АСТРОФИЗИЧЕСКИЙ БЮЛЛЕТЕНЬ, 2025, том 80, № 1, с. 60–71

УДК 524.338.3-128

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕВЯТИ КАНДИДАТОВ В СИМБИОТИЧЕСКИЕ ЗВЕЗДЫ. ОТКРЫТИЕ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ V520 AND

© 2025 Н. А. Масленникова[1,2], А. М. Татарников[1,2*], А. А. Татарникова[1], А. В. Додин[1], Н. И. Шатский[1]

[1] Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова, Москва, 119234 Россия

[2] Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия

Поступила в редакцию 21 июня 2024 года; после доработки 4 сентября 2024 года; принята к публикации 14 сентября 2024 года

Представлены результаты спектральных наблюдений девяти кандидатов в симбиотические звезды в диапазоне длин волн 360–735 нм, выполненные со спектрографом TDS на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ. Восемь звезд выборки классифицированы как красные гиганты спектральных классов M3–M6. Анализ фотометрических кривых блеска показал, что все девять звезд могут быть отнесены к SRA- и SRB-переменным (по классификации Общего каталога переменных звезд — ОКПЗ). Показано, что одна из звезд, V520 And, может быть классифицирована как симбиотическая. В ее спектре найдены эмиссионные линии H I, He I, Fe II, слабые линии [O III] λ 5007, [Ne III] λ 3869 и He II λ 4686 и бальмеровский скачок в эмиссии. Обнаружена переменность эмиссионного спектра как на больших, так и на очень коротких временных интервалах. Спектр высокого разрешения ($R = 25\,000$), полученный с новым спектрографом КГО, показал двугорбую форму линии Hα и наличие абсорбционного компонента у нее. В ходе фотометрического мониторинга 14 октября 2023 г. обнаружен эффект быстрой переменности в полосе B с амплитудой $0\overset{\mathrm{m}}{.}08$ и характерным временем 10–15 минут. Определены светимость, эффективная температура и радиус холодного компонента V520 And: $L = 1400-2200\,L_\odot$, $T_{\rm eff} = 3200$ K и $R = 120-155\,R_\odot$ соответственно. Найдены свидетельства наличия в системе аккреционного диска со светимостью $L < 10\,L_\odot$.

Ключевые слова: *звезды: двойные: симбиотические — звезды: отдельные: V520 And, KO Her, OQ Her, V455 Her, IRAS 23161+1809, IRAS 08484–1234, IRAS 08274+4132, IRAS 08034–0641, ASAS J204428+1914.7*

1. ВВЕДЕНИЕ

Симбиотические звезды (СЗ) — это объекты, спектры которых представляют собой комбинацию (симбиоз) спектров холодных звезд и эмиссионных туманностей. Как было показано в работе Boyarchuk (1967), такой спектр хорошо описывается моделью двойной звезды, состоящей из холодного компонента (обычно это красный гигант) и горячего компонента (обычно белый карлик или горячий субкарлик). Модель получила подтверждение по результатам наблюдений ряда СЗ в УФ-диапазоне спутником IUE.

Симбиотические звезды — малочисленный класс объектов; новый каталог Akras et al. (2019a) насчитывает всего 257 систем, находящихся в нашей Галактике, и 66 внегалактических объектов. Тем не менее этот класс объектов представляется важным этапом эволюции двойных систем (см., например, Lü et al., 2006; Mikołajewska, 2013; Yungelson, 2018). Munari and Renzini (1992) оценивают в 10 % от общего числа долю известных СЗ даже в пределах 1 кпк от Солнца, связывая это с трудностью обнаружения систем со слабыми эмиссионными линиями в спектрах. Примером, подтверждающим это предположение, является недавнее открытие Mukai et al. (2016) симбиотической природы объекта SU Lyn (расстояние 600 пк) и подтверждение этого Nuñez et al. (2016) для такой яркой звезды, как 4 Dra (расстояние менее 200 пк). Поэтому поиск новых СЗ представляется важной задачей, решение которой проливает свет на эволюцию двойных систем с орбитальными периодами от сотен дней до десятков лет.

В работе Akras (2023) на основе анализа различных каталогов были выделены кандидаты в СЗ. Для этого из III-го Каталога переменных звезд, открытых или подтвержденных по данным обзора ASAS-SN (Jayasinghe et al., 2018; 2019), были выбраны объекты, демонстрирующие полуправиль-

*E-mail: andrew@sai.msu.ru

ную или неправильную переменность с характерным временем больше 50 дней, инфракрасные показатели цвета которых удовлетворяют критерию, описанному в работе Akras et al. (2019b). По наблюдениям спутника GALEX из полученного списка красных гигантов были выбраны объекты с показателем цвета $FUV - NUV < 1$, указывающим, что в системе с высокой вероятностью присутствует белый карлик. Таким образом, Akras (2023) было получено 35 кандидатов в симбиотические звезды, среди которых оказалось пять известных СЗ. Мы наблюдали несколько объектов из этого списка.

Целью нашей работы является проверка классификации отобранных источников как кандидатов в симбиотические звезды.

2. НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения кандидатов в симбиотические звезды проводились с двухлучевым спектрографом TDS (Potanin et al., 2020), установленным на 2.5-м телескопе КГО ГАИШ (Shatsky et al., 2020). Использовалась щель шириной $1''$, спектры были получены одновременно в B-канале (диапазон длин волн 360–577 нм, спектральная разрешающая сила $R = 1300$) и в R-канале (567–746 нм, $R = 2500$). Процедура первичной редукции спектров описана в Dodin et al. (2020). В таблице 1 приведен журнал спектральных наблюдений.

Спектральный мониторинг V520 And был выполнен 4 декабря 2023 г. В течение двух часов непрерывно регистрировались спектры с экспозициями 300 с в обоих каналах. Теллурическими стандартами служили звезды A0 V, наблюдавшиеся на близких высотах к объекту перед мониторингом и сразу после него. При калибровке спектры стандарта приводились к воздушной массе V520 And на момент регистрации каждого спектра. Обработка данных спектрального мониторинга подробно описана нами в работе Maslennikova et al. (2023).

Кроме того, 16 декабря 2023 г. и 6 января 2024 г. были получены спектры высокого разрешения V520 And с временем накопления 2×1000 с и 5×1000 с соответственно. Наблюдения проводились на 2.5-м телескопе КГО с прототипом спектрографа высокого разрешения. Он состоит из двух основных частей: приемного узла в фокусе Кассегрена и эшелле-спектрографа, смонтированного на термостатированном оптическом столе в подвале башни. Приемный узел служит для переброса изображения звезды на входной торец 25-м кварцевого световода. Вместе они формируют апертуру $2''.5$ в проекции на небо. Эшелле-спектрограф имеет классическую схему и включает

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений с TDS

Объект	Дата	$T_{\rm exp}$, с	
		B	R
ASAS J204428+1914.7	31.10.2023	3×600	3×600
IRAS 08034−0641	25.01.2023	2×100	2×100
IRAS 08274+4132	25.01.2023	2×100	2×100
IRAS 08484−1234	25.01.2023	2×100	2×100
IRAS 23161+1809	27.01.2023	2×200	2×200
KO Her	25.01.2023	2×100	2×100
OQ Her	26.01.2023	2×200	2×200
V455 Her	26.01.2023	2×100	2×100
V520 And	25.01.2023	1×300	1×300
V520 And	15.09.2023	2×300	2×300
V520 And	13.10.2023	2×300	2×300
V520 And	04.12.2023	24×300	20×300
V520 And	15.12.2023	3×300	3×300
V520 And	12.06.2024	2×300	2×300

две линзы-дублета для согласования светосил волокна $F/3.3$ и спектрографа $F/13.3$, внеосевой параболический коллиматор с диаметром пучка 45 мм, эшелле-решетку $R2$ 75 штрихов мм$^{-1}$, стеклянную призму кросс-дисперсии двойного прохождения, камерный объектив Nikkor 200 $f/2$ и КМОП-приемник ASI 6200 MM Pro. Диапазон длин волн 4200–7500 Å; спектральная разрешающая сила в районе линии Hα, $R \sim 25\,000$, определялась в период наблюдений с промежуточной щелью. Калибровка длин волн производится с лампой с полым катодом (линии железа, аргона и примесей); редукция данных выполняется пакетом утилит на языке `Python`.

