

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ АКТИВНОСТИ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ЗВЕЗДЫ SN Cyg В ПЕРИОД С 2008 ПО 2018 г.

© 2021 г. Т. Н. Тарасова^{1*}, А. Скопал²

¹НИИ Крымская астрофизическая обсерватория, Научный, Россия

²Астрономический институт Словацкой академии наук, Татранска Ломница, Словакия

Поступила в редакцию 08.02.2021 г.

После доработки 02.03.2021 г.; принята к публикации 04.03.2021 г.

Исследована переменная активность симбиотической звезды SN Cyg с 2008 по 2018 г. на основе спектрофотометрических наблюдений. Активность звезды сопровождалась периодическим увеличением потока излучения в непрерывном спектре и в спектральных линиях. В период активности, как в 2015, так и в 2018 г., у профилей эмиссионных линий появились абсорбционные компоненты. Форма и лучевая скорость абсорбционных компонент изменялись в течение суток. Максимальная лучевая скорость абсорбционных компонент составляла около -2000 км/с. Методом моделирования наблюдаемого распределения энергии было установлено, что в активном состоянии светимость и радиус тепловой псевдофотосферы симбиотической звезды увеличились в десятки раз, достигнув в максимуме $R_{WD} = 6.77 R_{\odot}$, $L_{WD} = 88.14 L_{\odot}$ в 2018 г., и источником активности симбиотической звезды является аккреция на белый карлик от гиганта спектрального типа M8III. Оценен темп аккреции при максимальной светимости псевдофотосферы, равный $\dot{M}_{acc} \sim 4.7 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Обнаружена корреляция между молекулярными полосами TiO 6144 и 7125 и блеском звезды в полосе R , которая указывает на то, что период 750 сут может быть периодом пульсаций холодного компонента, и отсюда сделан вывод, что пульсации холодного компонента в периастре или в фазе, близкой к периастру, могут обеспечить дополнительный приток вещества, аккрецирующего на белый карлик. Таким образом, сделано заключение, что переменность блеска симбиотической звезды обусловлена переменным темпом аккреции вещества на белый карлик. Показано, что наиболее активными для этой звезды были 2015 и 2018 г.

Ключевые слова: симбиотические звезды, спектрофотометрические наблюдения, SN Cyg.

DOI: 10.31857/S0320010821040082

ВВЕДЕНИЕ

SN Cyg — самая яркая симбиотическая звезда, поэтому этой звезде уделялось достаточно много внимания разными авторами. Однако, несмотря на это, SN Cyg остается на сегодняшний день одной из наиболее непонятых среди симбиотических звезд. До 1963 г. звезда считалась обычным красным гигантом спектрального типа M6. Позднее более детальная фотометрическая калибровка, выполненная Кенеон и Фернандез-Кастро (1987), уточнила спектральный тип M гиганта как M6.5 III. Однако после обнаружения ультрафиолетового континуума и эмиссионных линий водорода эта звезда была причислена к симбиотическим объектам. До сих пор в литературе дискутируется вопрос, является ли эта система двойной или тройной. Модель тройной звезды после обнаружения

в системе затмений рассматривалась в работах Скопал (1995), Скопал и др. (1996, 2002), а также Ииджима (1998, 2019). В работе Ямашита и Маехара (1979) по лучевым скоростям, измеренным в красной части спектра, был найден период, равный 5700 дням. Авторы этой работы предположили, что SN Cyg состоит из белого карлика и красного гиганта. Новый этап в исследовании был положен в работе Хинкл и др. (1993). В ней на основе точных измерений лучевых скоростей в инфракрасной области было получено два периода: 756 ± 4 дня и 5294 ± 117 дней. Авторы предположили, что система тройная. Однако в своей более поздней работе Хинкл и др. (2009), получив уточненные периоды, равные 750.1 ± 1.3 и 5689.2 ± 47 дней на основе более продолжительных 29-летних наблюдений, отказались от тройной системы. Авторы интерпретировали длинный период как орбитальный, а короткий — как период пульсаций гиганта.

