

УДК 524.337.7-17:520.84-14

# ПАРАМЕТРЫ КАРЛИКОВЫХ НОВЫХ ТИПА SU UMa И WZ SGE В СПОКОЙНОМ СОСТОЯНИИ.

## II. V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And

© 2024 В. В. Шиманский<sup>1\*</sup>, А. А. Дудник<sup>2,1</sup>, Н. В. Борисов<sup>1</sup>, С. С. Котов<sup>1</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия<sup>2</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008 Россия

Поступила в редакцию 25 апреля 2024; после доработки 8 мая 2024; принята к публикации 16 мая 2024

С применением ранее разработанной методики проведено исследование оптических спектров умеренного разрешения и получены наборы параметров карликовых новых звезд V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr и PQ And. Наблюдения систем в фазах поздней релаксации после вспышки или в спокойном состоянии выполнены в 2020 и 2021 гг. на 6-м телескопе (БТА) САО РАН. При их анализе учитывалось требование оптимального описания наблюдаемых абсорбционных профилей линий бальмеровской серии модельными спектрами белых карликов с лучистым и конвективным переносом. В результате для всех систем определены параметры атмосфер главных компонентов, а при их последующем сравнении с моделями внутреннего строения белых карликов и звезд главной последовательности — наборы фундаментальных параметров объектов. Установлено, что анализ спектров карликовых новых, содержащих умеренно холодные белые карлики с  $T_{\text{эф}} = 12\,000\text{--}15\,000\text{ К}$ , обеспечивает лучшую точность их параметров, чем у систем с более горячими главными компонентами. Одновременным условием повышения точности является проведение наблюдений после релаксации объектов к спокойному состоянию, так как эмиссионные линии аккреционного диска существенно сужают область анализируемого спектра. Найдено, что главные компоненты V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr и PQ And имеют массы в пределах  $M_1 = 0.59\text{--}0.87 M_{\odot}$ , а их холодными спутниками являются красные карлики с  $M_2 = 0.11\text{--}0.13 M_{\odot}$ .

Ключевые слова: *методы: численные — методы: спектроскопия — звезды: белые карлики, карликовые новые — отдельные: V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And*

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Карликовые новые (КН) типа WZ Sge и SU UMa относятся к классу катаклизмических переменных (КП) звезд с дисковой формой аккреции. В этих системах низкие темпы переноса вещества, не более  $10^{-10} M_{\odot}$  в год (Chen et al., 2019), обуславливают их вспышечную активность, связанную с переходом аккреционного диска (АД) в высокотемпературное состояние (Osaki, 1989). Во время вспышек продолжительностью от нескольких дней до нескольких недель диск почти полностью аккрецирует свое вещество на поверхность белого карлика (БК), считающегося главным компонентом. Намного большие интервалы времени (от недели для систем типа SU UMa до десятков лет для карликовых новых типа WZ Sge) они находятся в спокойном состоянии с холодным и оптически тонким АД. Диск накапливает вещество, перетекающее через точку  $L_1$  с поверхности

вторичного компонента, который является мало-массивной звездой главной последовательности (Kato, 2015). Низкая светимость диска в этой стадии приводит к доминированию в ультрафиолетовом и оптическом континууме излучения БК. В итоге появляется редкая для класса КП возможность наблюдений спектра главного компонента с масштабом его искажений, не препятствующим модельному анализу и определению параметров атмосферы звезды.

Модельные исследования спектров WZ Sge впервые выполнены с применением наблюдений на телескопе HST в далеком ультрафиолетовом диапазоне после вспышки в 2001 году (Godon et al., 2006b; Long et al., 2004). С учетом предположения о постоянстве силы тяжести  $\lg g$  на поверхности БК авторам удалось восстановить процесс его охлаждения в течение 32 месяцев с  $T_{\text{эф}} = 32\,400\text{ К}$  до  $T_{\text{эф}} = 19\,900\text{ К}$  при  $\lg g \approx 8.49$ . На основе полученных параметров атмосферы БК было вычислено значение его массы  $M_1 \approx 0.9 M_{\odot}$ , корректно со-

\*E-mail: otstoyiyandex.ru

гласующееся с астрометрическими данными. Успех изучения WZ Sge стимулировал проведение аналогичных ультрафиолетовых исследований других систем типа WZ Sge и SU UMa (Godon et al., 2006a; 2008; Szkody et al., 2013a; b), у которых были найдены значения эффективной температуры главных компонентов на одну или несколько эпох. Однако в оценках их  $\lg g$  имелись большие ошибки вследствие недостатка анализируемых наблюдательных индикаторов. Исследуемые спектры КН обычно содержали лишь линию поглощения  $L\alpha$ , искаженную эмиссией от аккреционного диска при высоком уровне шума. Поэтому для уточнения значения  $T_{\text{eff}}$  дополнительно учитывалось распределение энергии в ультрафиолетовом континууме, пригодное только для нахождения эффективной температуры. Urban and Sion (2006) таким методом проанализировали ультрафиолетовые спектры около 50 КН в спокойном состоянии и получили температуры БК с точностью  $\Delta T_{\text{eff}} = \pm 2000$  К при ошибках в оценке силы тяжести до  $\Delta \lg g = 0.4$ . Нерешаемость проблемы корректного определения  $\lg g$  заставила Pala et al. (2017) при изучении большой группы двойных систем зафиксировать поверхностную силу тяжести БК на уровне  $\lg g = 8.35$ , соответствующем массе  $M_1 = 0.8 M_{\odot}$ . Очевидно, что описанный подход не позволяет найти фундаментальные параметры компонентов КН типа WZ Sge и SU UMa из анализа их ультрафиолетовых наблюдений.