Фотометрический мониторинг V520 And длительностью 2.5 часа в полосе B был проведен 14 октября 2023 г. с помощью ПЗС-фотометра на базе камеры Andor iKON-L, установленного в фокальной плоскости телескопа RC600 КГО ГАИШ. Фотометр имеет масштаб $0''.67$ пиксель$^{-1}$ и поле зрения около $22'$ (Berdnikov et al., 2020). Первичная редукция полученных кадров проводилась стандартным для ПЗС-фотометрии методом: учет кадров подложки, вычитание темнового тока и деление на кадры плоского поля. Измерение блеска звезд на кадрах проводилось методом апертурной фотометрии с использованием в качестве стандартов звезд поля, оценки блеска которых были получены из APASS (Henden et al., 2016). Ошибка фотометрии считалась как стандартное отклонение

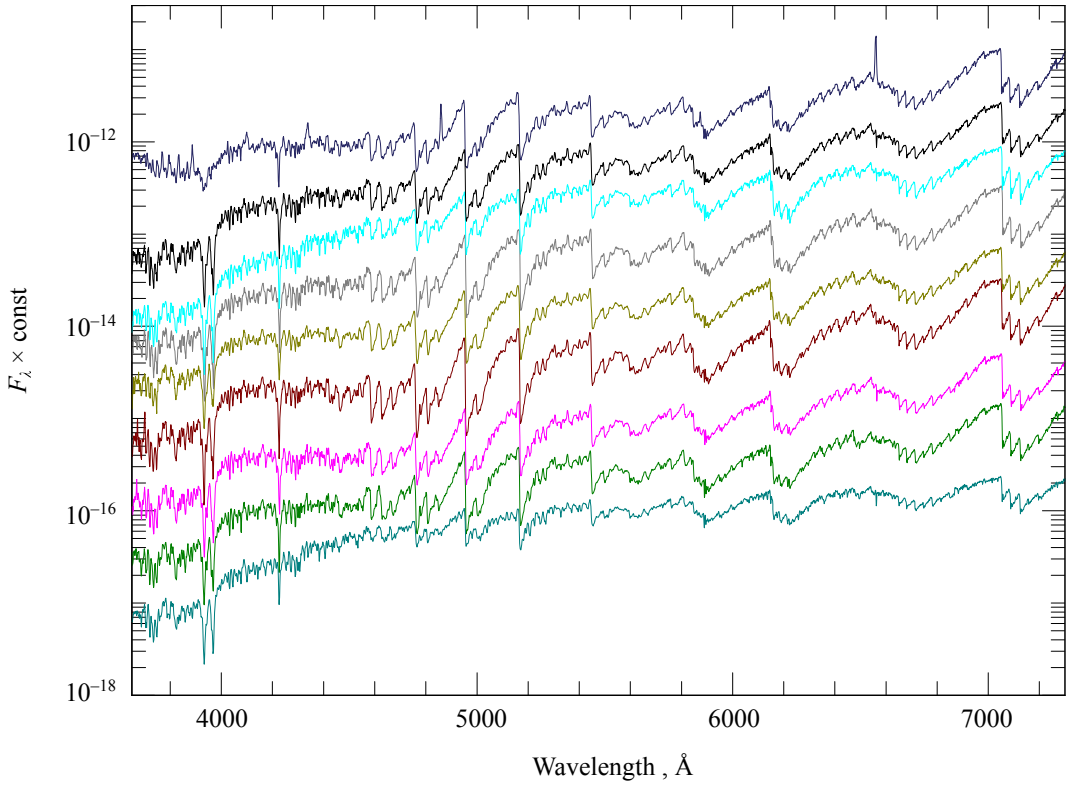

Рис. 1. Исправленные за межзвездное покраснение спектры кандидатов в симбиотические звезды. Сверху вниз: V520 And (15.09.2023), KO Her, IRAS 08274+4132, IRAS 08484−1234, V455 Her, IRAS 23161+1809, IRAS 08034−0641, ASAS J204428+1914.7, OQ Her.

кривой блеска контрольной звезды, имеющей одинаковый блеск с переменной.

3. СПЕКТРАЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

Оценки блеска в ближнем ИК-диапазоне для всех звезд из таблицы 1 есть в каталоге обзора 2MASS (Skrutskie et al., 2006). Показатели цвета $J-K$ лежат в интервале $1\overset{m}{.}1$–$1\overset{m}{.}3$, что при малом межзвездном поглощении указывает на гиганты (или сверхгиганты) поздних спектральных классов или на наличие избытка ИК-излучения, связанного с околозвездными пылевыми оболочками вокруг звезд более ранних спектральных классов. Для первого случая из оценок блеска в полосе K, расстояний из каталога Gaia EDR3 (Bailer-Jones et al., 2021) и болометрических поправок для указанных показателей цвета из работы Montegriffo et al. (1998) мы получили оценки абсолютных болометрических звездных величин, представленные в таблице 2. Они лежат в диапазоне от -3^m до -4^m и соответствуют III классу светимости.

Спектры девяти звезд, выбранных нами для исследования, приведены на рис. 1. Они были исправлены за межзвездное покраснение с избытками цвета (см. табл. 2), которые были определены по картам Green (2019). На всех спектрах выделяются полосы поглощения TiO, что позволяет отнести эти объекты к звездам M- класса и с учетом показателей цвета $J-K$ исключить наличие околозвездных оболочек. У всех звезд, кроме V520 And, в

Таблица 2. Параметры объектов выборки: избыток цвета, расстояние, спектральный класс и абсолютная болометрическая звездная величина

Объект	$E(B-V)$, mag	r, pc	Spectral type	$M_{\rm bol}$, mag
ASAS J204428+1914.7	0.1	2660	M6 III	−3.1
IRAS 08034−0641	0.05	2620	M6.5 III	−3.8
IRAS 08274+4132	0.01	2470	M5 III	−3.3
IRAS 08484−1234	0.01	2200	M6.5 III	−3.6
IRAS 23161+1809	0.05	2400	M6.5 III	−3.6
KO Her	0.01	3360	M6.5 III	−3.5
OQ Her	0.05	2610	M3 III	−3.0
V455 Her	0.07	2520	M6 III	−3.2
V520 And	0.1	3200	M6 III	−3.3