* Электронный адрес: taya_tarasova@mail.ru

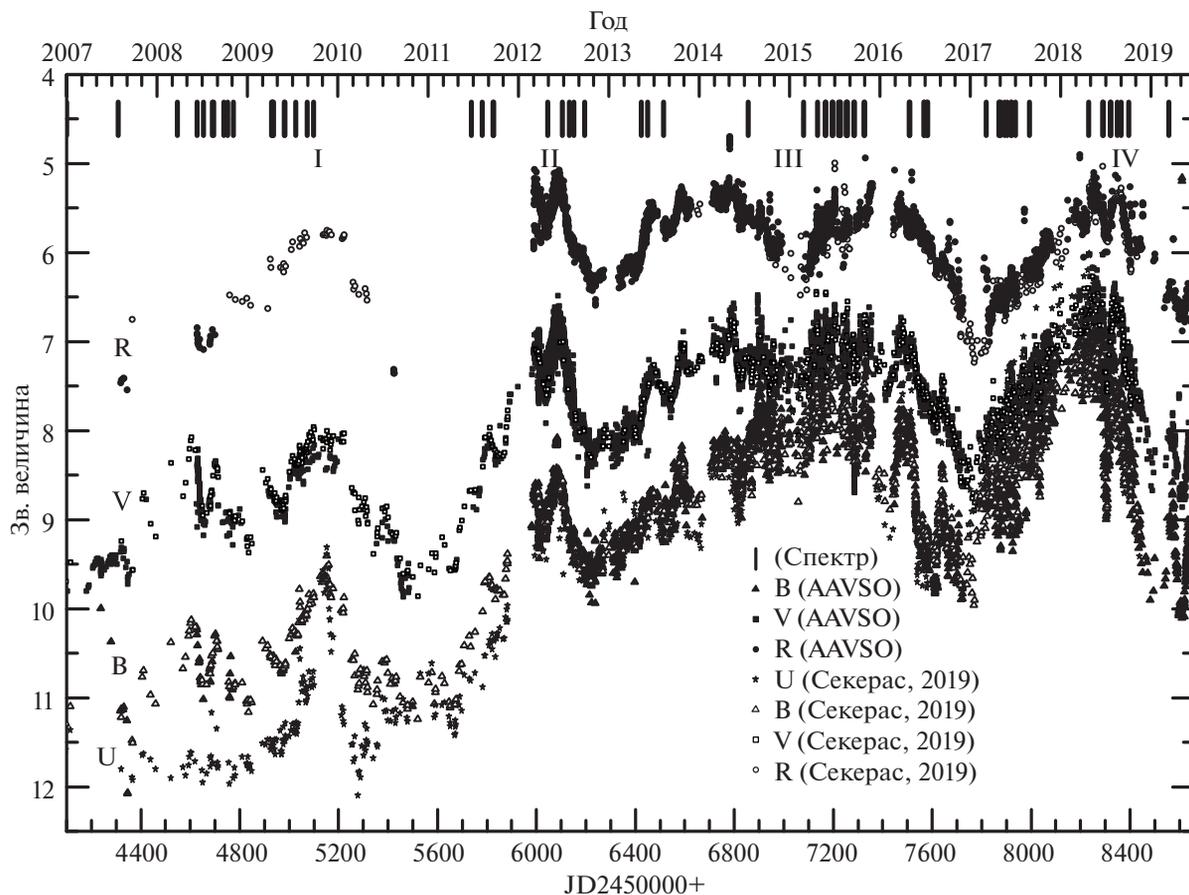


Рис. 1. Кривая блеска SN Sng в 2008–2019 гг. в полосах U , B , V , R . Наблюдения взяты из базы данных AAVSO и работы Секерас и др. (2019).

Известно, что SN Sng отличается высокой активностью, которая проявляется в виде нерегулярных вспышек, сопровождающихся истечением вещества с высокой скоростью, иногда в виде коллимированных потоков вещества — джетов (Тейлор и др., 1986). SN Sng испытала несколько вспышек с начала 1960-х годов. Однако с 2002 г. блеск звезды находился почти на уровне минимума, а в 2006 г. произошло резкое его понижение на 2 зв. величины в полосе V , а в полосе U почти на 3 зв. величины. После резкого понижения началось постепенное увеличение блеска звезды в 2008 г., и максимум был достигнут в 2015 г., а затем в начале 2018 г. (Шугаров и др., 2015; Скопал и др., 2012; Секерас и др., 2019). Активность звезды в 2014–2015 гг. была исследована в работе Кондратьевой и др. (2017). Наши наблюдения за этой звездой охватывают период с марта 2008 г. и заканчивается мартом 2019 г. Целью данной работы было на основе наших спектральных наблюдений исследовать активность симбиотической звезды SN Sng за этот период.

