

УДК 524.337.7:524.3-13/17

ПАРАМЕТРЫ КАРЛИКОВЫХ НОВЫХ ТИПА SU UMa И WZ Sge В СПОКОЙНОМ СОСТОЯНИИ. I. FL Psc, TY Psc И V455 AND

© 2023 А. А. Дудник^{1*}, В. В. Шиманский²,
Н. В. Борисов², А. А. Митрофанова², М. М. Габдеев²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, 420111 Россия

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 9 декабря 2022 года; после доработки 9 января 2023 года; принята к публикации 10 января 2023 года

В статье представлены результаты модельного анализа оптических спектров карликовых новых TY Psc, FL Psc и V455 And, относящихся к типам SU UMa и WZ Sge. Спектроскопические наблюдения выполнены на 6-м телескопе БТА САО РАН в 2013 году. Критерием отбора систем для исследований являлось их нахождение в спокойном состоянии с оптически тонким аккреционным диском и доминированием излучения белого карлика. Выполнение критерия проверялось по наблюдению широких абсорбционных линий бальмеровской серии H β в композиции с двухпиковыми эмиссиями H β , He I и Fe II. Предложена и реализована методика автоматизированного согласования модельных спектров белых карликов и наблюдаемых спектров карликовых новых на основе количественных критериев их соответствия. С ее помощью определены параметры атмосферы (эффективная температура T_{eff} и поверхностная сила тяжести $lg g$) аккректоров в TY Psc, FL Psc и V455 And, использованные для последующего нахождения значений их массы и радиуса. Предложенная в работе методика позволила одновременно получить оценки фундаментальных параметров вторичных компонент с использованием теоретических зависимостей «масса – радиус» для коричневых и красных карликов главной последовательности. В результате показана принципиальная возможность определения всех основных параметров карликовых новых типа SU UMa и WZ Sge на основе моделирования и анализа небольшого числа их спектров в спокойном состоянии.

Ключевые слова: *методы: численные — методы: наблюдательные — звезды: катаклизмические переменные — звезды: карликовые новые — белые карлики — звезды: отдельные: FL Psc, TY Psc, V455 And*

1. ВВЕДЕНИЕ

Катаклизмические переменные — это коротко-периодические полуразделенные тесные двойные системы, состоящие из белого карлика и звезды позднего спектрального класса, заполнившей свою полость Роша (Knigge 2006). Помимо периодических вариаций блеска, обусловленных изменением проекции компонент на картинную плоскость при орбитальном движении, у катаклизмических переменных наблюдаются разные виды вспышечной активности и изменения темпа аккреции (Warner 1995). Физика данных явлений имеет сложный характер, а их интенсивность зависит от фундаментальных параметров и химического состава систем, а также от локальных возмущений в газовой плазме.

Карликовые новые принадлежат к катаклизмическим переменным с дисковой формой аккреции

(Warner 1995), а системы типа SU UMa являются их подклассом с наиболее короткими значениями орбитальных периодов (Ritter and Kolb 2011). Кроме обычных вспышек с повышением блеска на $\Delta m = 2^m - 5^m$ и длительностью несколько дней, такие объекты испытывают сверхвспышки с амплитудой $\Delta m > 6^m$, продолжающиеся от 3 до 8 недель. Существует несколько моделей, объясняющих вспышки подобных систем, но наиболее разработанной из них является модель тепловой нестабильности аккреционного диска (Osaki 1989), которая в целом подтверждается наблюдениями. В течение сверхвспышек в кривых блеска систем типа SU UMa наблюдаются периодические модуляции, называемые сверхгорбами, период которых на 0.5–3% отличается от орбитального (Warner 1985). Периоды большинства звезд типа SU UMa не превышают $P_{\text{orb}} = 120$ минут, что меньше значений в «пробеле периодов» (примерно 2–3 часа). Среди карликовых новых типа SU UMa выделяют объекты типа WZ Sge, характеризующиеся нали-

*E-mail: nasya.dudnik@yandex.ru

нием только редких сверхвыпешек большой амплитуды (до $\Delta m = 9^m$) (O'Donoghue et al. 1991, Osaki 1995) со сверхгорбами и послевспышечными «эхо», а также медленным переходом из вспышечного состояния в спокойное (Uemura et al. 2008, Warner 1995). Подобные «эхо» могут вызываться рядом факторов, в том числе временным увеличением темпа переноса вещества вследствие нагрева вторичной компоненты (Buat-Ménard and Hameury 2002, Patterson et al. 1998) или повторным разогревом прецессирующего аккреционного диска, деформированного притяжением маломассивной звезды (Matthews et al. 2005, Osaki et al. 2001, Schreiber and Gänsicke 2001).

Одной из главных задач при исследовании катаклизмических переменных является определение фундаментальных параметров, значения которых позволяют установить их связь с предшествующей и последующей стадиями эволюции. Однако особенности наблюдаемого излучения таких систем лишь в редких случаях позволяют корректно решить эту задачу. Оценка параметров белых карликов у многих катаклизмических переменных осложнена преобладанием в оптическом спектре излучения аккреционного диска и струи вещества, перетекающего с поверхности вторичной компоненты. В результате становится невозможным применение стандартных методов определения эффективной температуры и поверхностной силы тяжести белых карликов, основанных на моделировании профилей бальмеровских линий H I. Поэтому для определения параметров систем используются альтернативные подходы, такие как измерение лучевых скоростей аккреционных дисков методом Шафтера (Shafter 1983), доплеровское картирование (Spruit 1998), моделирование эффектов отражения рентгеновского излучения на поверхности холодных компонент, анализ формы затмений и т.д. Использование в названных подходах косвенной информации о физике и движении компонент приводит к существенному снижению точности определяемых параметров, а также не позволяет получить их однородным образом для большого числа объектов. Однако в ряде исследований ультрафиолетовых спектров карликовых новых было эффективно реализовано моделирование абсорбционных линий лаймановской серии (Nadalin and Sion 2001, Szkody et al. 2013). В результате авторами получены значения параметров атмосфер белых карликов и оценки темпов их охлаждения после вспышки, что дает информацию о строении атмосфер и более глубоких слоев звезд.

Позднее при анализе оптических спектров карликовой новой GSC 02197–00886 было показано, что в ее спокойном состоянии аккреционный диск становится оптически тонким и в континууме доминирует излучение белого карлика (Mitrofanova et al.

2014). В результате модельное описание наблюдаемых профилей бальмеровских линий позволяет найти параметры его атмосферы, а их последующее сравнение с моделями внутреннего строения белых карликов дает полный набор фундаментальных параметров. В итоге авторами (Mitrofanova et al. 2014) предложен метод определения параметров карликовых новых типа WZ Sge и SU UMa на основе анализа небольшого количества наблюдаемых оптических спектров в спокойном состоянии. Подобный подход не требует ультрафиолетовых наблюдений, выполняемых на космических станциях для малого числа объектов. Кроме того, предварительный фотометрический мониторинг карликовых новых в низком состоянии и их последующие спектроскопические наблюдения могут проводиться на оптических телескопах разной апертуры, что повышает качество получаемых данных при небольшой загрузке крупных инструментов. Таким образом, метод моделирования и анализа оптических спектров открывает перспективы для изучения большой группы карликовых новых в рамках одного подхода.