Исследования оптических спектров ряда КН в спокойном состоянии (V355 UMa — Gänsicke et al. (2006), PQ And — Schwarz et al. (2004), V627 Peg — Mitrofanova et al. (2014)) показали доминирование в них континуума БК при умеренных искажениях, вносимых излучением АД в эмиссионных линиях H I и He I. Теоретическое описание этих спектров позволило авторам определить эффективную температуру главного компонента V355 UMa и оба параметра атмосферы БК в PQ And и V627 Peg. Анализ формирования модельных спектров БК с вариацией  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  (Dudnik et al., 2021) показал, что они имеют разное влияние на профили бальмеровских линий: изменения температуры в основном отражаются в ядрах, а изменение поверхностной силы тяжести — в крыльях. В результате имеется возможность одновременного определения обоих параметров из модельного анализа оптических спектров, содержащих не менее трех линий бальмеровской серии. Данная методика была разработана и применена при изучении наблюдений КН FL Psc, TY Psc и V455 And в спокойном состоянии (Dudnik et al., 2023). Она позволила получить оценки параметров атмосфер БК, а также фундаментальных параметров главного и вторичного компонентов систем путем привлечения моделей строения белых карликов

и маломассивных звезд главной последовательности с разным химическим составом. Найденные Dudnik et al. (2023) значения масс и радиусов звезд показали хорошее согласие с опубликованными результатами независимых исследований, а также с усредненными данными для широкой группы КН типа WZ Sge и SU UMa.

В рамках новой работы мы представляем итоги анализа спектров четырех аналогичных систем: V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr и PQ And.

VY Aqr относится к редко вспыхивающим карликовым новым типа SU UMa и имеет орбитальный период  $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}06309$  (Thorstensen and Taylor, 1997). В оптических спектрах системы в спокойном состоянии доминирует излучение БК с широкими абсорбционными крыльями линий H I и накладывающимися на них двухпиковыми эмиссиями H I и He I от излучения АД. Полуамплитуда их лучевой скорости  $K_1 = 49 \pm 4$  км с<sup>-1</sup>, очевидно, связана с орбитальным движением главного компонента. Littlefair et al. (2000) на основе фотометрии VY Aqr в полосе *J* обнаружили излучение вторичного компонента с полуамплитудой лучевой скорости  $K_2 = 320 \pm 70$  км с<sup>-1</sup>, определяющей отношение масс звезд

$$q = \frac{M_2}{M_1} = 0.15 \pm 0.04.$$

Выполненная Littlefair et al. (2000) доплеровская томография системы показала наличие клочковатого АД с полем скоростей, соответствующим полученным динамическим характеристикам обоих компонентов. Позднее Mennickent and Diaz (2002) при изучении инфракрасных спектров определили спектральный класс холодного компонента как M9.5. Модельный анализ ультрафиолетовых спектров VY Aqr в спокойном состоянии (Sion et al., 2003) выявил наличие БК с температурой  $T_{\text{eff}} = 13\,500 \pm 500$  К, скоростью вращения  $v_{\text{rot}} \approx 400$  км с<sup>-1</sup> и пониженной металличностью. Однако узкий спектральный диапазон и низкое значение  $S/N$  не позволили авторам сделать оценку поверхностной силы тяжести. Hamilton and Sion (2004) с применением значения параллакса  $\pi = 0''.011 \pm 0''.001$  провели ревизию наблюдений системы в оптическом диапазоне с определением массы  $M_1 = 0.55 M_{\odot}$  и угла наклона орбиты  $i = 41^\circ$ . Соответствующая масса холодного спутника получена равной  $M_2 = 0.085 \pm 0.020 M_{\odot}$ . Однако Urban and Sion (2006) на основе модельного анализа ультрафиолетовых спектров VY Aqr определили температуру БК  $T_{\text{eff}} = 13\,500$  К и его массу  $M_1 = 0.80 M_{\odot}$ , что противоречит полученным ранее результатам.

V355 UMa предварительно классифицирована Gänsicke et al. (2006) как карликовая новая типа

ZZ Cet с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}05730$ . В данных, полученных в рамках обзора неба SDSS, наблюдались непрерывный спектр и широкие бальмеровские линии, формирующиеся в атмосфере БК с температурой  $T_{\text{eff}} = 12500$  К, а также узкие эмиссии H I и He I от излучения АД с  $T_{\text{eff}} \approx 6000$  К. Наблюдаемые кривые блеска показывали переменность как на шкале орбитального периода, так и более короткого  $P_{\text{puls}} = 10.7$  минут, связанного авторами с пульсациями БК. Однако Szkody et al. (2010) в анализе ультрафиолетовых спектров и кривых блеска отвергли короткопериодическую переменность, подтвердив значение температуры БК, определенное из оптических наблюдений. Позднее Kato and Osaki (2013) на основе сравнения периода сверхгорбов  $P_{\text{sh}} = 0^{\text{d}}05874$  и орбитального периода V355 UMa эмпирически оценили возможное отношение масс компонентов  $q = 0.066 \pm 0.001$ . Расстояние до системы составляет  $r = 151 \pm 2$  пк (Vallenari et al., 2023). С 2018 года, по данным обзора Zwicky Transient Facility (ZTF) (Masci et al., 2019), у нее не зарегистрировано сверхвспышек и обычных вспышек, что подтверждает ее принадлежность к типу WZ Sge.

PQ And, первоначально открытая как классическая новая (Wade and Hamilton, 1988), позднее была отнесена к карликовым новым типа WZ Sge (Kato et al., 2001) с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}05597$  (Patterson et al., 2005). За все время наблюдений было зарегистрировано три сверхвспышки системы (Patterson et al., 2005), а по данным ZTF (Masci et al., 2019) она не показывала вспышечной активности с 2018 года. В ее оптических спектрах наблюдаются широкие линии поглощения бальмеровской серии с интенсивными двухпиковыми эмиссиями H I и слабыми эмиссиями He I, указывающими на низкую температуру и оптическую толщину АД. Модельное исследование спектров (Schwarz et al., 2004) позволило найти значения параметров атмосферы:  $T_{\text{eff}} = 12000 \pm 1100$  К,  $\lg g = 7.7 \pm 0.3$ ,  $[M/H] = -2$ , массу  $M_1 = 0.47 \pm 0.13 M_{\odot}$  и радиус  $R_1 = 0.0165 R_{\odot}$  главного компонента, а также расстояние до объекта  $r = 350 \pm 50$  пк. Данная оценка расходится с расстоянием  $r = 267 \pm 15$  пк, измеренным Vallenari et al. (2023). По фотометрическим наблюдениям кроме ожидаемых вариаций блеска в шкале орбитального периода Patterson et al. (2005) обнаружили осцилляции с амплитудой  $\Delta m_V = 0^{\text{m}}05$  и периодом  $P_{\text{puls}} = 10.6$  минут, возможно связанные с пульсациями БК.