НАБЛЮДЕНИЯ

Спектральные наблюдения были выполнены на 2.6-м телескопе Шайна (ЗТШ). Все спектры получены с помощью щелевого спектрографа СПЭМ, установленного в фокусе Нэсмита. Приемником излучения служила ПЗС-камера SPES-10 1340×100 пиксел. Дисперсия с решеткой 651 шт/мм составляла около 2 \AA pix^{-1} (разрешение около 1000). Журнал наблюдений, в котором содержатся сведения о спектральных данных SN Sng, находится в табл. 1. Первичная обработка спектров, включающая вычитание нуля-пункта АЦП (bias) и коррекцию неоднородности чувствительности поля матрицы, производилась программой SPERED, созданной С.И. Сергеевым в Крымской астрофизической обсерватории. Калибровка потоков излучения в спектре звезды осуществлялась с использованием абсолютного распределения энергии спектрофотометрического стандарта HR7371, взятого из каталога Бурнашева (1985). Спектрофотометрический стандарт мы наблюдали в ту же дату, что и SN Sng и с таким же зенитным расстоянием, поэтому различие в воздушных массах стандарта и

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений SN Суг

Дата	JD-2450000	Фаза 5689.2	Фаза 750.1	Дата	JD-2450000	Фаза 5689.2	Фаза 750.1
23.03.2008	4548.526	0.517	0.352	16.07.2014	6855.453	0.964	0.768
08.06.2008	4626.305	0.572	0.776	27.02.2015	7080.563	0.004	0.048
06.07.2008	4654.350	0.578	0.813	24.04.2015	7137.459	0.014	0.124
10.08.2008	4689.284	0.583	0.860	24.05.2015	7167.436	0.019	0.164
25.09.2008	4734.518	0.591	0.920	25.05.2015	7168.401	0.019	0.165
07.04.2009	4929.460	0.626	0.180	26.05.2015	7169.386	0.019	0.166
08.04.2009	4930.469	0.626	0.181	21.06.2015	7195.395	0.024	0.201
09.04.2009	4931.475	0.626	0.183	22.06.2015	7196.407	0.024	0.202
11.04.2009	4933.426	0.626	0.185	23.06.2015	7197.355	0.024	0.204
15.04.2009	4937.418	0.627	0.190	17.07.2015	7220.531	0.028	0.234
28.05.2009	4980.364	0.635	0.248	22.07.2015	7226.368	0.029	0.242
30.05.2009	4982.170	0.635	0.250	23.07.2015	7227.327	0.030	0.243
31.05.2009	4983.314	0.635	0.252	24.07.2015	7228.306	0.030	0.245
13.07.2009	5026.440	0.643	0.309	18.08.2015	7253.367	0.034	0.278
28.08.2009	5071.518	0.651	0.369	19.08.2015	7254.302	0.034	0.279
28.08.2009	5072.458	0.651	0.371	20.08.2015	7255.300	0.034	0.280
24.09.2009	5099.246	0.655	0.406	21.08.2015	7255.533	0.034	0.281
23.06.2011	5736.458	0.768	0.256	21.08.2015	7256.259	0.035	0.282
06.08.2011	5780.419	0.776	0.314	21.08.2015	7256.462	0.035	0.282
20.09.2011	5825.392	0.783	0.374	18.09.2015	7284.242	0.040	0.319
27.04.2012	6045.381	0.822	0.668	19.09.2015	7285.217	0.040	0.321
25.06.2012	6104.414	0.832	0.746	20.09.2015	7286.346	0.040	0.322
24.07.2012	6133.300	0.837	0.785	29.10.2015	7325.194	0.047	0.374
10.08.2012	6150.361	0.840	0.808	30.10.2015	7326.235	0.047	0.375
24.09.2012	6195.372	0.848	0.868	28.04.2016	7507.452	0.079	0.617
12.05.2012	6424.546	0.888	0.173	30.04.2016	7508.547	0.079	0.618
05.06.2013	6449.313	0.893	0.206	01.05.2016	7509.533	0.079	0.619
09.08.2013	6514.334	0.904	0.293	27.06.2016	7567.380	0.089	0.697
29.06.2016	7569.449	0.090	0.699	16.06.2017	7921.375	0.151	0.169
08.07.2016	7578.481	0.091	0.711	01.07.2017	7936.373	0.154	0.189
09.07.2016	7579.450	0.091	0.712	26.08.2017	7992.509	0.164	0.263
11.07.2016	7581.359	0.092	0.715	27.08.2017	7993.447	0.164	0.265
12.07.2016	7582.421	0.092	0.717	28.08.2017	7994.395	0.164	0.266