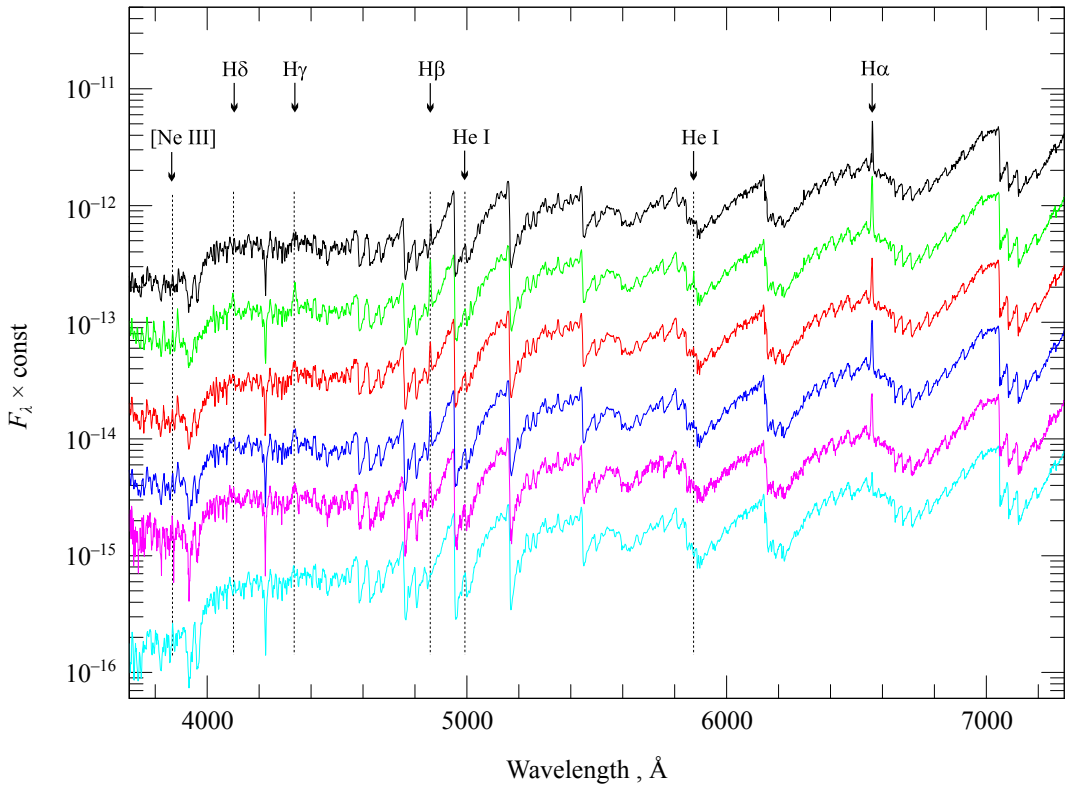

Рис. 2. Исправленные за межзвездное покраснение спектры V520 And, полученные (сверху вниз в хронологическом порядке) 25 января 2023 г., 15 сентября 2023 г., 13 октября 2023 г., 4 декабря 2023 г., 15 декабря 2023 г. и 12 июня 2024 г.

спектре отсутствуют эмиссионные линии. К сожалению, основная полоса TiO (λ 7025), а в случае спектрального класса M6 III и позднее — полоса VO (λ 7865), по которым обычно проводится спектральная классификация холодных компонентов симбиотических звезд (Kenyon and Fernandez-Castro, 1987), частично или полностью не попадают в рабочий диапазон спектрографа. Поэтому мы проводили классификацию путем сравнения полученных спектров со спектрами красных гигантов, представленными в работе Pickles (1998).

Оказалось, что восемь звезд из нашей выборки имеют очень поздние спектральные классы: M5–M6.5. У одной из них (ASAS J204428+1914.7) в спектре есть явные признаки обогащения атмосферы элементами s-процесса. В ее спектре присутствуют полосы ZrO (λ 6345 и λ 6473) и YO (λ 6132). Еще одна звезда выборки (OQ Her) классифицируется как M3-гигант. Из представленных в таблице 2 и на рис. 1 звезд только у V520 And наблюдаются эмиссионные линии и избыток УФ-излучения в области бальмеровского скачка.

4. V520 And

Эмиссионные особенности, наблюдаемые в спектре V520 And, в совокупности с критериями Akras et al. (2019b) позволяют подтвердить ее симбиотическую природу. Для изучения изменений спектров V520 And было проведено несколько наблюдений на спектрографе TDS. На рис. 2 показаны все полученные спектры. Видно, что при сохранении формы непрерывного спектра во всем диапазоне и во все даты (кроме коротковолновой части спектра, снятого 12 июня 2024 г.) наблюдается переменность как эмиссионных, так и абсорбционных линий. В последнем из полученных нами спектров видно его значительное ослабление в коротковолновой части и исчезновение всех эмиссионных линий, кроме слабой линии Hα.

Наиболее развитый эмиссионный спектр наблюдался у V520 And в сентябре 2023 г. В нем хорошо видны линии водорода, He I и Fe II (см. Раздел 5). Также заметно возрастание потоков в континууме в сторону бальмеровского скачка. В синей части спектра присутствует слабая линия [Ne III], блендированная линией гелия. На рис. 3 приведены фрагменты спектров V520 And в области λ 5000. На протяжении всей полосы TiO λ 4950 видны особенности в спектре, связанные с полосами и линиями холодного компонента. Все эти особенности не меняются от даты к дате (см., например, линии на длинах волн 5043–5050 Å), кроме совпадающих по положению с линиями

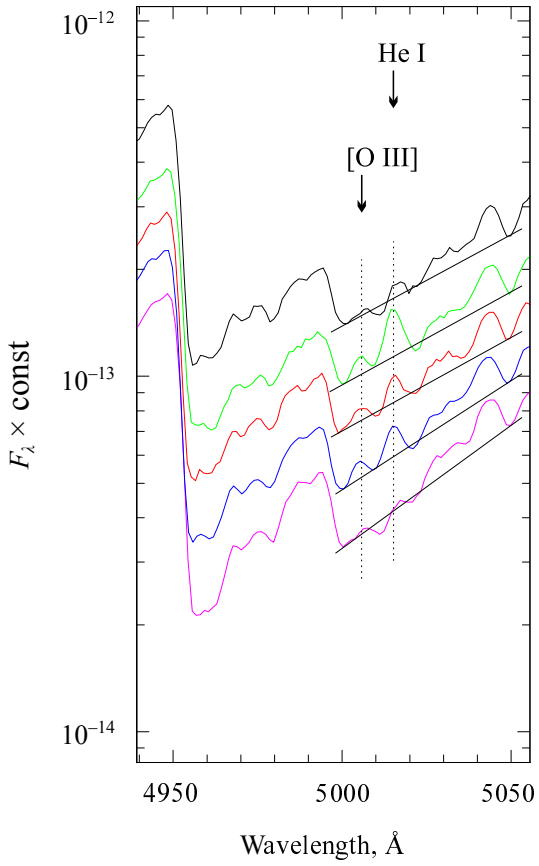

Рис. 3. Фрагменты спектров V520 And, полученные (сверху вниз) 25 января 2023 г. (черный), 15 сентября 2023 г. (зеленый), 13 октября 2023 г. (красный), 4 декабря 2023 г. (синий) и 12 июня 2024 г. (фиолетовый). Для наглядности они домножены на константу, а абсобрционные особенности в спектре холодного компонента на λ 5000 и λ 5050 соединены отрезками.