V521 Peg впервые исследована Rodríguez-Gil et al. (2005) с ее включением в группу незатменных КН типа SU UMa с орбитальным периодом  $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}05990$  и вспышками с ампли-

тудой до  $\Delta m_V = 6^{\text{m}}$ . В спокойном состоянии в кривых блеска наблюдались сверхгорбы с периодом  $P_{\text{sh}} = 0^{\text{d}}06190$  и амплитудой  $\Delta m_V \approx 0^{\text{m}}10$ , а оптические спектры содержали широкие линии поглощения бальмеровской серии, формирующиеся в излучении БК. Излучение АД представлено узкими, но двухпиковыми эмиссиями H I и намного более слабыми линиями He I, обнаруженными только в красном диапазоне. При модельном описании спектров определена температура БК  $T_{\text{eff}} = 17000 \pm 2000$  К, а анализ профилей эмиссионных линий позволил выявить в них два компонента с полуамплитудами лучевой скорости:  $K_1 = 50 \pm 2$  км с<sup>-1</sup> и  $K_2 = 220 \pm 15$  км с<sup>-1</sup>. Отождествляя первую амплитуду с орбитальным движением главного компонента, Rodríguez-Gil et al. (2005) связывают вторую с потоками газа внутри системы, а не с движением холодной звезды. Спектральный класс последней оценен ими более поздним, чем M5. Vogt et al. (2021) при изучении разнородных фотометрических наблюдений V521 Peg в течение 28 лет обнаружили у нее девять вспышек с амплитудой  $\Delta m_V > 4^{\text{m}}$  при отсутствии более слабых вспышек, что может указывать на принадлежность системы к типу WZ Sge. Расстояние до нее, согласно данным Vallenari et al. (2023), составляет  $r = 190 \pm 3$  пк.

Таким образом, для всех рассматриваемых нами систем выполнялся модельный анализ ультрафиолетовых или оптических спектров, но полные наборы фундаментальных параметров не представлены ни для одной из них. Найденные при изучении оптических и инфракрасных наблюдений параметры VY Aqr противоречат результатам ультрафиолетовой спектроскопии. При моделировании оптических спектров PQ And получены очень низкие значения  $\lg g$  и массы БК, которые плохо согласуются с ее принадлежностью к молодому галактическому населению с относительно малым временем эволюции. Наконец, для V521 Peg и V355 UMa представлены оценки лишь единичных параметров, что делает их исследование наиболее перспективным. Поэтому мы переопределили наборы параметров этих систем с применением разработанного нами метода анализа их оптических спектров.

В разделе 3 описан процесс спектральных наблюдений и их предварительной обработки. Раздел 4 содержит модельное исследование оптических спектров с определением параметров атмосфер БК, а раздел 5 — последующее нахождение фундаментальных параметров систем и их краткое обсуждение.

## 2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектроскопические наблюдения проводились на редуторе светосилы первичного фокуса

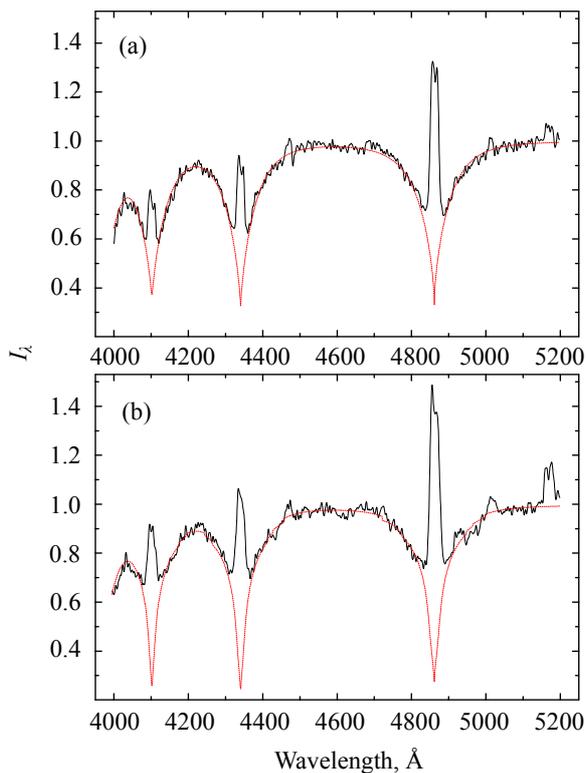


Рис. 1. Наблюдаемые (сплошные линии) и модельные (штриховые линии) спектры V355 UMa (a) и PQ And (b) для минимумов их среднеквадратичных уклонений  $\sigma_{\text{сп}}$ .

SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005) 6-м телескопа БТА САО с применением гризмы VPHG1200g (1200 штрихов  $\text{mm}^{-1}$ ) и ПЗС-приемника EEV 42-40 CCD (2048 × 2048 пиксела размером 13.5 × 13.5 мкм), обеспечивающих спектральное разрешение  $\Delta\lambda = 5.0 \text{ \AA}$  в диапазоне длин волн 4000–5700  $\text{\AA}$ . Для V355 UMa в ночь с 29 на 30 апреля 2020 г. при удовлетворительных астроклиматических условиях с размером изображений звезд  $d = 2''.2$  выполнены три экспозиции продолжительностью по 300 с; для VY Aqr, PQ And, V521 Peg в ночь с 16 на 17 августа 2021 г. при хороших условиях с  $d = 1''.9$  проведено по пять экспозиций такой же продолжительности. В итоге  $S/N$  в усредненных по всем экспозициям спектрах V521 Peg и VY Aqr превышает  $S/N \geq 100$ , а для более слабых V355 UMa и PQ And оно составляет  $S/N \approx 55$ . Нахождение систем в спокойном состоянии определялось при анализе серий из 3–4 прямых изображений в фильтре V, получаемых на SCORPIO (Afanasiev and Moiseev, 2005) до и после наблюдений спектров. Позднее это состояние проверялось по данным наблюдений ZTF (Masci et al., 2019). Для калибровки длин волн и потоков излучения одновременно с исследуемыми объектами накоплены спектры лампы

Таблица 1. Журнал спектроскопических наблюдений

Объект	JD + 2450000	$m_V$ , mag	$N$	$S/N$
V355 UMa	8969.2453	17.52	3	58
VY Aqr	9443.4185	17.08	5	102
V521 Peg	9443.4448	17.21	5	105
PQ And	9443.5144	18.78	5	53

Ar-Ne-He и спектрофотометрических стандартов BD +33° 2642 и G 191B2B из каталогов Bohlin (1995; 1996). Журнал спектроскопических наблюдений, включающий юлианские даты середины объединенных экспозиций JD, их количество  $N$ , блеск объектов в полосе V и суммарное отношение  $S/N$ , содержится в таблице 1.