В работе Dudnik et al. (2021) при модельном исследовании оптических спектров трех карликовых новых типа WZ Sge показано различное влияние эффективной температуры T_{eff} и поверхностной силы тяжести $\lg g$ белых карликов на профили линий H I. В результате оба параметра могут определяться одновременно из анализа 3–4 бальмеровских линий в наблюдаемых спектрах. Применение такого анализа позволило получить наборы параметров белых карликов в FL Psc, TY Psc и V455 And. Однако в исследовании Dudnik et al. (2021) использованы качественные критерии для оценки согласия наблюдаемых и теоретических профилей линий, а уточнение параметров проводилось в ручном режиме. Подобный подход с одной стороны вносит субъективные ошибки в получаемые результаты, а с другой — не позволяет корректно установить их точность. Поэтому в текущей работе нами реализована методика автоматического анализа наблюдаемых спектров с применением количественных оценок их согласия с модельными. Кроме того, нами предложена и реализована методика определения параметров холодных компонент карликовых новых на основе найденных параметров белых карликов и зависимости «масса — светимость» для звезд главной последовательности.

Анализ обзора литературных данных для FL Psc, TY Psc и V455 And (см. ниже) показывает, что оценки их фундаментальных параметров немногочисленны и в основном определены с использованием эмпирических зависимостей, требующих уточнения. Поэтому в рамках данной работы мы выполнили наблюдения и модельные

исследования их оптических спектров в спокойном состоянии, что позволило определить практически полные наборы параметров. В разделе 2 дан краткий обзор исследуемых объектов, описаны их спектроскопические наблюдения и качественные характеристики оптических спектров. В разделе 3 изложена методика моделирования с ее применением к анализу наблюдений и нахождением параметров атмосфер белых карликов, а раздел 4 посвящен определению фундаментальных параметров систем. Краткое обсуждение полученных результатов содержится в разделе 5.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Нами выполнен анализ спектров катаклизмических переменных FL Psc, TY Psc и V455 And, ранее классифицированных как карликовые новые типа WZ Sge и SU UMa. Ниже обобщены результаты их предыдущих исследований, представленные в настоящее время в литературе.

Объект TY Psc (SDSS J012539.35+322308.7) является карликовой новой типа SU UMa (Szkody and Mattei 1984) со средними интервалами между вспышками 11–35 дней, а между сверхвспышками — 370 дней (Nadalin and Sion 2001). В спокойном состоянии яркость TY Psc составляет $m_V = 17^m$, в то время как во вспышках она возрастает до $m_V = 12^m$ (Nadalin and Sion 2001). Орбитальный период системы равен $P_{orb} = 98.40 \pm 0.07$ минут (Thorstensen et al. 1996). Кунъява и др. (Kunjaya et al. 2001) определили период сверхгорбов $P_{sp} = 101.9 \pm 0.4$ минут, который хорошо согласуется с результатами Szkody and Feinswog (1988) и примерно на 3.6% длиннее орбитального периода. В спокойном состоянии голубой диапазон оптического спектра TY Psc содержит широкие абсорбционные линии H I с двухпиковыми эмиссионными компонентами в их ядрах, что свидетельствует о доминировании излучения белого карлика (Szkody 1985). Анализ ультрафиолетовых спектров данного состояния (Nadalin and Sion 2001) показал, что эффективная температура и логарифм силы тяжести главной компоненты равны $T_{eff} = 25\,000$ К и $\lg g = 8$ dex, хотя белые карлики систем с периодами меньше «пробела периодов», как правило, холоднее (Urban et al. 2000). Надалин и Сион (Nadalin and Sion 2001) определили массу горячей компоненты $M_1 = 0.55 M_\odot$, угол наклона орбиты системы $i = 18^\circ$ и расстояние до объекта $d = 220$ пк. Подобный малый угол наклона орбиты TY Psc указывает на оптимальные условия видимости белого карлика. Однако, в статье Шкоди и Фейнсвога (Szkody and Feinswog 1988) из анализа фотометрических данных в инфракрасном диапазоне приводится другая оценка угла наклона:

$i \sim 55^\circ$. Орбитальные модуляции блеска и двухпиковые эмиссионные линии в спектрах подтверждают предположение о достаточно большом угле наклона орбиты (Papadaki et al. 2009). В работе Szkody and Feinswog (1988) обнаружены изменения блеска TY Psc с периодом 46 минут. С учетом малого вклада холодной звезды в излучение TY Psc на уровне ниже 20% (Ciardi et al. 1998) данные изменения связываются с переменными условиями видимости горячего пятна в аккреционном диске (Papadaki et al. 2009).

Система FL Psc (ASAS 002511+1217.2) открыта как переменный объект в автоматическом обзоре неба ASAS (Price et al. 2004) и независимо обнаружена рентгеновской обсерваторией ROSAT как 1RXS J002510.8+121725 (Voges et al. 1999) и обзором HQS (Hamburg Quasar Survey) как голубой точечный источник (Zickgraf et al. 2003). Фотометрические и спектроскопические характеристики FL Psc указывают на принадлежность к карликовым новым типа WZ Sge (Golovin et al. 2005, Templeton et al. 2006) с повышением блеска во время вспышки на $\Delta m = 7^m$ и максимальным интервалом между вспышками до 66 лет (Bedient 2006). Орбитальный период системы равен $P_{orb} = 81.59 \pm 0.05$ минут (Templeton et al. 2006). Паттерсон и др. (Patterson et al. 2005) определили значения радиуса ($R_2 = 0.119 \pm 0.004 R_\odot$) и массы ($M_2 = 0.072 \pm 0.007 M_\odot$) вторичной компоненты и оценили отношение масс компонент $q = 0.096 \pm 0.009$. Для оценки массы главной компоненты авторами использовалась средняя величина масс белых карликов в катаклизмических переменных $M_1 = 0.75 \pm 0.16 M_\odot$ (Knigge 2006, Patterson et al. 2005). Однако Пирсон Pearson (2006) получил иные параметры FL Psc: $q = 0.097 \pm 0.008$, $M_1 = 0.624 \pm 0.049 M_\odot$ и $M_2 = 0.061 M_\odot$. В ее кривых блеска в 2004 году амплитуда изменения яркости превышает 0^m3 , что указывает на большую величину угла наклона орбиты ($55^\circ \leq i \leq 75^\circ$) (Papadaki et al. 2009). Ak et al. (2008) с применением статистического метода (Ak et al. 2007) нашли расстояние до FL Psc равным $d = 156$ пк (Ak et al. 2008). Близкое значение $d = 158$ пк получено в обзоре Gaia (Vallenari et al. 2022), но ряд авторов дают оценку $d = 125$ пк (Ishioka et al. 2007, Reis et al. 2013).