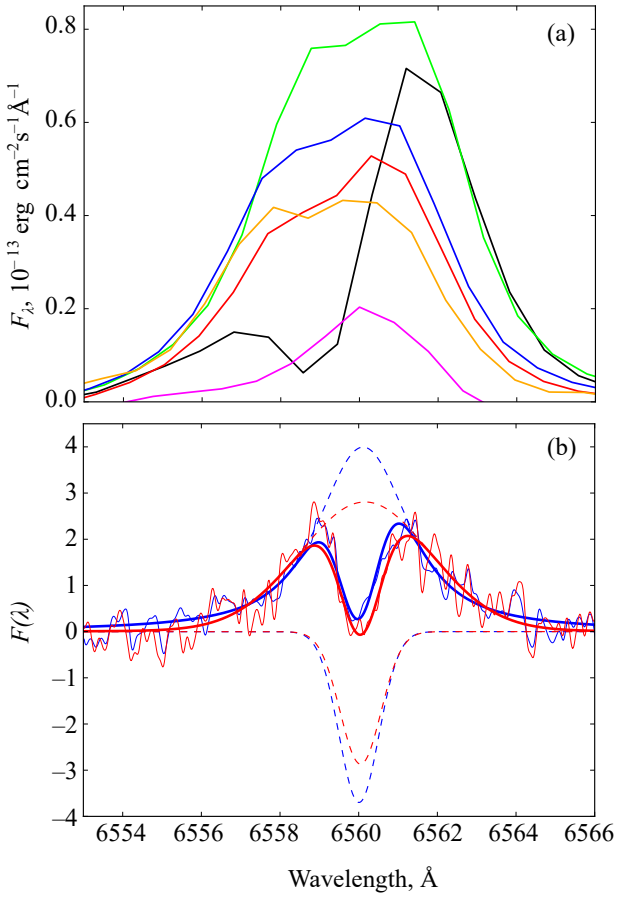

Рис. 4. Линия Hα на спектрах низкого и высокого разрешения, панели (a) и (b) соответственно. Уровень непрерывного спектра соответствует нулевому значению потока. Спектры высокого разрешения перед вычитанием непрерывного спектра нормированы на его значение. На панели (a): линия Hα на спектрах, полученных 25 января 2023 г. (черный), 15 сентября 2023 г. (зеленый), 13 октября 2023 г. (красный), 4 декабря 2023 г. (синий), 15 декабря 2023 г. (желтый), 12 июня 2024 г. (фиолетовый). На спектрах высокого разрешения: тонкие линии — наблюдаемые данные; толстые линии — аппроксимация компонентами, нарисованными штриховыми линиями; синими и красными линиями показаны спектры, полученные 16 декабря 2023 г. и 6 января 2024 г. соответственно.

[O III] λ 5007 и He I λ 5015, которые были слабыми 25 января 2023 г. и заметно поярчали 15 сентября 2023 г., как и эмиссионный спектр звезды в целом. Это позволяет предположить наличие слабой эмиссии [O III] λ 5007.

На рис. 4a показаны изменения интенсивности и профиля линии Hα в период наших наблюдений. Заметно, что профиль имеет сложную форму, представленную, по-видимому, двумя основными компонентами. Соотношение компонентов меняется, однако низкое спектральное разрешение не позволяет проследить это надежно.

Двугорбая форма профиля линии Hα хорошо видна на спектрах высокого разрешения, полученных 16 декабря 2023 г. и 06 января 2024 г. Фрагменты этих спектров, сглаженные сверткой с функцией Гаусса с $\sigma = 3$ пикселя, показаны на рис. 4b. Разница в положении между двумя основными компонентами соответствует скорости около 100 км с$^{-1}$. Видно, что поток между ними падает до уровня континуума. При такой ширине профиля линии Hα этосщдыу может говорить об абсорбционной природе провала между ними. Профиль линии можно описать суммой профиля Фойгта для эмиссионной линии и профиля Гаусса для абсорбционного компонента (см. рис. 4b). Большая ширина и глубина абсорбционного компонента говорят о том, что он не может принадлежать красному гиганту M6 III. Вероятно, речь идет о поглощении излучения веществом ветра холодного компонента или газовых потоков в системе. В пользу такого предположения говорят и результаты работы Ikeda and Tamura (2004), в которой были исследованы профили линии Hα большо-

го числа симбиотических звезд и показано, что при двугорбой форме профиля провал смещен в коротковолновую сторону относительно скорости системы и относительная скорость абсорбционной компоненты составляет приблизительно 30 км с$^{-1}$, что близко к скорости газовых потоков в системе. Похожий двугорбый профиль линии Hα наблюдался у повторной симбиотической новой T CrB во время спокойного состояния (Stanishev et al., 2004) и в минимуме блеска в 2023 г. (Maslennikova et al., 2023). Stanishev et al. (2004) описывают профиль линии Hα также суммой линий излучения и поглощения.

Отметим, что двугорбая структура профиля линии Hα может быть связана и с наличием в системе аккреционного диска. В этом случае скорость на его внешней границе составляет около 50–60 км с$^{-1}$. Это близко к оценке скорости, полученной Zamanov et al. (2024) по двугорбому профилю линии Hα в спектре повторной симбиотической новой T CrB, находившейся в состоянии пониженной активности. Нужно заметить, что в случае T CrB двугорбый профиль наблюдался только после окончания сверхактивной стадии, когда потоки в эмиссионных линиях значительно упали (Maslennikova et al., 2023). У V520 And оба спектра высокого разрешения получены на стадии, близкой к минимуму эмиссионного спектра.

В пользу симбиотической природы V520 And говорит и наличие быстрой переменности блеска в полосе B, обнаруженной в ходе фотометрического мониторинга 14 октября 2023 г. На рис. 5 представлена полученная кривая блеска. Амплитуда переменности составила $0\overset{m}{.}08$ (при точности фотометрии $0\overset{m}{.}009$) с характерным временем 10–15 минут. Подобную переменность симбиотических звезд, по аналогии с быстрой переменностью катаклизмических переменных, называют фликкерингом или фликкер-эффектом. Она наблюдается лишь у небольшого числа систем (см., например, (Dobrzycka et al., 1996; Maslennikova et al., 2022; Sokoloski et al., 2001; Zamanov and Bruch, 1998) и соотносится обычно либо с горячим пятном на поверхности вращающегося белого карлика, либо с нестационарными процессами в аккреционном диске.

У нескольких симбиотических звезд, например CH Cyg (Tomov et al., 1996) или RS Oph (Sokoloski, 2003), помимо фотометрической, наблюдается и спектральная быстрая переменность — меняются интенсивности отдельных линий или их профили. Спектральный мониторинг V520 And был проведен 4 декабря 2023 г. Вариации размера изображения звезды на щели, ошибки ведения телескопа и переменность прозрачности атмосферы приводят к изменениям регистрируемого потока из-за переменных потерь света на узкой щели. Поскольку вычисление абсолютных потоков невозможно, мы искали эффекты быстрой переменности в эквивалентных ширинах эмиссионных линий.

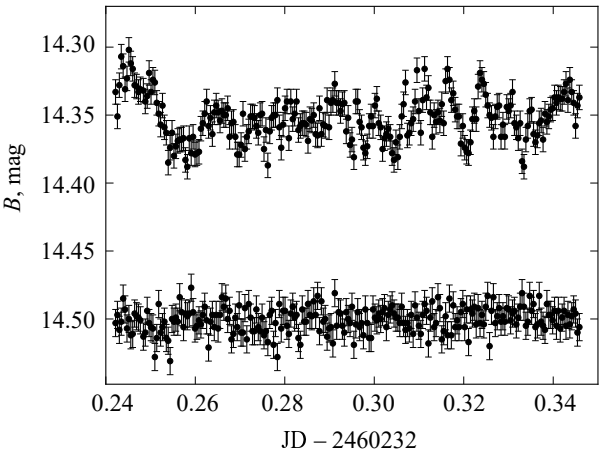

Рис. 5. Кривые блеска V520 And (сверху) и звезды сравнения (снизу) в полосе B, полученные 14 октября 2023 г. во время фотометрического мониторинга.

Быструю переменность эквивалентной ширины мы пытались обнаружить у наиболее ярких линий в спектре. В итоге она была зарегистрирована в линиях Hα, Hβ и He I λ5876 (рис. 6). Так, у линий Hα и Hβ эквивалентная ширина меняется на 8–10 %. Если профиль линии Hα разложить на компоненты, как было описано выше, то оказывается, что фликкер-эффект регистрируется только у основного (эмиссионного) компонента, абсорбционный компонент на протяжении нашего мониторинга остается постоянным. Амплитуда переменности He I намного выше, чем у линий бальмеровской серии водорода, и составляет примерно 30% относительно медианного значения.