Первичная редукция наблюдений выполнена с применением стандартных процедур, реализованных на языке программирования IDL<sup>1</sup> (изложена Dudnik et al. (2023) и здесь ее описание не приводится). Для модельного анализа полученные спектрограммы каждого объекта усреднялись и сглаживались по пяти точкам методом бегущего среднего без потери начального разрешения. Нормировка усредненных спектров проводилась путем их сравнения с модельными спектрами БК для ряда наборов параметров атмосфер. В каждом случае выбирались диапазоны длин волн шириной  $\Delta\lambda = 100 \text{ \AA}$ , максимально удаленные от центров соседних бальмеровских линий и свободные от эмиссионных линий других элементов. Внутри этих диапазонов рассчитывались отношения модельных и наблюдаемых потоков, аппроксимированные полиномами 3–5 порядков в пределах суммарного диапазона 4000–5200  $\text{\AA}$ . В заключении выполнялось деление наблюдаемых спектров на построенные таким способом нормировочные полиномы.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СПЕКТРОВ

Итоговые нормированные спектры КН представлены на рис. 1 и 2. В их континууме доминирует излучение БК с широкими абсорбционными крыльями линий бальмеровской серии. Эмиссионный спектр представлен двухпиковыми линиями H I, He I и Fe II с полуширинами, соответствующими дисперсии скоростей в АД от  $\Delta v_{\text{rot}} = 760 \text{ km s}^{-1}$  у V355 UMa до  $\Delta v_{\text{rot}} = 1120 \text{ km s}^{-1}$  у V521 Peg. По данным Masci et al. (2019), сверхвспышка VY Aqr произошла 13 ноября 2020 г., а вспышка V521 Peg — 14 июня 2021 г., то есть за 276 дней и

<sup>1</sup><http://www.itervis.com/idl>

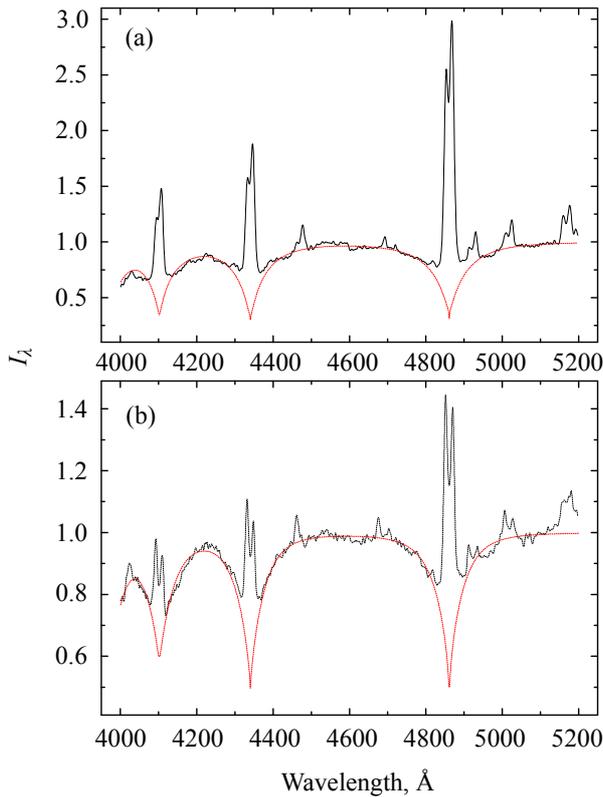


Рис. 2. Наблюдаемые (сплошные линии) и модельные (штриховые линии) спектры V521 Peg (a) и VY Aqr (b) для минимумов их среднеквадратичных уклонений  $\sigma_{sp}$ .

63 дня до наших наблюдений соответственно. К моменту наблюдений яркость VY Aqr полностью вернулась к довысшечному уровню, а блеск V521 Peg превышал его величину в спокойном состоянии на  $\Delta m_V \approx 0^m 15$ . У V355 UMa, PQ And в течение как минимум трех предшествующих лет не регистрировалась заметная вспышечная активность. Полученный нами спектр VY Aqr содержит наиболее интенсивные эмиссионные линии и соответствует нахождению КН в фазе поздней релаксации к спокойному состоянию. Эмиссии линий H I в спектре V521 Peg существенно слабее, но обе системы демонстрируют высокую интенсивность линий He I, указывающих на наличие у них оптически тонких, но теплых АД с  $T_e > 8000$  К. Эмиссии H I и особенно He I в спектрах V355 UMa и PQ And выражены гораздо слабее и имеют меньшие доплеровские полуширины, что характерно для холодных АД с заметным излучением в периферийных областях. В итоге мы пришли к выводу, что наблюдаемые спектры всех КН пригодны для модельного анализа с определением параметров.

Применяемая в данной работе методика моделирования оптических спектров аналогична разработанной и представленной Dudnik et al. (2023). Сетки плоскопараллельных моделей атмосфер БК

с конвективным и лучистым переносом рассчитаны Mitrofanova et al. (2014) с применением программного комплекса ATLAS12 (Kurucz, 2005) для значений температуры  $T_{eff} = 10\,000\text{--}90\,000$  К, силы тяжести  $\lg g = 6.75\text{--}9.25$ , индекса металличности  $[M/H] = -5.0$  при нулевом содержании гелия. Для всех моделей вычислены синтетические спектры в диапазоне длин волн  $3900\text{--}5250$  Å с шагом  $\Delta\lambda = 0.05$  Å (Dudnik et al., 2023). Сформированная сетка оптических спектров БК позволяет корректно интерполировать их по  $T_{eff}$  и  $\lg g$  на произвольные значения параметров, согласно методике Dudnik et al. (2021).

