одиночных sdB-субкарликов (Хебер, 2016). Данный подход обусловлен отсутствием информации о движении вторичной компоненты в системах типа HW Vir. В работе Шиманского и др. (2012б) на основе моделирования спектров установлено, что при эффектах отражения $\Delta m = 0^m.4$ кривые лучевых скоростей имеют существенные отклонения от синусоидальной формы, позволяющие оценить отношение масс компонент. Однако кривые V_r в Lap 30 не показывают таких искажений и фиксация значения M_1 является единственным способом нахождения остальных параметров. Мы планируем использовать данное предположение при исследовании других систем типа HW Vir со слабыми эффектами отражения, что обеспечит методическую однородность результатов. Кроме того, мы задали логичное ограничение величины радиуса вторичной компоненты на уровне не менее радиуса звезд ГП аналогичной массы, что позволило зафиксировать параметры Lap 30 в относительно узких диапазонах и указать их наиболее вероятные значения. Поэтому мы считаем использование описанных предположений эффективным средством при модельном исследовании излучения и нахождении параметров аналогичных незатменных систем типа HW Vir. Однако их отбор следует проводить с учетом вышеуказанного требования к достаточной временной плотности фотометрических наблюдений.

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (включая соглашение 05.619.21.0016, уникальный идентификатор проекта RFMEFI61919X0016). Работа выполнена за счет средств субсидии 0671-

2020-0052, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности. Работы В.В. Шиманского и М.М. Габдеева проведены при финансовой поддержке РФФИ и Правительства РТ в рамках научных проектов 18-42-160003 и 19-32-60021/19.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алмейда и др. (L.A. Almeida, F. Jablonski, J. Tello, and C.V. Rodrigues), MNRAS **423**, 478 (2012).
2. Андерс, Гревес (E. Anders and N. Grevesse), Geochimica et Cosmochimica Acta **53**, 197 (1989).
3. Афанасьев В.Л., Моисеев А.В., Письма в Астрон. журн. **31**, 214 (2005) [V.L. Afanasev, A.V. Moiseev, Astron. Lett. **31**, 194 (2005)].
4. Бохлин (R.C. Bohlin), Astron. J. **111**, 1743 (1996).
5. Вербеек и др. (K. Verbeek, P.J. Groot, S. Scaringi, R. Napiwotzki, B. Spikings, R.H. Østensen, J.E. Drew, D. Steeghs, et al.), MNRAS **426**, 1235 (2012).
6. Дёминова и др. (N.R. Deminova, V.V. Shimansky, N.V. Borisov, M.M. Gabdееv, and N.N. Shimanskaya), ASP Conf. Ser. **510**, 420 (2017).
7. Жирарди и др. (L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **141**, 371 (2000).
8. Ибаноглу и др. (C. Ibanoglu, O. Cakirli, G. Tas, and S. Evren), Astron. Astrophys. **414**, 1043 (2004).
9. Иванова Д.В., Сахибуллин Н.А., Шиманский В.В., Астрон. журн. **79**, 1 (2002) [D.V. Ivanova, N.A. Sakhbullin, V.V. Shimanskii, Astron. Rep. **46**, 390 (2002)].
10. Кастелли, Куруц (F. Castelli and R.L. Kurucz), Proc. IAU Symp. 210: Modeling of Stellar Atmospheres (Ed. N. Piskunov et al., Kluwer, Dordrecht, 2003), p. A20.
11. Килкенни и др. (D. Kilkenney, D. O'Domoghue, C. Koen, A.E. Lynas-Gray, and F. van Wyk), MNRAS **296**, 329 (1998).
12. Купфер и др. (T. Kupfer, S. Geier, A. McLeod, P. Groot, K. Verbeek, V. Schaffneroth, U. Heber, C. Heuser, et al.), ASP Conf. Ser. **481**, 293 (2014).
13. Куруц (R.L. Kurucz), SAO CD-Roms (USA: Cambridge, MA02138, 1994).
14. Митрофанова А.А., Борисов Н.В., Шиманский В.В., Астрофиз. Бюлл. **69**, 88 (2014) [A.A. Mitrofanova, N.V. Borisov, and V.V. Shimansky, Astrophys. Bull. **69**, 82 (2014)].
15. Риттер (H. Ritter), Astron. Astrophys. **169**, 139 (1986).
16. Страйжис В.Л., Многоцветная фотометрия звезд (Вильнюс: Мокслас, 1977).
17. Сулейманов В.Ф., Письма в Астрон. журн. **22**, 107 (1996) [V.F. Suleimanov, Astron. Lett. **22**, 92 (1996)].
18. Сулейманов (V.F. Suleymanov), Astron. Astrophys. Trans. **2**, 197 (1992).
19. Хебер (U. Heber), Publ. Astron. Soc. Pacific **128**, 082001 (2016).

20. Шиманский В.В., Позднякова С.А., Борисов Н.В. и др., *Астрофиз. Бюлл.* **64**, 366 (2009) [V. V. Shimansky, S.A. Pozdnyakova, N.V. Borisov, et al., *Astrophys. Bull.* **64**, 349 (2009)].
21. Шиманский В.В., Борисов Н.В., Шиманская Н.Н., *Астрон. журн.* **80**, 830 (2003) [V.V. Shimansky, N.V. Borisov, N.N. Shimanskaya, *Astron. Rep.* **47**, 763 (2003)].
22. Шиманский В.В., Борисов Н.В., Сахибуллин Н.А. и др., *Астрон. журн.* **79**, 726 (2002) [V.V. Shimansky, N.V. Borisov, N.A. Sakhibullin, et al., *Astron. Rep.* **46**, 656 (2002)].
23. Шиманский В.В., Карицкая Е.А., Бочкарев Н.Г. и др., *Астрон. журн.* **89**, 821 (2012a) [V.V. Shimanskii, E.A. Karitskaya, N.G. Bochkarev, et al., *Astron. Rep.* **56**, 741 (2012a)].
24. Шиманский В.В., Якин Д.Г., Борисов Н.В., Бикмаев И.Ф., *Астрон. журн.* **89**, 956 (2012b) [V.V. Shimanskii, D.G. Yakin, N.V. Borisov, I.F. Bikmaev, *Astron. Rep.* **56**, 867 (2012b)].