Таблица 1. Окончание

Дата	JD-2450000	Фаза 5689.2	Фаза 750.1	Дата	JD-2450000	Фаза 5689.2	Фаза 750.1
05.03.2017	7817.575	0.133	0.030	24.04.2018	8233.398	0.206	0.585
06.03.2017	7818.569	0.133	0.032	19.06.2018	8289.388	0.216	0.659
27.04.2017	7870.539	0.143	0.100	21.06.2018	8291.353	0.217	0.662
27.04.2017	7871.454	0.143	0.102	21.07.2018	8321.500	0.222	0.702
28.04.2017	7872.463	0.143	0.103	22.07.2018	8322.286	0.222	0.703
29.04.2017	7873.441	0.143	0.105	18.08.2018	8349.280	0.227	0.739
04.05.2017	7878.493	0.144	0.111	01.09.2018	8363.438	0.229	0.758
19.05.2017	7893.471	0.147	0.131	02.09.2018	8364.385	0.229	0.759
29.05.2017	7903.341	0.148	0.145	07.10.2018	8395.350	0.235	0.801
14.06.2017	7919.498	0.151	0.166	13.03.2019	8556.505	0.263	0.015

симбиотической звезды не учитывалось. Поскольку спектрограф щелевой, мы для контроля сравнивали звездные величины СН Cyg в фильтрах *B* и *V* со значениями показателя цветов *B* и *V*, вычисленными из прокалиброванных спектров, полученных в данные даты. Различие между вычисленными и измеренными звездными величинами составило в среднем около 0.1 зв. величины.

КРИВАЯ БЛЕСКА И СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СН CYG С 2008 ПО 2019 г.

На рис. 1 представлена кривая блеска СН Cyg с 2008 по 2019 г., полученная с использованием базы данных AAVSO и работы Секерас и др. (2019). На этом рисунке вертикальными черточками отмечены дни, когда проводились спектрофотометрические наблюдения. Журнал наблюдений, в котором содержится сведения о спектральных данных симбиотической звезды, находится в табл. 1. Там же указаны фазы для двух периодов 750 и 5689 сут, согласно эфемеридам $JD = 2447293.5 + (750.1 \pm \pm 1.3)E$ и $JD = 2445681 + (5689.2 \pm 47)E$, полученным Хинкл и др. (1993).

Исследуя кривую блеска, мы выделили четыре фазы активности звезды, которые отметили римскими цифрами. В соответствии с выделенными периодами активности на кривой блеска мы также разделили и наши спектрофотометрические наблюдения. На рис. 2, 3, 5 приведены примеры спектров, которые получены в разные фазы активности. Римскими цифрами на этих рисунках отмечены периоды активности СН Cyg. Для наглядности спектральные наблюдения представлены в логарифмическом масштабе и смещены относительно друг

друг от первого спектра на постоянную величину, равную 1. Ниже приведена краткая характеристика этих фаз.

Фаза I. Из рис. 1 следует, что увеличение блеска звезды в фазу I началось в конце 2007 г., а его максимум пришелся на 2009 г. В это время в полосах *U* и *B* наблюдалась вспышка, блеск в полосе *U* резко увеличился почти на 2 зв. величины (Скопал и др., 2010), тем самым указывая на активность горячего компонента. В это же время Мукаи и др. (2009) зарегистрировали вспышку в рентгеновском диапазоне. В остальных полосах блеск звезды увеличился на величину от одной до полутора зв. величин. После максимума блеска его падение происходило более-менее плавно. На рис. 1, помимо изменений блеска, связанных с активностью горячего компонента, хорошо видны, особенно в полосе *R*, его вариации в 1 зв. величину с периодом, близким к 750 сут. На существование таких вариаций блеска с 2000 по 2007 г. и в исследуемый период указывалось в работах Секерас и др. (2019) и Скопал и др. (2007). В полосе *V* такие вариации были менее выражены, а в полосах *B* и *U* в период с 2013 по 2017 г. вместо указанных вариаций наблюдалось более-менее плавное увеличение блеска на 3 зв. величины.