Анализ наблюдаемых спектров выполнялся путем формирования локальной сетки параметров  $T_{eff}$  и  $\lg g$ , задаваемых с мелким шагом. Для каждой пары значений вычислялся модельный спектр, который сравнивался с наблюдаемым в границах маски, определяемой индивидуально для каждой системы. В маску включались диапазоны длин волн, свободные от эмиссий в линиях H I, He I, Fe II и возможных искажений космическими частицами. Численным критерием согласия наблюдаемого и модельного спектров приняты величины их среднеквадратичных уклонений  $\sigma_{sp}$  в пределах заданных диапазонов:

$$\sigma_{sp} = \sqrt{\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (F_{\lambda}^{obs} - F_{\lambda}^{mod})^2 d\lambda}. \quad (1)$$

В данной работе значения  $\sigma_{sp}$  рассчитывались для локальной сетки параметров БК с  $\Delta T_{eff} = 500$  К и  $\Delta \lg g = 0.1$ . В результате для каждой системы строилось двухмерное распределение  $\sigma_{sp}$  по  $T_{eff}$  и  $\lg g$ , в котором искалось положение точки глобального минимума. Полученные двухмерные распределения  $\sigma_{sp}$  для всех объектов представлены на рис. 3, значения  $T_{eff}$  и  $\lg g$  в точках минимумов — в таблице 2, а оптимальное согласование модельных и наблюдаемых спектров — на рис. 1 и 2.

Оценки ошибок  $T_{eff}$  и  $\lg g$  определялись разностью между величиной  $\sigma_{sp}$  и ошибками наблюдений, вычисляемыми на основе среднего отношения  $S/N$  в используемом спектральном диапазоне. Пределы возможных изменений  $T_{eff}$  и  $\lg g$  задавались условием возрастания указанной разницы в два раза по сравнению с ее значением в точке минимума распределения  $\sigma_{sp}$ .

Как видно из таблицы 2, V355 UMa, PQ And и VY Aqr на эпоху спектроскопических наблюдений содержали холодные БК с температурами  $T_{eff} = 12\,500\text{--}15\,000$  К, соответствующими их оценкам в предшествующих исследованиях систем в спокойном состоянии:  $T_{eff} = 13\,500$  К для VY Aqr

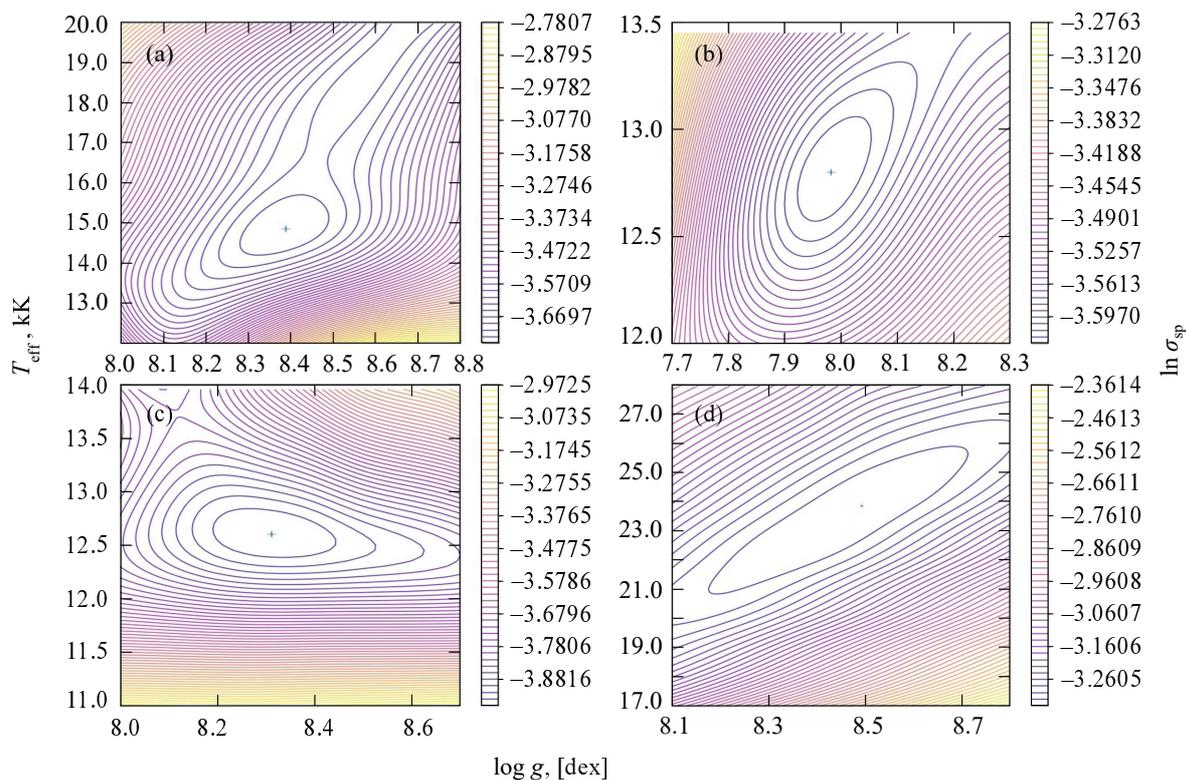


Рис. 3. Двухмерные распределения  $\ln(\sigma_{sp})$  от  $T_{eff}$  и  $\lg g$  для V355 UMa (a), PQ And (b), VY Aqr (c) и V521 Peg (d).