В запрещенной линии [Ne III] λ3869 фликкер-эффект отсутствует: отклонения точек не превышают 1–2σ (рис. 6). Так как эта линия у симбиотических звезд образуется в протяженной разреженной части туманности, окружающей систему, то быстрая переменность в ней не ожидается, и ее отсутствие подтверждает учет возможных эффектов, которые могли бы привести к ложному обнаружению быстрой переменности.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Постоянство формы континуума V520 And почти во всем видимом диапазоне во все даты наших наблюдений, а также исчезновение эмиссионных линий и избытка УФ-излучения из ее спектра 12 июня 2024 г. позволяют нам выделить спектр переменного компонента. На рис. 7а приведены спектры, полученные 15 сентября 2023 г. и от

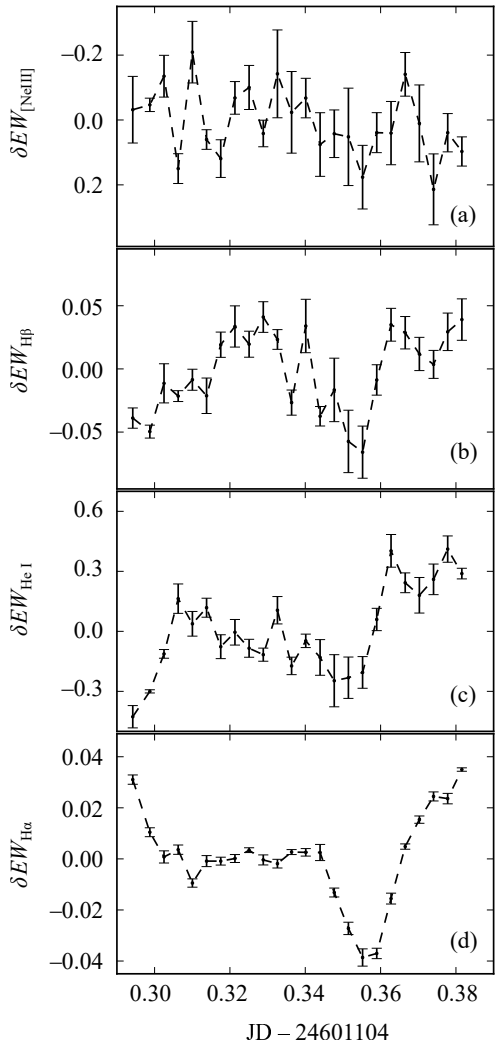

Рис. 6. Кривые изменения эквивалентных ширин линий (сверху вниз) Hα (a), Hβ (b), He I λ5875 (c), [Ne III] λ3869 (d), полученные во время мониторинга V520 And 4 декабря 2023 г.

12 июня 2024 г., нормированные так, чтобы континуум спектров совпал в области $\lambda > 6000$ Å. Видно, что в красной области спектры совпадают очень хорошо. Это свидетельствует о том, что спектральный класс красного гиганта в обе даты был одинаковым (немного более ранний, чем M6 III). Разность этих спектров показана на рис. 7b. Хорошо видно большое число линий H I, He I и Fe II, а также заметный бальмеровский скачок. Кроме этого, есть свидетельства наличия в спектре линий [O III] λ5007, [Ne III] λ3869 и He II λ4686. Таким образом, имеется основной наблюдательный признак, по которому V520 And можно отнести к симбиотическим звездам, — наличие в спектре красного гиганта эмиссионных линий, характерных для планетарных туманностей.

Сильная переменность эмиссионного спектра на подобных временных интервалах иногда наблюдается у известных симбиотических звезд. Так, в активном состоянии у T CrB наблюдался богатый эмиссионный спектр. В марте 2023 г. звезда стала выходить из этого состояния и поток в эмиссионных линиях водорода и гелия стал уменьшаться. В июне 2023 г. поток в Hα упал больше чем в четыре раза по сравнению мартом, линии He I и He II исчезли, а поток в линии [Ne III] не изменился. То есть меньше чем за полгода богатый эмиссионный спектр почти полностью исчез (Maslennikova et al., 2023).

Описать наблюдаемую небольшую величину бальмеровского скачка можно, например, излучением туманности с высокой электронной температурой: $T_e > 20\,000$ K. Однако слабость линии He II λ4686 указывает на относительно холодный горячий компонент с $T_h \sim 50\,000$ K (Mikolajewska et al., 1989; Murset and Nussbaumer, 1994), при этом электронная температура туманности не может быть настолько высока. Зафиксировав значение электронной температуры на характерной для симбиотических звезд величине $T_e = 10\,000$ K, мы получим большую величину бальмеровского скачка, который замывается излучением горячего компонента и в целом хорошо воспроизводит наблюдения (см. рис. 7). Дополнительно в модель можно ввести аккреционный диск со светимостью до 2 $L_\odot$. При увеличении T_h до 60 000 K без аккреционного диска объяснить величину бальмеровского скачка не представляется возможным. При этом его светимость не превышает 10 $L_\odot$. В пользу присутствия аккреционного диска в системе говорит также факт наблюдения примерно в то же время фликкер-эффекта, отмеченный нами выше.

Таким образом, V520 And состоит из красного гиганта, белого карлика с $T_h \sim 50\,000$ K и аккреционного диска со светимостью меньше нескольких светимостей Солнца. Система погружена в туманность, образованную из вещества ветра красного гиганта, имеющую сложную структуру. Основными источниками возбуждающего излучения являются переходный слой, внутренние области аккреционного диска и поверхность белого карлика. Линии H I и He I образуются в основном в достаточно плотной области недалеко от белого карлика и аккреционного диска. Запрещенные линии формируются во внешних разреженных областях туманности.

Двойственность звезд может проявляться при фотометрических наблюдениях. Хороший инструмент для анализа фотометрического поведения относительно ярких звезд предоставляет проект ASAS-SN (Kochanek et al., 2017). С его помощью были просмотрены кривые блеска всех объектов из нашей выборки. Звезды ASAS J204428+1914.7, IRAS 08034−0641,