Спектральные наблюдения охватывают период от начала увеличения блеска и до вспышки (рис. 1, I период активности). В распределении энергии непрерывного спектра доминирует излучение холодного компонента (рис. 2). В спектрах присутствуют некоторые эмиссионные линии балмеровской серии водорода $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, а также многочисленные линии ионизованного железа, наиболее сильные из которых — это линии FeII

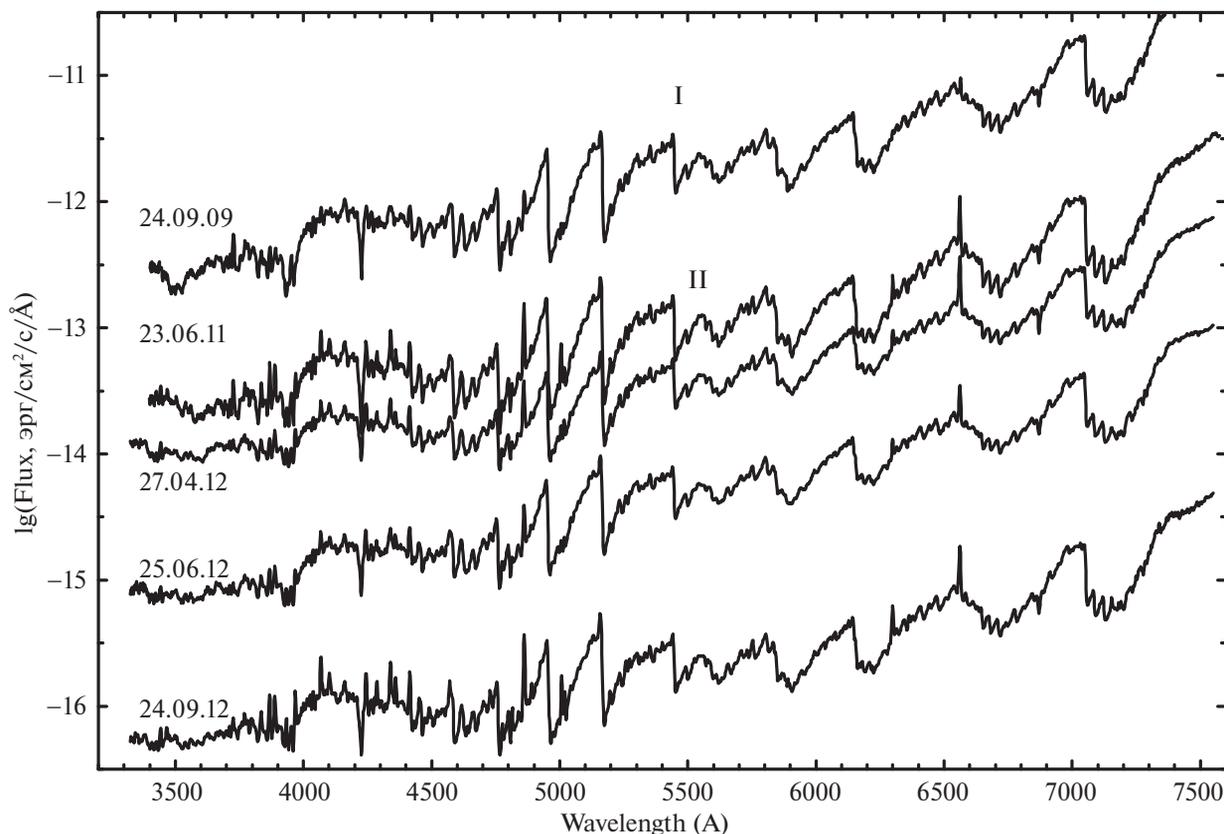


Рис. 2. Спектры для периода активности I и II. Ось X выражена в ангстремах, ось Y представляет потоки в логарифмическом масштабе. Спектры смещены относительно первого на постоянную величину.