Объект V455 And (HS 2331+3905) (Broens et al. 2007, Samus et al. 2007) считается катаклизмической переменной с затмением горячего пятна в аккреционном диске (Araujo-Betancor et al. 2004), впервые представленной в обзоре HQS (Gänsicke et al. 2002, Hagen et al. 1995). Ряд авторов (Bloemen et al. 2013, Tovmassian et al. 2007) относят систему к классу промежуточных полярных, но наличие сверхвспышек

требуется классифицировать ее как карликовую новую типа WZ Sge (Araujo-Betancor et al. 2005). Арайо-Бетанкур и др. (Araujo-Betancor et al. 2004; 2005) нашли орбитальный период $P_{orb} = 81.085 \pm 0.001$ минут и период положительных сверхгорбов $P_{sp} = 83.38$ минут, который хорошо согласуется с результатами Gänsicke (2007), Maehara et al. (2009) и на 1.6% длиннее орбитального периода. Одновременно определен период отрицательных сверхгорбов $P_{sn} = 80.37$ минут, что на 0.9% короче орбитального (Kozhevnikov 2015). Следует отметить, что у V455 And наблюдаются изменения блеска с периодами 300–360 с (Araujo-Betancor et al. 2004; 2005, Kozhevnikov 2015, Szkody et al. 2013) или около 282 с (Silvestri et al. 2012), характерные для объектов типа ZZ Ceti и объясняемые нерадиальными пульсациями белого карлика. Дополнительно у V455 And обнаружены когерентные колебания с периодом 67.619 ± 0.002 секунд (Araujo-Betancor et al. 2005, Bloemen et al. 2013, Gänsicke 2007), отражающие вращение белого карлика, и модуляции лучевой скорости с периодом около 3.5 часа (Araujo-Betancor et al. 2005, Gänsicke 2007), соответствующим периоду прецессии белого карлика (Gänsicke 2007, Tovmassian et al. 2007). Арайо-Бетанкур и др. (Araujo-Betancor et al. 2005) определили температуру главной компоненты в спокойном состоянии $T_{eff} = 10\,500 \pm 250$ K, близкую к температурам объектов типа ZZ Ceti в полосе неустойчивости $10\,700 \text{ K} \leq T_{eff} \leq 12\,500 \text{ K}$, а также расстояния до объекта $d = 90 \pm 15$ пк. Из анализа ультрафиолетовых спектров V455 And через 1125 и 1471 дней после сверхвысшики 2007 года получены значения температуры белого карлика $T_{eff} = 11\,100 \pm 250$ K и $T_{eff} = 10\,850 \pm 300$ K соответственно (Szkody et al. 2013). Они превышают оценки Araujo-Betancor et al. (2005), что позволило сделать вывод о продолжительности охлаждения белого карлика более 4 лет (Szkody et al. 2013). Угол наклона орбиты равен 75° (Matsui et al. 2009).

В нашем исследовании использовались спектроскопические данные из работы Dudnik et al. (2021). Наблюдения FL Psc, TY Psc и V455 And выполнены в ночь 11–12 сентября 2013 года на 6-м телескопе БТА с применением редуктора светосилы первичного фокуса SCORPIO (Afanasiev and Moiseev 2005), гризмы VPHG1200g (1200 штрихов/мм) и EEV 42-40 CCD-приемника (2048 × 2048 пикселя, размером 13.5 × 13.5 мкм) (Murzin et al. 2016), обусловивших разрешение $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$ в интервале длин волн 4050–5800 Å. Спектры объектов получены в различных астроклиматических условиях с размерами звездных изображений $1''.2$ – $1''.3$. С целью минимизации влияния космических частиц для FL Psc и V455 And

накоплено два, а для TY Psc — три ПЗС-изображения в индивидуальных наблюдательных блоках. Продолжительность экспозиций в 300 с обеспечила среднее отношение «сигнал/шум» в одной экспозиции $S/N \approx 35$ у TY Psc и $S/N \approx 60$ у V455 And и FL Psc. Для модельного анализа спектры каждого объекта усреднены с повышением итогового отношения S/N . Отметим, что исследуемые системы на момент наблюдений показывали блеск заметно ниже среднего ($m_V = 16^m.8$ у FL Psc, $m_V = 16^m.6$ у V455 And, $m_V = 17^m.4$ у TY Psc), что косвенно подтверждало их нахождение в низком состоянии. Одновременно с исследуемыми объектами наблюдались спектры лампы с полым катодом и наполнением He–Ne–Ar, спектрофотометрических стандартов HZ 44 и BD 28°4211 (Bohlin 1996) с целью последующих калибровок длин волн и потоков излучения. Гелиоцентрическая юлианская дата середины наблюдений FL Psc составила HJD = 2456547.6688, TY Psc — HJD = 2456547.7230, V455 And — HJD = 2456547.7056. Первичная редукция данных, включавшая все стандартные процедуры, подробно представлена в работе Dudnik et al. (2021) и здесь ее описание не приводится.

В оптическом спектре систем, пример которого представлен на Рис. 1 для V455 And, наблюдается плоский континуум со слабо отрицательным градиентом $\frac{dF_\lambda}{d\lambda}$ и широкими ($\Delta\lambda > 100 \text{ \AA}$) абсорбционными линиями бальмеровской серии H I. В центрах линий присутствуют интенсивные двухпиковые эмиссионные компоненты с полушириной $\Delta\lambda \approx 30 \text{ \AA}$ и разделением пиков $\Delta\lambda \approx 10 \text{ \AA}$. Аналогичные профили имеют более слабые эмиссионные линии He I, C II и Fe II, что говорит об их общем формировании в относительно холодной среде со значениями температуры $T_e = 9000$ – $14\,000$ K. Поэтому можно сделать вывод, что наблюдаемые спектры FL Psc, TY Psc и V455 And соответствуют карликовым новым в спокойном состоянии с доминированием излучения белого карлика и с накладывающимися на его континуум эмиссионными линиями оптически тонкого аккреционного диска. Вывод позволяет провести модельное изучение абсорбционных крыльев линий H I согласно методике Mitrofanova et al. (2014), а также исследовать профили их эмиссионных компонент с целью независимого определения ряда характеристик аккреционных дисков.