(Urban and Sion, 2006),  $T_{eff} = 12\,500$  К для V355 UMa (Gänsicke et al., 2006) и  $T_{eff} = 12\,000 \pm 1\,100$  К для PQ And (Schwarz et al., 2004). Полученное нами значение  $T_{eff} = 22\,800 \pm 2\,300$  К для БК в V521 Peg качественно превышает  $T_{eff} = 17\,000 \pm 2\,000$  К из Rodríguez-Gil et al. (2005), что, очевидно, обусловлено его нагревом во время вспышки 14 июня 2021 г. Согласно исследованиям эволюции ультрафиолетовых спектров WZ Sge (Long et al., 2004; Godon et al., 2006b), температура БК спустя 60–80 дней после вспышки 2001 года составляла  $T_{eff} = 24\,000\text{--}28\,000$  К, что согласуется с обнаруженным нами избытком температуры БК в V521 Peg. Поверхностная сила тяжести  $\lg g = 7.7 \pm 0.3$  ранее найдена лишь у БК в PQ And (Schwarz et al., 2004) и в пределах ошибок совпадает с нашим измерением  $\lg g = 7.99 \pm 0.13$ .

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ

Значения параметров атмосфер БК позволяют определить их массу  $M_1$  и радиус  $R_1$ , применяя зависимости «температура–масса–радиус», рассчитанные на основе моделирования внутренней структуры звезд. В наших работах мы выбрали

зависимости Panei et al. (2000), которые дополнительно учитывают химический состав ядра и границы вырождения внутренних слоев. По заданному в работах Dudnik et al. (2021; 2023) условию для БК с массами  $M_1 < 0.70 M_\odot$  использовались результаты расчетов с углеродным ядром, а при больших массах — с кислородным. Отметим, что вариации искомой массы БК в зависимости от выбора химического состава его ядра не превосходят  $\Delta M = 0.015 M_\odot$ . Возможные ошибки  $M_1$  и  $R_1$  вычислялись на основе погрешностей параметров атмосфер звезд, найденных из анализа спектров (см. выше). Итоговые величины радиусов и масс главных компонентов изучаемых КН представлены в таблице 2.

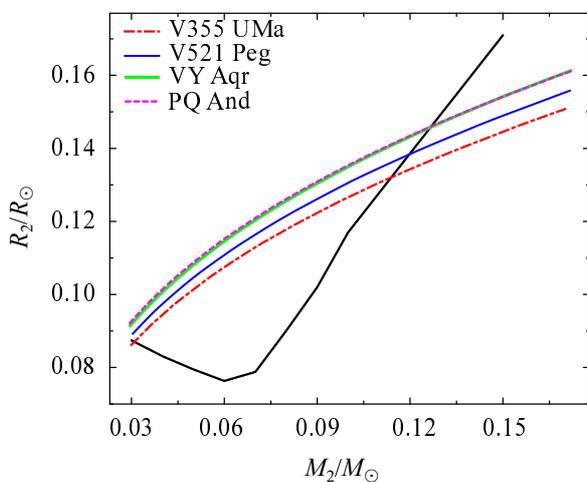
Последующее нахождение параметров вторичных компонентов выполнено в полном соответствии с методикой, предложенной и реализованной Dudnik et al. (2023). В ее рамках для сетки отношений масс компонентов  $q = \frac{M_2}{M_1}$  при известных для каждой системы  $M_1$  и  $P_{orb}$  вычисляются размеры большой полуоси орбиты  $A$  и полости Роша вторичного компонента  $R_L$  согласно полуэмпирической формуле (Eggleton, 1983):

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

**Таблица 2.** Параметры карликовых новых V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And

Параметр	V355 UMa	V521 Peg	VY Aqr	PQ And
$P_{\text{orb}}$ , минут	82.51 <sup>a</sup>	86.26 <sup>b</sup>	90.85 <sup>c</sup>	80.60 <sup>d</sup>
$T_{\text{eff}}$ , К	14 800 ± 1400	22 800 ± 2300	12 600 ± 700	12 700 ± 500
$\lg g$	8.38 ± 0.14	8.47 ± 0.23	8.35 ± 0.21	7.99 ± 0.13
$M_1/M_{\odot}$	0.80 ± 0.06	0.87 ± 0.12	0.79 ± 0.10	0.59 ± 0.05
$R_1/R_{\odot}$	0.0098 ± 0.0008	0.0092 ± 0.0014	0.0100 ± 0.0013	0.0125 ± 0.0012
$M_2/M_{\odot}$	0.113 ± 0.004	0.120 ± 0.006	0.126 ± 0.006	0.127 ± 0.004
$R_2/R_{\odot}$	0.132 ± 0.005	0.138 ± 0.006	0.146 ± 0.006	0.146 ± 0.005
$q$	0.141 ± 0.005	0.137 ± 0.009	0.159 ± 0.010	0.215 ± 0.011
$A/R_{\odot}$	0.606 ± 0.010	0.641 ± 0.027	0.651 ± 0.025	0.550 ± 0.014

<sup>a</sup>Gänsicke et al. (2006), <sup>b</sup>Rodríguez-Gil et al. (2005), <sup>c</sup>Thorstensen and Taylor (1997),

<sup>d</sup>Patterson et al. (2005)

**Рис. 4.** Модельные зависимости « $M_2-R_2$ » для вторичных компонентов V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And (штриховые линии) и эволюционная зависимость «масса–радиус» для коричневых и красных карликов нулевого возраста (сплошная черная линия).

а также — оценки среднего радиуса  $R_2$  и массы  $M_2$  холодной звезды. Построенная таким способом зависимость  $R_2$  от  $M_2$  сравнивается с эволюционной зависимостью «масса–радиус» для коричневых (Baraffe et al., 2003) и красных (Girardi et al., 2000) карликов нулевого возраста солнечной металличности. Точки их пересечения определяют искомые характеристики вторичных компонентов, а их ошибки зависят от погрешностей  $M_1$ ,  $P_{\text{orb}}$  и возможных аномалий химического состава атмосфер холодных карликов в пределах  $\Delta[X/H] \approx 0.5$ . Для большинства исследуемых систем имеются две точки пересечения зависимостей  $R_2$  от  $M_2$ , вторая из которых соответствует неоправданно малым значениям массы коричневого карлика  $M_2 < 0.035 M_{\odot}$  и исключена из рас-

смотрения. Важным преимуществом применяемой методики является слабое влияние массы  $M_1$  и доминирующее влияние  $P_{\text{orb}}$  на вычисляемые величины  $M_2$  и  $R_2$ . Поскольку длительность орбитальных периодов известна с высокой точностью, то этот фактор обеспечивал минимальность ошибок определения масс и радиусов вторичных компонентов. Данные о них совместно с оценками возможных ошибок обобщены в таблице 2, а процесс их получения проиллюстрирован на рис. 4.