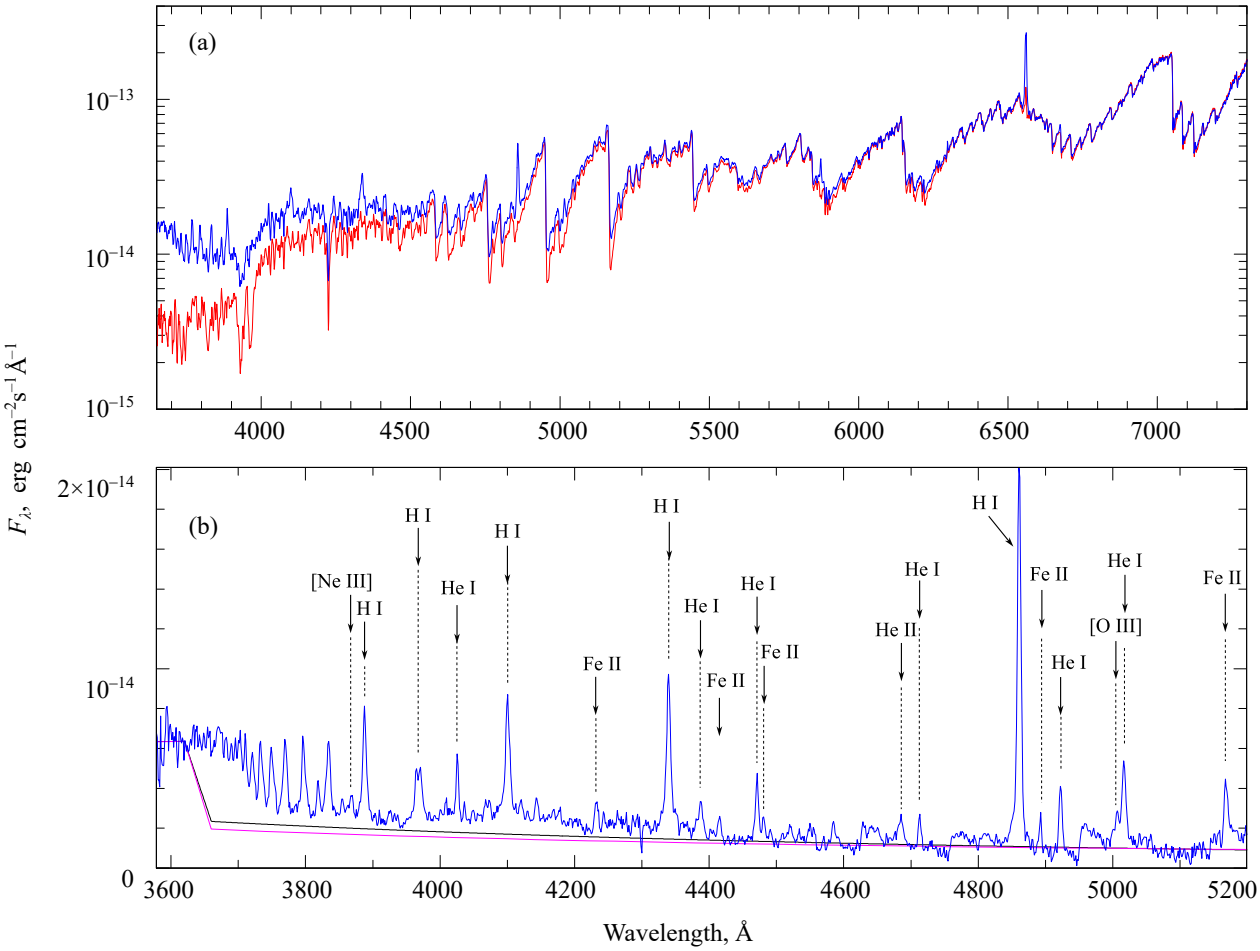

Рис. 7. Панель (a): спектры V520 And от 15 сентября 2023 г. (синяя линия) и 12 июня 2024 г. (красная линия), совмещенные в диапазоне $\lambda > 6000$ Å; панель (b): разность этих спектров (синяя линия) и спектры суммы излучения в континууме туманности с $T_e = 10\,000$ K и горячего компонента с $T_{\rm eff} = 50\,000$ K без аккреционного диска (розовая линия) и с диском со светимостью $2\,L_\odot$ (черная линия).

IRAS 08484−1234, IRAS 23161+1809 можно классифицировать как переменные типа SRB (по критериям ОКПЗ, версия 5.1; Samus' et al., 2017). К этому же типу мы относим KO Her и V455 Her, тогда как, согласно ОКПЗ, они принадлежат к неправильным переменным. Еще три объекта — IRAS 08274+4132, OQ Her и V520 And — относятся к переменным типа SRA. Таким образом, все девять объектов нашего списка, включая и V520 And, демонстрируют переменность, характерную для гигантов поздних классов.

Еще одним параметром, чувствительным к присутствию горячего компонента в двойной системе, является показатель цвета, включающий в себя блеск в УФ-диапазоне. Мы оценили показатель цвета $NUV - J$ (NUV соответствует одной из УФ-полос спутника GALEX) по спектрам красных гигантов M2−M10 из работы Pickles (1998) и получили $NUV - J > 11\overset{\rm m}{.}6$. Из нашей выборки только у V520 And значение этого показателя цвета меньше: $NUV - J = 10\overset{\rm m}{.}3$. У остальных восьми звезд $NUV - J \gtrsim 13^{\rm m}$. Отметим, что учет межзвездного покраснения при малых избытках цвета у всех звезд выборки (см. таблицу 2) не повлияет сколько-нибудь существенно на эти величины.

Итак, мы выделили несколько фактов, указывающих на симбиотическую природу V520 And: наличие в ее спектре эмиссионных линий и бальмеровского скачка, фотометрического и спектрального фликкер-эффектов и избытка УФ-излучения (по показателям цвета $FUV - NUV$ и $NUV - J$). Следовательно, V520 And — это двойная система.

На рис. 8 представлена фазовая кривая блеска, построенная по данным ASAS-SN и свернутая с найденным нами периодом $P = 73\overset{\rm d}{.}69$. Такая величина периода характерна для звезд типа SRA, к которым может быть отнесен холодный компонент V520 And. Видно, что период колебаний блеска достаточно стабилен (в основном меняется амплитуда), поэтому еще одним объяснением переменности

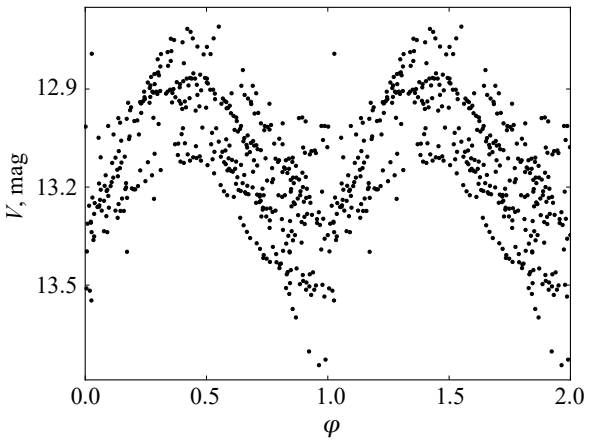

Рис. 8. Кривая блеска V520 And в полосе V, свернутая с периодом $73^{\mathrm{d}}.69$ (по данным ASAS-SN).

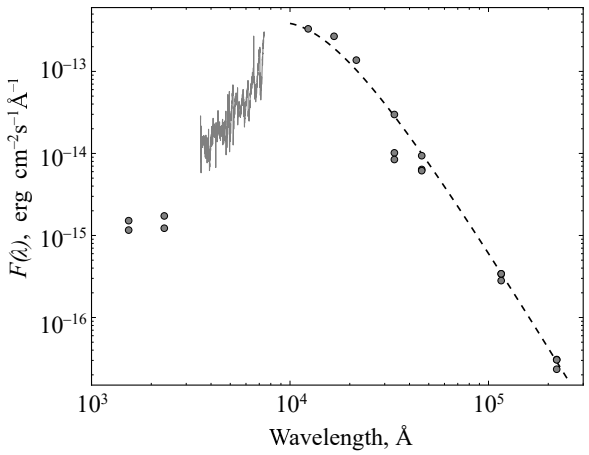

Рис. 9. Исправленный за межзвездное покраснение спектр (сплошная линия) и потоки в ближнем и среднем ИК-диапазонах для V520 And по данным из каталогов VizieR (точки). Штриховой линией показано распределение энергии в спектре абсолютно черного тела с $T_{\mathrm{eff}} = 3200$ K.

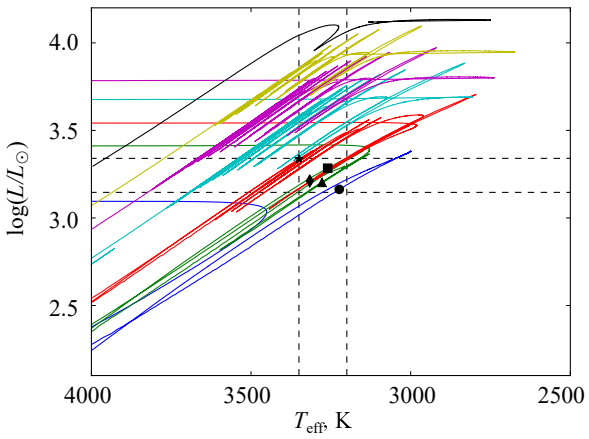

Рис. 10. Эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами (снизу вверх) 1 $M_\odot$, 1.2 $M_\odot$, 1.5 $M_\odot$, 2 $M_\odot$, 2.5 $M_\odot$, 3 $M_\odot$ и 4 $M_\odot$. Штриховыми линиями ограничены значения эффективной температуры 3200–3350 K и светимости 1400–2200 $L_\odot$ для красного гиганта V520 And. Масса звезды на стадии, обозначенной кружком, равна 0.6 $M_\odot$, треугольником — 0.7 $M_\odot$, ромбом — 0.9 $M_\odot$, квадратом — 1 $M_\odot$, звездочкой — 1.3 $M_\odot$.