Нормировка наблюдаемых спектров для анализа профилей эмиссий выполнена при их сравнении с модельным спектром белого карлика с параметрами атмосферы $T_{eff} = 23\,000$ K и $\lg g = 8.2$ dex, которые (см. ниже) в пределах ошибок соответствуют параметрам главных компонент исследуе-

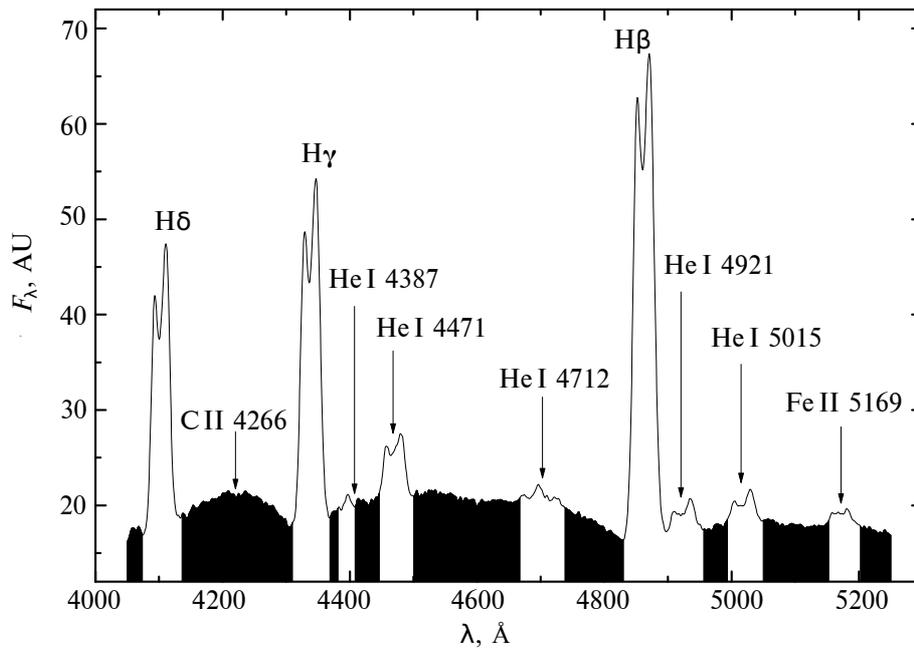


Рис. 1. Усредненный ненормированный спектр V455 And с выделенными диапазонами маски для сравнения модельных и наблюдаемых спектров

мых систем. Участки локального континуума шириной $\Delta\lambda = 30\text{--}50 \text{ \AA}$ выбирались на удалении не менее $\Delta\lambda = 100 \text{ \AA}$ от лабораторных длин волн линий HI с контролем отсутствия в них заметных эмиссий He I, C II и Fe II. В границах этих участков вычислялись средние отношения потоков в наблюдаемом и теоретическом спектрах $\frac{F_{\lambda}^{\text{obs}}}{F_{\lambda}^{\text{mod}}}$.

Построенные зависимости $\frac{F_{\lambda}^{\text{obs}}}{F_{\lambda}^{\text{mod}}}$ от длины волны аппроксимированы многочленом четвертой–пятой степени. Итоговая нормировка выполнена при делении наблюдений на этот аппроксимирующий многочлен. Заметим, что при модельном анализе наблюдаемых спектров (см. ниже) процедура нормировки проводилась аналогичным образом, но с применением нескольких теоретических спектров белых карликов с разными значениями T_{eff} и $\lg g$.

Разделение максимумов интенсивности в двухпиковых профилях эмиссионных линий отражает дисперсию лучевых скоростей плазмы в областях их доминирующего излучения. Поскольку формирование эмиссионных линий HI преобладает в наиболее холодных частях аккреционного диска, то величина межпикового расстояния в балмеровских линиях соответствует разности кеплеровских скоростей движения плазмы на его внешнем радиусе (Yakin et al. 2011). Поэтому мы измерили эти расстояния в профилях линий HI, а также — в профилях наиболее сильных линий He I с последующим вычислением разности лучевых скоростей на

противоположных краях диска согласно формуле:

$$V_{\text{out}} \sin i = c \frac{\Delta\lambda}{2\lambda}.$$

В таблице 1 представлены значения межпиковых расстояний в различных эмиссионных линиях и найденные по ним дисперсии скоростей. Поскольку в данных, определенных с использованием эмиссионных линий He I, наблюдается большой разброс значений, а их формирование происходит в заведомо более глубоких частях диска, то для дальнейшего исследования применялись средние величины, вычисленные по линиям HI: $488 \pm 57 \text{ км с}^{-1}$, $403 \pm 8 \text{ км с}^{-1}$ и $617 \pm 8 \text{ км с}^{-1}$ для TY Psc, FL Psc и V455 And соответственно.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕР БЕЛЫХ КАРЛИКОВ

Определение параметров атмосфер белых карликов в FL Psc, TY Psc и V455 And выполнялось в соответствии с методикой модельного анализа абсорбционных крыльев линий HI, предложенной в Mitrofanova et al. (2014) и подробнее разработанной и обоснованной в Dudnik et al. (2021). Сетки гидростатических, плоскопараллельных моделей атмосфер белых карликов для металличности $[M/H] = -5.0$ и нулевого содержания гелия предварительно рассчитаны в диапазоне $T_{\text{eff}} = 10\,000\text{--}90\,000 \text{ К}$ с шагом

Таблица 1. Значения межпиковых расстояний ($\Delta\lambda$) в эмиссионных линиях H I, He I и дисперсии лучевых скоростей ($V_{\text{out}} \sin i$) в аккреционных дисках FL Psc, TY Psc и V455 And

Объект	Эмиссионная линия	$\Delta\lambda$, Å	$V_{\text{out}} \sin i$, км с ⁻¹
FL Psc	H β	12.96 ± 0.21	400 ± 7
	H γ	11.72 ± 0.21	405 ± 8
	H δ	11.1 ± 0.21	405 ± 8
	He I 4921	14.72 ± 0.55	448 ± 17
	He I 5015	6.51 ± 0.27	194 ± 9
TY Psc	H β	14.93 ± 0.21	460 ± 7
	H γ	14.27 ± 0.21	493 ± 8
	H δ	14.02 ± 4.28	512 ± 157
	He I 4921	17.02 ± 0.39	518 ± 12
	He I 5015	17.63 ± 0.24	527 ± 7
V455 And	H β	19.1 ± 0.21	590 ± 8
	H γ	17.91 ± 0.21	618 ± 8
	H δ	17.56 ± 0.21	642 ± 8
	He I 4471	20.11 ± 0.21	674 ± 7
	He I 4921	24.13 ± 0.21	735 ± 6
	He I 5015	24.02 ± 0.21	718 ± 7

$\Delta T_{\text{eff}} = 2000$ К и $\lg g = 6.75\text{--}9.25$ dex с шагом $\Delta \lg g = 0.25$ dex с применением комплекса ATLAS12 (Kurucz 2005), модернизированного и адаптированного к персональным компьютерам В. В. Цымбалом. При моделировании структуры атмосферы учитывалось возможное наличие лучистого и конвективного переноса в зависимости от выбранных параметров звезды. Для всех полученных моделей вычислялись синтетические спектры выходящего излучения в диапазоне длин волн 3900–5250 Å с шагом $\Delta\lambda = 0.05$ Å. В результате сформирована однородная сетка оптических спектров белых карликов для широкого диапазона параметров, допускающая их корректную интерполяцию на произвольную пару выбранных значений T_{eff} и $\lg g$. Особенности реализации и результаты тестирования линейной интерполяцией по обоим параметрам представлены в работе Dudnik et al. (2021). Применяемая методика интерполяции обеспечивает расчет интенсивностей в получаемых спектрах с точностью не ниже 0.4% во всем диапазоне параметров, что можно считать достаточным для

корректного анализа наблюдений с отношением $S/N < 150$.