4417 + [FeII]4416, FeII4584(38), FeII4924(42), FeII5018(42), FeII5198(49), FeII5235(49), FeII5276(49), FeII5317(49), запрещенные линии железа [FeII]4244, [FeII]4287, [FeII]5159, [FeII]5262. Помимо запрещенных линий железа в спектре выделяются запрещенные линии неона [NeIII]3869, серы [SII]4069, кислорода [OII]3727, [OIII]5007, а также присутствует слабая линия [OI]6300. Кроме того, в спектре наблюдаются абсорбционные линии холодного компонента Ca K 3934, CaI 4226.

Фаза II. Следующая фаза активности началась с медленного плавного увеличения блеска в конце 2010 г. (29.11.2010, JD2455529)—начале 2011 г. (25.04.2011, JD2455676). В течение года блеск (12.03.2012, JD2455998) в полосах *U*, *B*, *V* увеличился почти на 3 зв. величины (12.03.2012, JD2455998) и стал равным в полосах *U*, *B* около 8.5 зв. величин, в полосе *V* около 6.5 зв. величин, в полосе *R* около 5 зв. величин. Потом произошло ослабление блеска на 0.8 зв. величин во всех полосах, а затем снова блеск увеличился почти на эту же зв. величину (15.06.2012, JD2456093) через три месяца, образовав на кривой блеска двугорбый профиль.

Наши спектральные наблюдения, представленные на рис. 2, были получены во время медленного увеличения блеска 23.06.2011, во впадине 27.04.2012, почти в максимуме двугорбого профиля 25.06.2012 и после него 27.09.2012. Следует отметить, что характер распределения энергии в непрерывном спектре звезды такой же, как и в предыдущей фазе, доминирует излучение холодного компонента. Заметно усилились эмиссионные линии (рис. 2). Замечено, что в даты 27.04.2012 и 25.06.2012, т.е. во впадине и после нее на кривой блеска, значительно ослабела линия [OIII]5007 (рис. 2).

Фаза III. Следующее увеличение блеска звезды началось в конце 2012 г. (31.12.2012, JD2456292)—начале 2013 г. В это время система находилась вблизи периастра. Фаза орбитального периода 5689 сут была около 0.09, согласно эфемериде, вычисленной в работе Хинкл и др. (2009). Блеск после падения в предыдущей фазе достиг почти такой же величины. Кроме того, блеск в полосе *U* почти сравнялся с блеском в полосе *V*, около 7 зв. величины. Из рис. 1 видно, что изменение блеска в полосах *B* и *V* было почти симметричным и длилось по времени в два раза дольше, чем в