может быть орбитальное движение. Так как блеск системы меняется и в красном диапазоне спектра, то причина этой переменности все равно должна быть связана с холодным компонентом (вклад других источников пренебрежимо мал в этой области спектра, см. рис. 7). В некоторых симбиотических звездах наблюдается эффект эллипсоидальности, связанный с заполнение холодным компонентом своей полости Роша (см., например, Yudin et al., 2005; Mikolajewska, 2012; Tatarnikova et al., 2013). В случае если это справедливо и для красного гиганта V520 And, то орбитальный период двойной системы должен составлять $2P$. Отметим, что такое значение орбитального периода было бы минимальным среди всех симбиотических звезд, для которых известны периоды.

Абсолютная болометрическая звездная величина V520 And составляет $-3^{\mathrm{m}}.3$ (см. таблицу 2), то есть светимость красного гиганта примерно 1700 $L_\odot$. По данным из каталогов в VizieR нами было построено распределение энергии в спектре V520 And (рис. 9), которое в ИК-диапазоне совпадает со спектром абсолютно черного тела с эффективной температурой 3200 K, поэтому V520 And относится к S-типу симбиотических звезд — систем, у которых отсутствует ИК-избыток. Близкую оценку температуры можно получить по спектральному классу звезды. Так, согласно Gray and Corbally (2009), спектральным классам M5 III и M6 III соответствует температура 3355–3240 K. Проинтегрировав полученное распределение энергии, мы, с учетом неопределенности расстояния Gaia, нашли диапазон светимости холодного компонента 1400–2200 $L_\odot$, удовлетворяющий оценке, полученной по наблюдаемому блеску в полосе K. Это позволяет определить размеры холодного компонента: $R_c = 120$–$155\,R_\odot$.

Совместить в двойной системе красный гигант полученного размера с полостью Роша при столь коротком орбитальном периоде можно лишь при достаточно больших массах компонентов системы (в сумме — несколько солнечных масс). Для оценки массы холодного компонента с помощью пакета MESA (Paxton et al., 2011) нами были построены эволюционные треки звезд с солнечной металличностью и начальными массами 1–4 $M_\odot$ (рис. 10). Видно, что масса красного гиганта, удовлетворяющего полученным нами значениям светимости и температуры, составляет 0.6–1.3 $M_\odot$ (при начальной массе звезды менее 2 $M_\odot$). Небольшие массы красного гиганта означают, что горячий компонент

должен иметь массу в несколько масс Солнца, что явно противоречит всем его наблюдаемым проявлениям. Таким образом, период 147 суток не может являться орбитальным периодом системы.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены результаты наблюдений со спектрографом низкого разрешения девяти кандидатов в симбиотические звезды, выделенные нами из списка Akras (2023). Сравнение полученных спектров со спектрами из каталога Pickles (1998) позволило классифицировать 8 звезд выборки как красные гиганты спектральных классов M5–M6.5 и одну звезду как M3 III (см. таблицу 2). Кривые блеска звезд, приведенные в проекте ASAS-SN, характерны для переменных типа SRA (IRAS 08274+4132, OQ Her и V520 And) и SRB (ASAS J204428+1914.7, IRAS 08034–0641, IRAS 08484–1234, IRAS 23161+1809, KO Her и V455 Her) .

Лишь одна звезда из выборки (V520 And) демонстрирует наличие эмиссионных линий в спектре. Сравнение спектров V520 And со спектрами других звезд, а также со спектром этой переменной, полученным в момент исчезновения эмиссионной составляющей, позволило выделить большое число эмиссионных линий H I, He I, Fe II и бальмеровский скачок, а также, вероятно, слабые линии [O III] λ 5007, [Ne III] λ 3869 и He II λ 4686. Кроме этого, у данной звезды в ходе фотометрического мониторинга 14 октября 2023 г. был обнаружен эффект быстрой переменности в полосе B с амплитудой $0\overset{m}{.}08$, а в ходе спектрального мониторинга — быстрая переменность линий H I и He I. Эти признаки позволяют классифицировать V520 And как симбиотическую звезду с аккреционным диском вокруг горячего компонента. Светимость диска меньше 10 $L_{\odot}$.

Форма спектра V520 And в диапазоне длин волн от 5500 Å и более на протяжении полутора лет наблюдений не изменилась. Эмиссионный спектр звезды при этом переменный. В сентябре 2023 г. в нем наблюдалось большое число линий (см. рис. 7), которые исчезли из спектра в июне 2024 г., за исключением слабой линии Hα. Практически полное исчезновение эмиссионных линий в спектре V520 And делает ее спектр похожим на спектры других звезд нашей выборки. По спектру июня 2024 г. ее нельзя было бы классифицировать как симбиотическую звезду. Данный факт указывает на важность продолжения спектральных наблюдений этих звезд в дальнейшем — возможно, они являются так называемыми «спящими симбиотическими звездами» (Mukai et al., 2016).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны Н. П. Иконниковой за оперативно выполненный фотометрический мониторинг и инженерам КГО за поддержку аппаратуры в рабочем состоянии. Авторы благодарят рецензента за прочтение статьи и внимательность к деталям. Работа выполнена при поддержке Программы развития Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (научно-образовательная школа «Фундаментальные и прикладные исследования космоса»). Н. Масленникова благодарит за поддержку Фонд развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (аспирантский проект № 22-2-10-21-1).

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа А. В. Додина (первичная обработка спектров низкого и высокого разрешения) и Н. И. Шатского (разработка узлов прототипа спектрографа высокого разрешения, калибровка спектров высокого разрешения) поддержана Российским научным фондом (грант № 23-12-00092).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Akras, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **519** (4), 6044 (2023). DOI:10.1093/mnras/stad096
2. S. Akras, L. Guzman-Ramirez, M. L. Leal-Ferreira, and G. Ramos-Larios, Astrophys. J. Suppl. **240** (2), article id. 21 (2019a). DOI:10.3847/1538-4365/aaf88c
3. S. Akras, M. L. Leal-Ferreira, L. Guzman-Ramirez, and G. Ramos-Larios, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **483** (4), 5077 (2019b). DOI:10.1093/mnras/sty3359
4. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, et al., Astron. J. **161** (3), id. 147 (2021). DOI:10.3847/1538-3881/abd806
5. L. N. Berdnikov, A. A. Belinskii, N. I. Shatskii, et al., Astronomy Reports **64** (4), 310 (2020). DOI:10.1134/S1063772920040010
6. A. A. Boyarchuk, Sov. Astron. **44**, 1016 (1967).
7. D. Dobrzycka, S. J. Kenyon, and A. A. E. Milone, Astron. J. **111**, 114 (1996). DOI:10.1086/117794
8. A. V. Dodin, S. A. Potanin, N. I. Shatsky, et al., Astronomy Letters **46** (7), 429 (2020). DOI:10.1134/S106377372007004X
9. R. O. Gray and J. C. Corbally, *Stellar Spectral Classification* (Princeton University Press, Princeton, 2009).