Скудность представленных в литературе данных о фундаментальных параметрах V355 UMa, PQ And, VY Aqr и V521 Peg не позволяют провести их корректное сравнение с результатами нашей работы. Для БК в VY Aqr получены оценки массы  $M_1 = 0.55 M_{\odot}$  (Hamilton and Sion, 2004) и  $M_1 = 0.80 M_{\odot}$  (Urban and Sion, 2006), вторая из которых полностью соответствует определенному нами значению  $M_1 = 0.79 \pm 0.10 M_{\odot}$ . Kato and Osaki (2013) на основе эмпирической зависимости орбитального периода и периода сверхгорбов для V355 UMa получили отношение масс компонентов  $q = 0.066 \pm 0.001$ , задающее массу холодной звезды  $M_2 \approx 0.055 M_{\odot}$ . Однако столь малое значение массы не соответствует орбитальному периоду системы, так как ее вторичный компонент оказывается глубоко внутри своей полости Роша (см. рис. 4). Исправленная нами оценка массы  $M_1 = 0.59 \pm 0.05 M_{\odot}$  БК в PQ And несомненно является позитивным результатом, поскольку ранее найденная ее величина  $M_1 = 0.47 \pm 0.13 M_{\odot}$  (Schwarz et al., 2004) совсем не характерна для главных компонентов КН типа WZ Sge и SU UMa (Ritter and Kolb, 2015). В заключении отметим, что у рассмотренных нами систем массы холодных звезд заключены в узких границах  $M_2 = 0.11-0.13 M_{\odot}$ , то есть они относятся к красным карликам спектральных классов M8–M9.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При изучении КН FL Psc, TY Psc и V455 And (Dudnik et al., 2023) с умеренно теплыми аккректорами с  $T_{\text{eff}} = 22\,000\text{--}25\,000$  К основной трудностью для определения характеристик звезд выступало сходное влияние параметров атмосфер БК на профили бальмеровских линий в их спектрах. В результате двумерные распределения  $\sigma_{\text{sp}}$  от этих параметров содержали области минимальных значений, сильно вытянутые вдоль линейной зависимости « $T_{\text{eff}} - \lg g$ ». Найденные оценки  $T_{\text{eff}}$  и  $\lg g$  имели значительные неопределенности, что сказывалось на точности определения фундаментальных параметров систем. Аналогичный результат был получен при анализе QW Ser (Dudnik et al., 2022), у которой температура аккректора составляет  $T_{\text{eff}} = 23\,500$  К. Одновременное исследование QZ Lib с очень холодным БК ( $T_{\text{eff}} \approx 9500$  К) привело к выводу, что в этом случае спектр, сильно завися от  $T_{\text{eff}}$ , практически не чувствителен к величине  $\lg g$ . В итоге для QZ Lib удалось установить только нижний предел  $\lg g$  и, как следствие, значений масс компонентов.

Результаты представляемой работы показывают, что изучение спектров белых карликов с  $T_{\text{eff}} = 12\,000\text{--}15\,000$  К наиболее перспективно для определения параметров КН. Область минимума  $\sigma_{\text{sp}}$  оказывается компактной и даже при использовании спектров с зашумлением  $S/N \approx 60$  позволяет установить значение поверхностной силы тяжести с ошибками  $\Delta \lg g < 0.15$ , что гарантирует последующее высокоточное определение масс. В этом случае основной сложностью для анализа становится корректный учет и исключение эмиссионных линий АД. Как видно из сравнения рис. 1 и 2, среди рассмотренных нами систем наиболее интенсивные и широкие эмиссии наблюдаются у V521 Peg и VY Aqr, испытавших вспышки незадолго до наших наблюдений. Исключение интервалов длин волн с этими эмиссиями значимо сократило анализируемый спектральный диапазон, ухудшило корректность описания наблюдений и обусловило рост ошибок параметров. Поэтому мы пришли к выводу, что для получения наиболее надежных результатов желательно проведение наблюдений КН в спокойном состоянии, когда искажения излучением АД становятся минимальными.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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 университеты».

## 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). DOI:10.1134/1.1883351
2. I. Baraffe, G. Chabrier, T. S. Barman, et al., *Astron. and Astrophys.* **402**, 701 (2003). DOI:10.1051/0004-6361:20030252
3. R. C. Bohlin, in *Proc. Workshop on Calibrating Hubble Space Telescope. Post Servicing Mission, Baltimore, Maryland, 1995*, Ed. by A. P. Koratkar and C. Leitherer (Space Telescope Science Institute, Baltimore, 1995), p. 49.
4. R. C. Bohlin, *Astron. J.* **111**, 1743 (1996). DOI:10.1086/117914
5. H.-L. Chen, T. E. Woods, L. Yungelson, et al., in *Proc. IAU Symp. No. 343*, Ed. by F. Kerschbaum, M. Groenewegen, and H. Olofsson (Cambridge University Press, 2020) p. 371.
6. A. Dudnik, V. Shimansky, N. Borisov, et al., *Acta Astrophysica Taurica* **3** (1), 12 (2022). DOI:10.31059/aat.vol3.iss1.pp12-16
7. A. A. Dudnik, A. A. Mitrofanova, V. V. Shimansky, et al., *Research in Astronomy and Astrophysics* **21** (7), 158 (2021). DOI:10.1088/1674-4527/21/7/158
8. A. A. Dudnik, V. V. Shimansky, N. V. Borisov, et al., *Astrophysical Bulletin* **78** (1), 25 (2023). DOI:10.1134/S1990341323010054
9. P. P. Eggleton, *Astrophys. J.* **268**, 368 (1983). DOI:10.1086/160960
10. B. T. Gänsicke, P. Rodríguez-Gil, T. R. Marsh, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **365** (3), 969 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2005.09781.x
11. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **141**, 371 (2000). DOI:10.1051/aas:2000126
12. P. Godon, L. Seward, E. M. Sion, and P. Szkody, *Astron. J.* **131** (5), 2634 (2006a). DOI:10.1086/501523
13. P. Godon, E. M. Sion, P. E. Barrett, et al., *Astrophys. J.* **679** (2), 1447 (2008). DOI:10.1086/587504
14. P. Godon, E. M. Sion, F. Cheng, et al., *Astrophys. J.* **642** (2), 1018 (2006b). DOI:10.1086/501039
15. R. T. Hamilton and E. M. Sion, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116** (824), 926 (2004). DOI:10.1086/425082
16. T. Kato, *Publ. Astron. Soc. Japan* **67** (6), id. 108 (2015). DOI:10.1093/pasj/psv077
17. T. Kato and Y. Osaki, *Publ. Astron. Soc. Japan* **65** (6), article id. 115 (2013). DOI:10.1093/pasj/65.6.115