Определение параметров главных компонент изучаемых систем выполнено путем сравнения их наблюдаемых спектров с теоретическими спектрами белых карликов. Для каждого объекта выбиралась индивидуальная маска сравнения (см. Рис. 1), включающая диапазоны длин волн, свободные от эмиссионных компонент линий H I, эмиссионных линий He I, C II, Fe II и возможных искажений космическими частицами. Согласие наблюдаемого и теоретического спектров определялось расчетом их среднеквадратичных уклонений

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (F_{\lambda}^{\text{obs}} - F_{\lambda}^{\text{mod}})^2}$$

в пределах заданной спектральной маски. Расчет значений σ производился для сетки параметров белых карликов с $\Delta T_{\text{eff}} = 1000$ К и $\Delta \lg g = 0.1$ dex. В результате нами построены двумерные распределения величин σ по обоим параметрам, в которых определялась точка глобального минимума. Примеры двумерных распределений $\ln(\sigma)$ представлены на Рис. 2, значения T_{eff} и $\lg g$ для точек минимумов — в таблице 2, а сравнение наблюдаемых и модельных спектров для этих значений — на Рис. 3.

Для оценки ошибок T_{eff} и $\lg g$ мы рассчитали разность между величиной σ_{min} в минимуме распределения и ошибками наблюдений, определяемыми имеющимся уровнем шумов

$$\sigma_{\text{min(mod)}} = \sqrt{(\sigma_{\text{min}})^2 - (N/S)^2},$$

где N/S — отношение шум/сигнал в усредненном наблюдаемом спектре. Полученные значения $\sigma_{\text{min(mod)}}$ можно считать минимальной ошибкой моделирования. Оценки пределов изменений T_{eff} и $\lg g$, то есть оценки их возможных ошибок, определялись из условия удвоения величины $\sigma_{\text{min(mod)}}$. Найденные значения эффективной температуры белых карликов близки у изученных систем, но оказываются на $\Delta T_{\text{eff}} \approx 3000$ К выше полученных Дудник и др. (Dudnik et al. 2021). Исправленные значения поверхностной силы тяжести $\lg g = 8.21 \pm 0.07$ dex совпадают у трех систем в пределах ошибок их определения, тогда как в работе Dudnik et al. (2021) они показывали более значимые вариации: $\lg g = 8.3$ dex у FL Psc, $\lg g = 8.2$ dex у TY Psc, $\lg g = 8.0$ dex у V455 And.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТ

При вычислении масс M_1 и радиусов R_1 главных компонент использовались трехпараметрические зависимости «температура — масса — радиус»

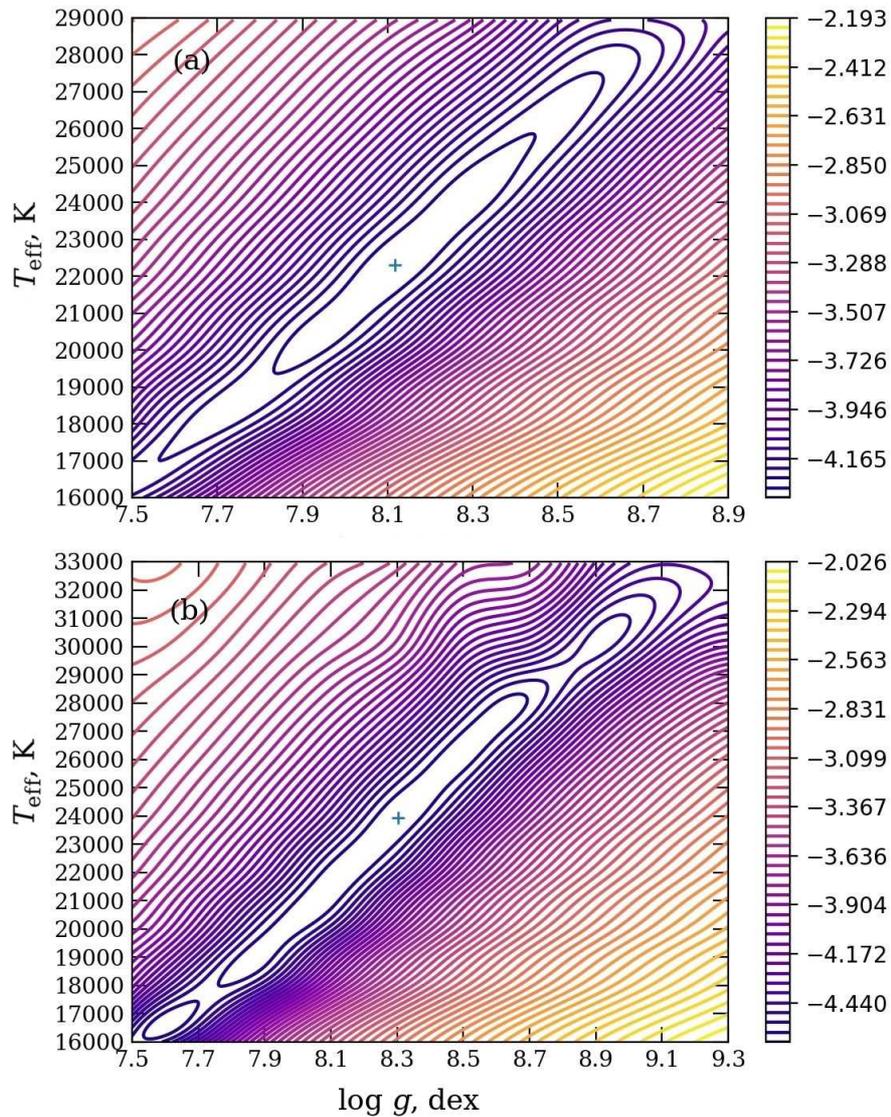


Рис. 2. Двухмерные распределения $\ln(\sigma)$ от T_{eff} и $\lg g$ для FL Psc (a) и V455 And (b).

(Panei et al. 2000) для белых карликов с доминированием различных химических элементов в ядре. По результатам предварительных тестов массы главных компонент $M \geq 0.70 M_{\odot}$, что исключает наличие легкого гелиевого ядра. Применение зависимостей для белых карликов с углеродными и кислородными ядрами приводит к значениям масс, различающимся на $\Delta M < 0.01 M_{\odot}$, что меньше ошибок их определения. В итоге мы выбрали результаты модельных расчетов для звезд с кислородным ядром, т.к. при формировании белых карликов с массами $M = 0.70 M_{\odot}$ вероятен интенсивный синтез кислорода на предшествующих стадиях эволюции.