10. G. M. Green, Astrophys. J. **887**, article id. 93 (2019). DOI:10.3847/1538-4357/ab5362
11. A. A. Henden, M. Templeton, D. Terrell, et al., VizieR Online Data Catalog II/336 (2016). VizieR Online Data Catalog: AAVSO Photometric All Sky Survey (APASS) DR9 (2016).
12. Y. Ikeda and S. Tamura, Publ. Astron. Soc. Japan **56**, 353 (2004). DOI:10.1093/pasj/56.2.353
13. T. Jayasinghe, C. S. Kochanek, K. Z. Stanek, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **477** (3), 3145 (2018). DOI:10.1093/mnras/sty838
14. T. Jayasinghe, K. Z. Stanek, C. S. Kochanek, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **486** (2), 1907 (2019). DOI:10.1093/mnras/stz844
15. S. J. Kenyon and T. Fernandez-Castro, Astron. J. **93**, 938 (1987). DOI:10.1086/114379
16. C. S. Kochanek, B. J. Shappee, K. Z. Stanek, et al., Publ. Astron. Soc. Pacific **129** (980), 104502 (2017). DOI:10.1088/1538-3873/aa80d9
17. G. Lü, L. Yungelson, and Z. Han, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **372** (3), 1389 (2006). DOI:10.1111/j.1365-2966.2006.10947.x
18. N. A. Maslennikova, A. M. Tatarnikov, A. A. Tatarnikova, et al., Astronomy Letters **49** (9), 501 (2023). DOI:10.1134/S1063773723090037
19. N. A. Maslennikova, A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov, et al., Astronomy Letters **48** (1), 38 (2022). DOI:10.1134/S1063773722010054
20. J. Mikołajewska, Baltic Astronomy **21**, 5 (2012). DOI:10.1515/astro-2017-0352
21. J. Mikołajewska, Proc. IAU Symp. No. 281, Ed. by R. Di Stefano, M. Orio, and M. Moe (Cambridge University Press, Cambridge, 2013), pp. 162–165. DOI:10.1017/S1743921312014925
22. J. Mikolajewska, S. J. Kenyon, and M. Mikolajewski, Astron. J. **98**, 1427 (1989). DOI:10.1086/115229
23. P. Montegriffo, F. R. Ferraro, L. Origlia, and F. Fusi Pecci, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **297** (3), 872 (1998). DOI:10.1046/j.1365-8711.1998.01553.x
24. K. Mukai, G. J. M. Luna, G. Cusumano, et al., Monthly Notices Royal Astron. Soc. **461** (1), L1 (2016). DOI:10.1093/mnrasl/slw087
25. U. Munari and A. Renzini, Astrophys. J. **397**, L87 (1992). DOI:10.1086/186551
26. U. Murset and H. Nussbaumer, Astron. and Astrophys. **282**, 586 (1994).
27. N. E. Nuñez, T. Nelson, K. Mukai, et al., Astrophys. J. **824** (1), article id. 23 (2016). DOI:10.3847/0004-637X/824/1/23
28. B. Paxton, L. Bildsten, A. Dotter, et al., Astrophys. J. Suppl. **192** (1), article id. 3 (2011). DOI:10.1088/0067-0049/192/1/3
29. A. J. Pickles, Publ. Astron. Soc. Pacific **110** (749), 863 (1998). DOI:10.1086/316197
30. S. A. Potanin, A. A. Belinski, A. V. Dodin, et al., Astronomy Letters **46** (12), 836 (2020). DOI:10.1134/S1063773720120038
31. N. N. Samus', E. V. Kazarovets, O. V. Durlevich, et al., Astronomy Reports **61** (1), 80 (2017). DOI:10.1134/S1063772917010085
32. N. Shatsky, A. Belinski, A. Dodin, et al., in *Proc. All-Russian Conf. on Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, Nizhny Arkhyz, Russia, 2020*, Ed. by I. I. Romanyuk, I. A. Yakunin, A. F. Valeev, and D. O. Kudryavtsev (IP Reshenilenko P.A., Pyatigorsk, 2020), pp. 127–132 (2020). DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_127
33. M. F. Skrutskie, R. M. Cutri, R. Stiening, et al., Astron. J. **131** (2), 1163 (2006). DOI:10.1086/498708
34. J. L. Sokoloski, ASP Conf. Ser. **303**, 202 (2003).
35. J. L. Sokoloski, L. Bildsten, and W. C. G. Ho, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **326**, 553 (2001). DOI:10.1046/j.1365-8711.2001.04582.x
36. V. Stanishev, R. Zamanov, N. Tomov, and P. Marziani, Astron. and Astrophys. **415** (2), 609 (2004). DOI:10.1051/0004-6361:20034623
37. A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov, and V. I. Shenavrin, Proc. IAU Symp. No. 281, Ed. by R. Di Stefano, M. Orio, M. Moe (Cambridge University Press, Cambridge, 2013), p. 203. DOI:10.1017/S1743921312015025
38. T. Tomov, D. Kolev, U. Munari, and A. Antov, Monthly Notices Royal Astron. Soc. **278** (2), 542 (1996). DOI:10.1093/mnras/278.2.542
39. B. F. Yudin, V. I. Shenavrin, E. A. Kolotilov, et al., Astronomy Reports **49** (3), 232 (2005). DOI:10.1134/1.1882781
40. L. R. Yungelson, in *Proc. A. A. Boyarchuk Memorial Conf., Moscow, INASAN, 2018*, Ed. by D. V. Bisikalo and D. S. Wiebe (Yanus-K, Moscow, 2018), pp. 150–161 (2018). DOI:10.26087/INASAN.2018.1.1.027
41. R. K. Zamanov and A. Bruch, Astron. and Astrophys. **338**, 988 (1998).
42. R. K. Zamanov, K. A. Stoyanov, V. Marchev, et al., Astronomische Nachrichten **345**, article id. e20240036 (2024). DOI:10.1002/asna.20240036

Study of Nine Symbiotic Star Candidates. Discovery of Symbiotic Nature of V520 And

N. A. Maslennikova[1,2], A. M. Tatarnikov[1,2], A. A. Tatarnikova[1], A. V. Dodin[1], and N. I. Shatsky[1]

[1]Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow, 119234 Russia
[2]Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

We present the results of spectroscopic observations of nine symbiotic star candidates in the 360−735 nm wavelength range carried out with the TDS spectrograph of the 2.5-m SAI MSU CMO telescope. Eight selected sample stars were classified as red giants of M3−M6 spectral types. Photometric light curve analysis revealed that all nine stars can be attributed to SRA- and SRB-type variables (based on the classification of the General Catalog of Variable Stars—GCVS). It is shown that one of the stars, V520 And, can be classified as a symbiotic star. Its spectrum reveals H I, He I, Fe II emission lines, weak lines of [O III] λ 5007, [Ne III] λ 3869 and He II λ 4686, and a Balmer jump in emission. The emission spectrum is found to be variable on both the long and very short timescales. A high-resolution spectrum ($R = 25\,000$) obtained with the new CMO spectrograph showed the double-peaked shape of the Hα line and the presence of an absorption component in it. The October 14, 2023 photometric monitoring revealed a fast brightness variability in the B band with an amplitude of $0\overset{\mathrm{m}}{.}08$ on a timescale of 10−15 minutes. The luminosity, effective temperature, and radius of the V520 And cool component were determined: $L = 1400-2200\,L_\odot$, $T_{\rm eff} = 3200$ K, and $R = 120-155\,R_\odot$, respectively. Evidence for the presence in the system of an accretion disk with the luminosity $L < 10\,L_\odot$ was also found.

Keywords: *stars: binaries: symbiotic—stars: individual: V520 And, KO Her, OQ Her, V455 Her, IRAS 23161+1809, IRAS 08484−1234, IRAS 08274+4132, IRAS 08034−0641, ASAS J204428+1914.7*