18. T. Kato, Y. Sekine, and R. Hirata, *Publ. Astron. Soc. Japan* **53** (6), 1191 (2001). DOI:10.1093/pasj/53.6.1191
19. R. L. Kurucz, *Memorie della Societa Astronomica Italiana Supplementi* **8**, 14 (2005).
20. S. P. Littlefair, V. S. Dhillon, S. B. Howell, and D. R. Ciardi, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **313** (1), 117 (2000). DOI:10.1046/j.1365-8711.2000.03234.x
21. K. S. Long, E. M. Sion, B. T. Gänsicke, and P. Szkody, *Astrophys. J.* **602** (2), 948 (2004). DOI:10.1086/381121
22. F. J. Masci, R. R. Laher, B. Rusholme, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **131** (995), 018003 (2019). DOI:10.1088/1538-3873/aae8ac
23. R. E. Mennickent and M. P. Diaz, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **336** (3), 767 (2002). DOI:10.1046/j.1365-8711.2002.05789.x
24. A. A. Mitrofanova, N. V. Borisov, and V. V. Shimansky, *Astrophysical Bulletin* **69** (1), 82 (2014). DOI:10.1134/S1990341314010088
25. Y. Osaki, *Publ. Astron. Soc. Japan* **41**, 1005 (1989).
26. A. F. Pala, B. T. Gänsicke, D. Townsley, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **466** (3), 2855 (2017). DOI:10.1093/mnras/stw3293
27. J. A. Panei, L. G. Althaus, and O. G. Benvenuto, *Astron. and Astrophys.* **353**, 970 (2000). DOI:10.48550/arXiv.astro-ph/9909499
28. J. Patterson, J. R. Thorstensen, E. Armstrong, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **117** (835), 922 (2005). DOI:10.1086/432492
29. H. Ritter and U. Kolb, *Acta Polytechnica CTU Proceedings* **2** (1), 21 (2015). DOI:10.14311/APP.2015.02.0021
30. P. Rodríguez-Gil, B. T. Gänsicke, H. J. Hagen, et al., *Astron. and Astrophys.* **431**, 269 (2005). DOI:10.1051/0004-6361:20042026
31. G. J. Schwarz, T. Barman, N. Silvestri, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **116** (826), 1111 (2004). DOI:10.1086/426927
32. E. M. Sion, P. Szkody, F. Cheng, et al., *Astrophys. J.* **583** (2), 907 (2003). DOI:10.1086/345445
33. P. Szkody, A. Mukadam, B. T. Gänsicke, et al., *Astrophys. J.* **710** (1), 64 (2010). DOI:10.1088/0004-637X/710/1/64
34. P. Szkody, A. S. Mukadam, B. T. Gänsicke, et al., *Astrophys. J.* **775** (1), article id. 66 (2013a). DOI:10.1088/0004-637X/775/1/66
35. P. Szkody, A. S. Mukadam, E. M. Sion, et al., *Astron. J.* **145** (5), 121 (2013b). DOI:10.1088/0004-6256/145/5/121
36. J. R. Thorstensen and C. J. Taylor, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **109**, 1359 (1997). DOI:10.1086/134016
37. J. A. Urban and E. M. Sion, *Astrophys. J.* **642** (2), 1029 (2006). DOI: 10.1086/501430
38. Vallenari et al. (Gaia Collab.), *Astron. and Astrophys.* **674**, id. A1 (2023). DOI:10.1051/0004-6361/202243940
39. N. Vogt, E. C. Puebla, and A. Contreras-Quijada, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **502** (4), 5668 (2021). DOI:10.1093/mnras/staa371
40. R. A. Wade and D. Hamilton, *IAU Circulars No. 4629* (1988).

## Parameters of SU UMa and WZ Sge-Type Dwarf Novae in Quiescent State. II. V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And

V. V. Shimansky<sup>1</sup>, A. A. Dudnik<sup>2,1</sup>, N. V. Borisov<sup>1</sup>, and S. S. Kotov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

<sup>2</sup>Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, 420008 Russia

Using a previously developed technique, a study of moderate-resolution optical spectra was carried out, and sets of parameters for the dwarf novae V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, and PQ And were obtained. Observations of the systems in late relaxation phases after a burst or in a quiescent state were carried out in 2020 and 2021 with the 6-m BTA telescope of SAO RAS. Their analysis took into account the requirement for an optimum description of the observed absorption profiles of the Balmer series lines with the model spectra of white dwarfs with radiative and convective transfer. As a result, the atmospheric parameters of the primaries were determined for all the systems, and when they were subsequently compared with models of the internal structure of white-dwarf and main-sequence stars, sets of fundamental parameters of the objects were also determined. It has been established that analysis of the spectra of dwarf novae containing moderately cool white dwarfs with  $T_{\text{eff}} = 12\,000\text{--}15\,000\text{ K}$  provides better accuracy of their parameters than systems with hotter primaries. A simultaneous condition to be fulfilled for increasing accuracy is to carry out observations after the objects relax to a quiescent state, since the emission lines of the accretion disk significantly narrow the region of the analyzed spectrum. It has been found that the primary components of V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, and PQ And have masses within the range of  $M_1 = 0.59\text{--}0.87 M_{\odot}$ , and their cool companions are red dwarfs with  $M_2 = 0.11\text{--}0.13 M_{\odot}$ .

Keywords: *methods: numerical—methods: observational—techniques: spectroscopic—stars: white dwarfs, dwarf novae—stars: individual: V355 UMa, V521 Peg, VY Aqr, PQ And*