Процесс определения значений M_1 и R_1 носил итерационный характер с использованием ранее найденных величин $\lg g$ и T_{eff} . Для пробной оцен-

ки массы по зависимости «температура – масса – радиус» определялось значение R_1 и с ним по формуле

$$\lg \left(\frac{M/M_{\odot}}{(R/R_{\odot})^2} \right) = \lg g_{\text{mod}} - \lg g_{\odot}$$

вычислялась модельная поверхностная сила тяжести $\lg g_{\text{mod}}$, которая сравнивалась со значением $\lg g$, полученным из анализа спектров. Процесс уточнения продолжался до совпадения двух оценок сила тяжести с точностью до 0.005 dex, ограничивающей ошибки в определении M_1 и R_1 на уровне 1%. Итоговые значения масс и радиусов, а также данные об их возможных ошибках, обусловленных погрешностями параметров атмосфер, приведены в таблице 2. Отметим, что в литературе отсутствуют результаты определения массы белого карлика

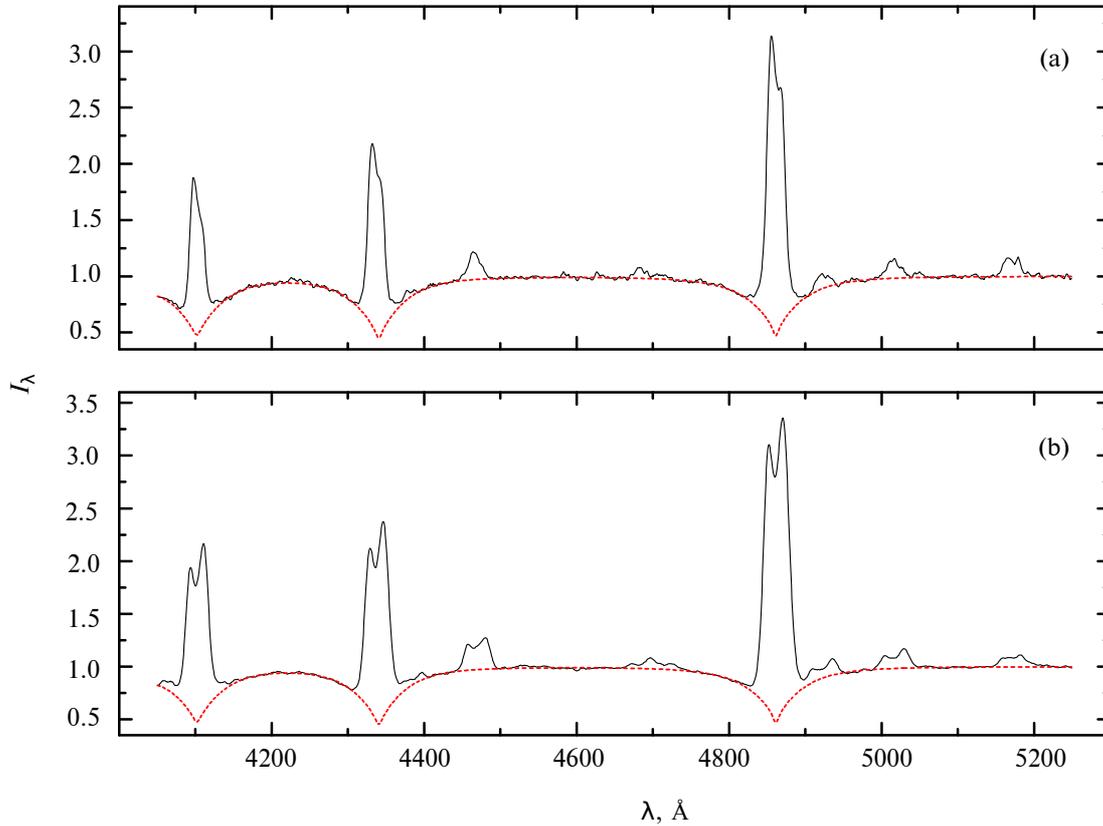
Таблица 2. Итоговые значения параметров FL Psc, TY Psc и V455 And

Параметр	FL Psc	TY Psc	V455 And
P_{orb} , min	81.50 ± 0.04^a	98.40 ± 0.07^b	$81.085 \pm 0.001^{d,e}$
$T_{\text{eff},1}$, K	$22\,300 \pm 1800$	$25\,000 \pm 1500$	$23\,800 \pm 2200$
$\log g_1$, dex	8.14 ± 0.14	8.20 ± 0.11	8.29 ± 0.18
M_1/M_{\odot}	0.70 ± 0.07	0.74 ± 0.06	0.77 ± 0.09
R_1/R_{\odot}	0.0118 ± 0.0010	0.0109 ± 0.0008	0.0104 ± 0.0012
K_1 , km s^{-1}	46 ± 5^a	53 ± 5^b	32
M_2/M_{\odot}	0.114 ± 0.005	0.139 ± 0.004	0.112 ± 0.007
R_2/R_{\odot}	0.132 ± 0.005	0.159 ± 0.005	0.130 ± 0.007
q	0.158 ± 0.010	0.188 ± 0.009	0.156 ± 0.012
i , deg	43 ± 7	55 ± 4^c	$\approx 75^f$
A/R_{\odot}	0.587 ± 0.004	0.674 ± 0.004	0.582 ± 0.006

^a — Templeton et al. (2006), ^b — Thorstensen et al. (1996),

^c — Szkody and Feinswog (1988), ^d — Araujo-Betancor et al. (2004),

^e — Araujo-Betancor et al. (2005), ^f — Matsui et al. (2009).

**Рис. 3.** Наблюдаемые (сплошные линии) и теоретические (штриховые линии) спектры FL Psc (a) и V455 And (b).

V455 And, а имеющиеся оценки масс главных компонент TY Psc ($M_1 = 0.55 M_{\odot}$ (Nadalin and Sion 2001)) и FL Psc ($M_1 = 0.624 \pm 0.049 M_{\odot}$ (Pearson 2006)) оказываются существенно меньше полученных нами.

Для нахождения параметров вторичных компонент нами реализована методика одновременного применения модельных зависимостей «масса — радиус» для коричневых (Baraffe et al. 2003) и красных (Girardi et al. 2000) карликов

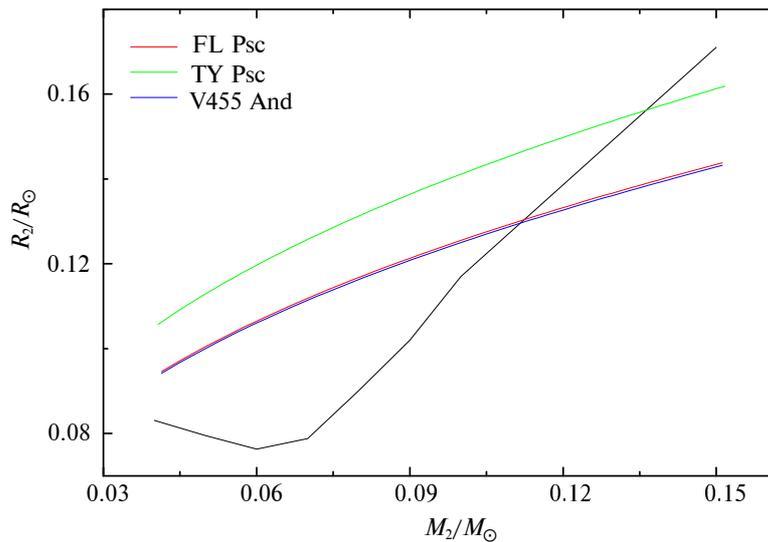


Рис. 4. Сравнение размеров полости Роша вторичных компонент FL Psc, TY Psc и V455 And (цветные линии) с зависимостью «масса – радиус» для звезд главной последовательности (черная линия).

нулевого возраста главной последовательности с солнечным химическим составом и формулы Игглтона (Eggleton 1983) для оценки радиусов полостей Роша компонент двойных систем

$$R_L = \frac{0.49 q^{2/3}}{0.6 q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}, 0 < q < \infty,$$

где R_L — относительный (в единицах большой полуоси) радиус полости Роша, а q — отношение масс выбранной и соседней компонент $\frac{M_2}{M_1}$. Для

заданного набора значений q с учетом известной массы главной компоненты M_1 вычислялись большая полуось системы A , масса холодной звезды M_2 , относительный R_{L2}/A и абсолютный R_{L2} размеры ее полости Роша. Последний сравнивался со значением радиуса звезды главной последовательности заданной массы из объединенной зависимости «масса – радиус» (Baraffe et al. 2003, Girardi et al. 2000) с нахождением точки пересечения двух кривых, как показано на Рис. 4 для TY Psc, FL Psc и V455 And. Следуя предположениям Kolbin et al. (2022), мы задавали превышение радиуса полости Роша холодной звезды над ее модельным радиусом на уровне 5%. Данное превышение может быть обусловлено частичной запятненностью поверхности звезды, искажением ее формы вследствие притяжения со стороны белого карлика и рядом других факторов.

Итоговые значения M_2 и R_2 вместе с ошибками их определения представлены в Таблице 2.

С применением значений $V_{\text{out}} \sin i$ в рамках гипотезы о соответствии расстояний между пиками эмиссионных линий удвоенной кеплеровской

скорости на внешнем крае диска (см. выше) нами вычислены размеры радиусов аккреционных дисков R_{out} в карликовых новых TY Psc, FL Psc и V455 And, показанные в Таблице 3. Согласно утверждению Yakin et al. (2011), внешний радиус аккреционного диска составляет порядка 80% от эффективного радиуса полости Роша аккретора R_{L1} , что позволяет определить ее размеры при известном значении угла наклона орбиты i . Сравнение результатов расчетов R_{out} и R_{L1} с применением описанного подхода и на основе найденных выше фундаментальных параметров компонент приведено в Таблице 3.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа данных в Таблице 3 очевидно, что использование межпиковых расстояний приводит к систематически большим размерам полости Роша аккретора. Более того, найденные этим методом значения R_{out} для всех исследуемых систем превышают размеры соответствующей полости Роша R_{L1} , вычисленные из параметров компонент. Отметим, что последняя оценка R_{L1} зависит главным образом от орбитального периода P_{orb} и в меньшей степени от масс компонент и их отношения q . Поэтому большие погрешности, вероятно, имеются в радиусах R_{L1} , полученных из измерения профилей эмиссий. Их ошибки могут объясняться завышением в литературе оценок угла наклона или искажениями эмиссионных профилей бальмеровских линий при их наложении на абсорбционные профили этих линий в спектре белого карлика. В целом, мы пришли к выводу, что размеры аккреционных дисков, определяемые на основе анализа

Таблица 3. Оценки R_{out} и R_{L1} в FL Psc, TY Psc и V455 And, полученные по межпиковым расстояниям (метод 1) и фундаментальным параметрам компонент (метод 2)

Система	R_{out}/R_{\odot}		R_{L1}/R_{\odot}	
	Метод 1	Метод 2	Метод 1	Метод 2
FL Psc	0.36 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.44 ± 0.03	0.32 ± 0.03
TY Psc	0.39 ± 0.04	0.28 ± 0.03	0.49 ± 0.05	0.35 ± 0.03
V455 And	0.34 ± 0.03	0.25 ± 0.03	0.42 ± 0.03	0.32 ± 0.03

двухпиковых эмиссионных профилей, не обладают уровнем точности лучше 30%.

В данной работе нами представлена комплексная методика определения практически всех фундаментальных параметров карликовых новых на основе модельного анализа их оптических спектров в спокойном состоянии. Для ее применения необходимо получение ограниченного наблюдательного материала, обеспечивающего отношение «сигнал/шум» порядка 100 или выше. Более того, в работе Dudnik et al. (2022) показано, что использование более шумных спектров с $S/N \approx 80$ не является критическим препятствием при определении параметров атмосфер белых карликов. Наблюдения такого качества могут проводиться для объектов с $m_V = 16^{\text{m}}-17^{\text{m}}$ на телескопах с апертурой $D = 1.5-2.5$ м при продолжительности экспозиций 2–3 часа или на крупных телескопах при экспозициях 10–15 минут. Таким образом, наша методика позволяет относительно легко получить наборы параметров нескольких десятков карликовых новых типа SU UMa и WZ Sge. Заметим, что в наиболее поздней версии каталога тесных двойных систем (Ritter and Kolb 2011) лишь для 42 подобных объектов представлены оценки массы белых карликов, а для 36 объектов — значения масс вторичных компонент. Их значительная часть получена с использованием эмпирических зависимостей между периодом сверхгорбов и отношением масс компонент или между орбитальным периодом и массой донора. Поэтому реализованная нами методика позволяет как значимо расширить список карликовых новых с известными параметрами, так и определить их с применением модельного анализа наблюдений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Обновление приборной базы осуществляется рамках национального проекта «Наука и университет». Авторы выражают признательность рецензенту за высказанные полезные замечания и благожелательное отношение к нашей работе

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10064, <https://rscf.ru/project/22-72-10064/>.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. L. Afanasiev and A. V. Moiseev, *Astronomy Letters* **31**, 194 (2005).
2. T. Ak, S. Bilir, S. Ak, and Z. Eker, *New Astronomy* **13**, 133 (2008).
3. T. Ak, S. Bilir, S. Ak, and A. Retter, *New Astronomy* **12**, 446 (2007).
4. S. Araujo-Betancor, B. T. Gänsicke, H.-J. Hagen, and et al., *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica (Serie de Conferencias)* **20**, 190 (2004).
5. S. Araujo-Betancor, B. T. Gänsicke, H.-J. Hagen, and et al., *Astron. and Astrophys.* **430**, 629 (2005).
6. I. Baraffe, G. Chabrier, T. S. Barman, et al., *Astron. and Astrophys.* **402**, 701 (2003).
7. J. Bedient, *Information Bull. Var. Stars* **5699** (2006).
8. S. Bloemen, D. Steeghs, K. De Smedt, and et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **429**, 3433 (2013).
9. R. C. Bohlin, *Astron. J.* **111**, 1743 (1996).
10. E. Broens, D. Vansteelandt, H. Hautecler, and et al., *IAU Circ.* **8876** (2007).
11. V. Buat-Ménard and J.-M. Hameury, *Astron. and Astrophys.* **386**, 891 (2002).
12. D. R. Ciardi, S. B. Howell, P. H. Hauschildt, and F. Allard, *Astrophys. J.* **504**, 450 (1998).
13. A. Dudnik, V. Shimansky, N. Borisov, et al., *Acta Astrophysica Taurica* **3** (1), 12 (2022).
14. A. A. Dudnik, A. A. Mitrofanova, V. V. Shimansky, et al., *Research in Astron. and Astrophys.* **21** (7), id. 158 (2021).
15. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983).
16. B. T. Gänsicke, *ASP Conf. Ser.* **372**, 597 (2007).
17. B. T. Gänsicke, H.-J. Hagen, and D. Engels, *ASP Conf. Ser.* **261**, 190 (2002).

18. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000).
19. A. Golovin, A. Price, and M. Templeton, *Information Bull. Var. Stars* **5611** (2005).
20. H.-J. Hagen, D. Groote, D. Engels, and D. Reimers, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **111**, 195 (1995).
21. R. Ishioka, K. Sekiguchi, and H. Maehara, *Publ. Astron. Soc. Japan* **59**, 929 (2007).
22. C. Knigge, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **373**, 484 (2006).
23. A. I. Kolbin, N. V. Borisov, N. A. Serebriakova, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **511** (1), 20 (2022).
24. V. P. Kozhevnikov, *New Astronomy* **41**, 59 (2015).
25. C. Kunjaya, K. Kinugasa, R. Ishioka, and et al., *Information Bull. Var. Stars* **5128** (2001).
26. R. L. Kurucz, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi* **8**, 14 (2005).
27. H. Maehara, A. Imada, K. Kubota, and et al., *ASP Conf. Ser.* **404**, 57 (2009).
28. R. Matsui, M. Uemura, A. Arai, and et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **61**, 1081 (2009).
29. O. M. Matthews, M. R. Truss, G. A. Wynn, and R. Speith, *ASP Conf. Ser.* **330**, p. 171 (2005).
30. A. A. Mitrofanova, N. V. Borisov, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **69**, 82 (2014).
31. V. Murzin, S. Markelov, V. Ardiljanov, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki (Advances Applied Physics)* **4**, 500 (2016) [in Russian].
32. I. Nadalin and E. M. Sion, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **113**, 829 (2001).
33. D. O'Donoghue, A. Chen, F. Marang, and et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **250**, 363 (1991).
34. Y. Osaki, *Publ. Astron. Soc. Japan* **41**, 1005 (1989).
35. Y. Osaki, *Publ. Astron. Soc. Japan* **47**, 47 (1995).
36. Y. Osaki, F. Meyer, and E. Meyer-Hoefmeister, *Astron. and Astrophys.* **370**, 488 (2001).
37. J. A. Panei, L. G. Althaus, and O. G. Benvenuto, *Astron. and Astrophys.* **353**, 970 (2000).
38. C. Papadaki, H. M. J. Boffin, V. Stanishev, and et al., *J. Astron. Data* **15** (2009).
39. J. Patterson, J. Kemp, D. A. Harvey, and et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **117**, 1204 (2005).
40. J. Patterson, J. Kemp, D. R. Skillman, and et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 1290 (1998).
41. K. J. Pearson, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **371**, 235 (2006).
42. A. Price, G. Pojmanski, A. Henden, and et al., *IAU Circ.* **8410** (2004).
43. R. C. Reis, P. J. Wheatley, B. T. Gänsicke, and J. P. Osborne, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **430**, 1994 (2013).
44. H. Ritter and U. Kolb, *VizieR Online Data Catalog* **1** (2011).
45. N. N. Samus, E. Broens, A. Diepvens, and et al., *IAU Circ.* **8868** (2007).
46. M. R. Schreiber and B. T. Gänsicke, *Astron. and Astrophys.* **375**, 937 (2001).
47. A. W. Shafter, *Astrophys. J.* **267**, 222 (1983).
48. N. M. Silvestri, P. Szkody, and A. S. Mukadam, *Astron. J.* **144**, article id. 84 (2012).
49. H. C. Spruit, *arXiv e-prints astro/ph:9806141* (1998).
50. P. Szkody, *Astron. J.* **90**, 1837 (1985).
51. P. Szkody and L. Feinswog, *Astrophys. J.* **334**, 422 (1988).
52. P. Szkody and J. A. Mattei, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **96**, 988 (1984).
53. P. Szkody, A. S. Mukadam, B. T. Gänsicke, and et al., *Astrophys. J.* **775**, article id. 66 (2013).
54. M. R. Templeton, R. Leaman, P. Szkody, and et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 236 (2006).
55. J. R. Thorstensen, J. O. Patterson, A. Shambrook, and G. Thomas, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **108**, 73 (1996).
56. G. H. Tovmassian, S. V. Zharikov, and V. V. Neustroev, *ASP Conf. Ser.* **372**, 541 (2007).
57. M. Uemura, A. Arai, T. Krajci, and et al., *Publ. Astron. Soc. Japan* **60**, 227 (2008).
58. J. Urban, K. Lyons, R. Mittal, and et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **112**, 1611 (2000).
59. A. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *arXiv e-prints astro/ph:2208.00211* (2022).
60. W. Voges, B. Aschenbach, T. Boller, and et al., *Astron. and Astrophys.* **349**, 389 (1999).
61. B. Warner, *NATO Advanced Science Institutes (ASI) Series C* **150**, 367 (1985).
62. B. Warner, *Cambridge Astrophysics Series* **28** (1995).
63. D. G. Yakin, V. F. Suleimanov, N. V. Borisov, and et al., *Astronomy Letters* **37**, 845 (2011).
64. F.-J. Zickgraf, D. Engels, and H.-J. Hagen, *Astron. and Astrophys.* **406**, 535 (2003).

Parameters of SU UMa and WZ Sge-Type Dwarf Novae in Quiescent State. I. FL Psc, TY Psc and V455 And

A. A. Dudnik¹, V. V. Shimansky², N. V. Borisov², A. A. Mitrofanova², and M. M. Gabdeev²

¹Kazan National Research Technical University, Kazan, 420111 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

We present the results of model analysis of the optical spectra of SU UMa and WZ Sge-type dwarf novae TY Psc, FL Psc, and V455 And. Spectroscopic observations were carried out at the SAO RAS 6-m BTA telescope in 2013. The selection criterion for the systems under study is their existence in a quiescent state with an optically thin accretion disk and dominance of white dwarf radiation. The fulfillment of the criterion was verified by observing the H I Balmer series broad absorption lines simultaneously with two-peak H I, He I, and Fe II emissions. A technique for automated fitting of model spectra of white dwarfs and observed spectra of dwarf novae based on quantitative criteria for their matching is proposed and implemented. The atmospheric parameters (effective temperature T_{eff} and surface gravity $\log g$) of accretors in TY Psc, FL Psc, and V455 And were determined applying it and used further to obtain their masses and radii. Due to the technique proposed here we obtained the estimates of the fundamental parameters of the secondaries using the theoretical “mass–radius” relationships for brown and red main-sequence dwarfs. As a result, we demonstrate the possibility in principle of determining all the main parameters of the SU UMa and WZ Sge dwarf novae based on modeling and the analysis of a small number of their spectra in the quiescent state.

Keywords: *methods: numerical—methods: observational—stars: cataclysmic variables—stars: dwarf novae—white dwarfs—stars: individual: FL Psc, TY Psc, V455 And*