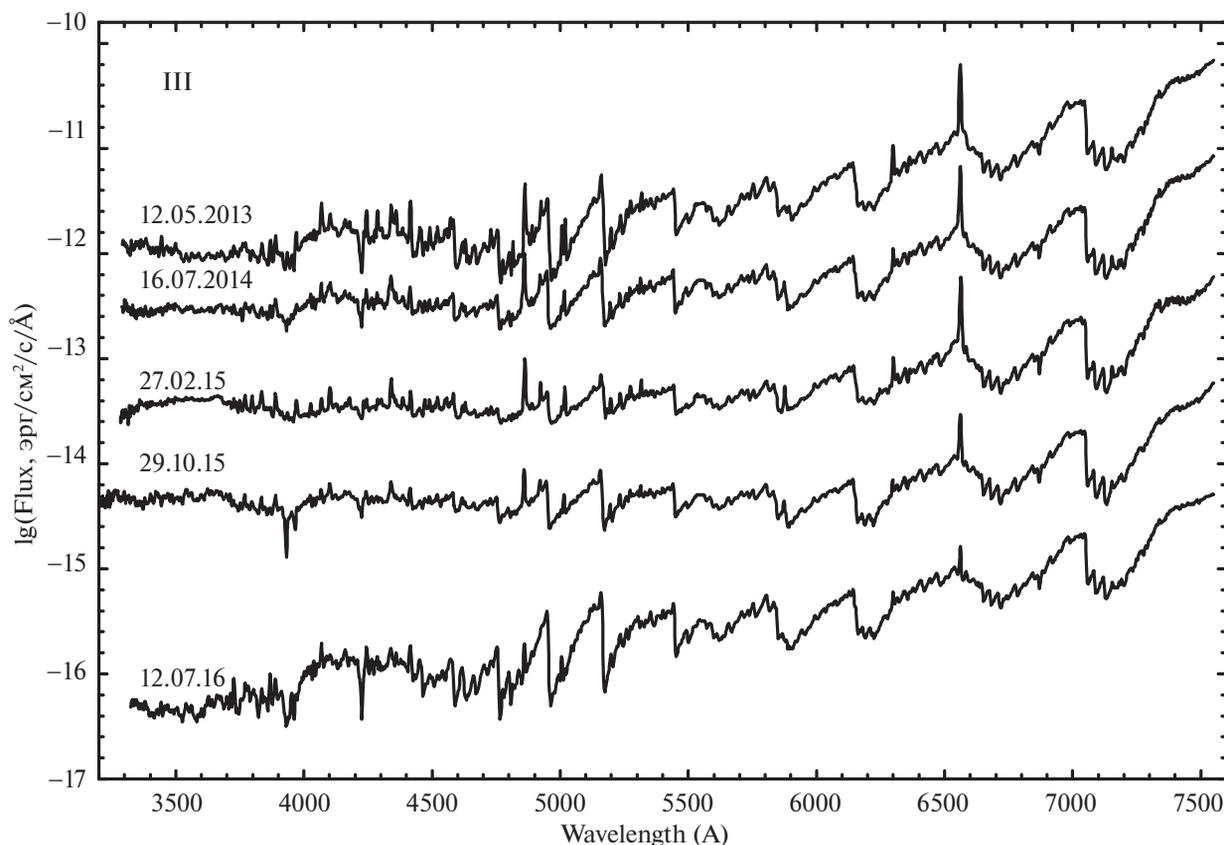


Рис. 3. Спектры для периода активности III (обозначение осей см. рис. 2).

полосе R , т.е. в полосе R мы в это время видим две “волны” вместо одной. На этой фазе активности после падения блеска произошло его резкое увеличение около даты 28.03.2016 (JD2457475) более чем на 1.5 зв. величины в полосе U , на 1 зв. величину в полосе B и в 0.5 зв. величин полосе V , а затем через 80–90 сут падение на такую же величину. Причем в полосе R увеличение блеска было незначительным, из-за разброса величин его падение почти не заметно.

Распределение энергии в непрерывном спектре до максимума блеска было таким же, как и в предыдущей фазе, доминирует излучение холодного компонента, присутствуют те же эмиссионные линии (рис. 3). Но близко к середине этого периода активности в синей области спектра увеличился поток излучения, менее глубокими стали молекулярные полосы TiO 4950, 6144 и появились линии HeI(5876, 6678). Следует отметить, что в спектрах, полученных после резкого увеличения блеска, продолжительность которого составляла около 90 сут, в даты с 27.06.2016 по 12.07.2016 опять доминирует излучение холодного компонента, т.е. спектр стал таким же, как и в предыдущей фазе активности.

На этой фазе активности (близко) и в максимуме блеска линии Бальмеровской серии водорода от

H11 до H β приобрели форму P Cyg профилей. На рис. 4 приведены характерные профили для линии H β . Из этого рисунка следует, что абсорбционные компоненты P Cyg профилей имели сложную структуру, которая могла меняться не только от ночи к ночи (с 18.08.2015 по 22.08.2015), но и в течение суток, например, в дату 21.08.2015. Лучевые скорости абсорбционных компонент находились в пределах от -800 км/с до -2000 км/с. Такое же поведение профилей линий было описано в работе Кондратьевой и др. (2017). Однако авторы этой работы получили максимальную лучевую скорость абсорбционных компонент выше: 3000 км/с.

Фаза IV. Последний период активности сопровождался хаотическими колебаниями блеска, а в максимуме произошло его резкое понижение близко к дате 21.06.2018 (JD2458290) более чем на 2.5 зв. величины в полосе U , на 2 зв. величины в полосах V и B , длительностью около 46 сут. В полосе R также наблюдалось ослабление блеска, но менее слабое, около 0.5 зв. величины. Так же как и в предыдущей фазе, блеск звезды в полосе U стал почти таким же: около 6 зв. величин, а в отдельные периоды даже превышал блеск в полосе V .

На этой фазе в спектрах появился Бальмеровский скачок (рис. 5), указывающий на увеличение

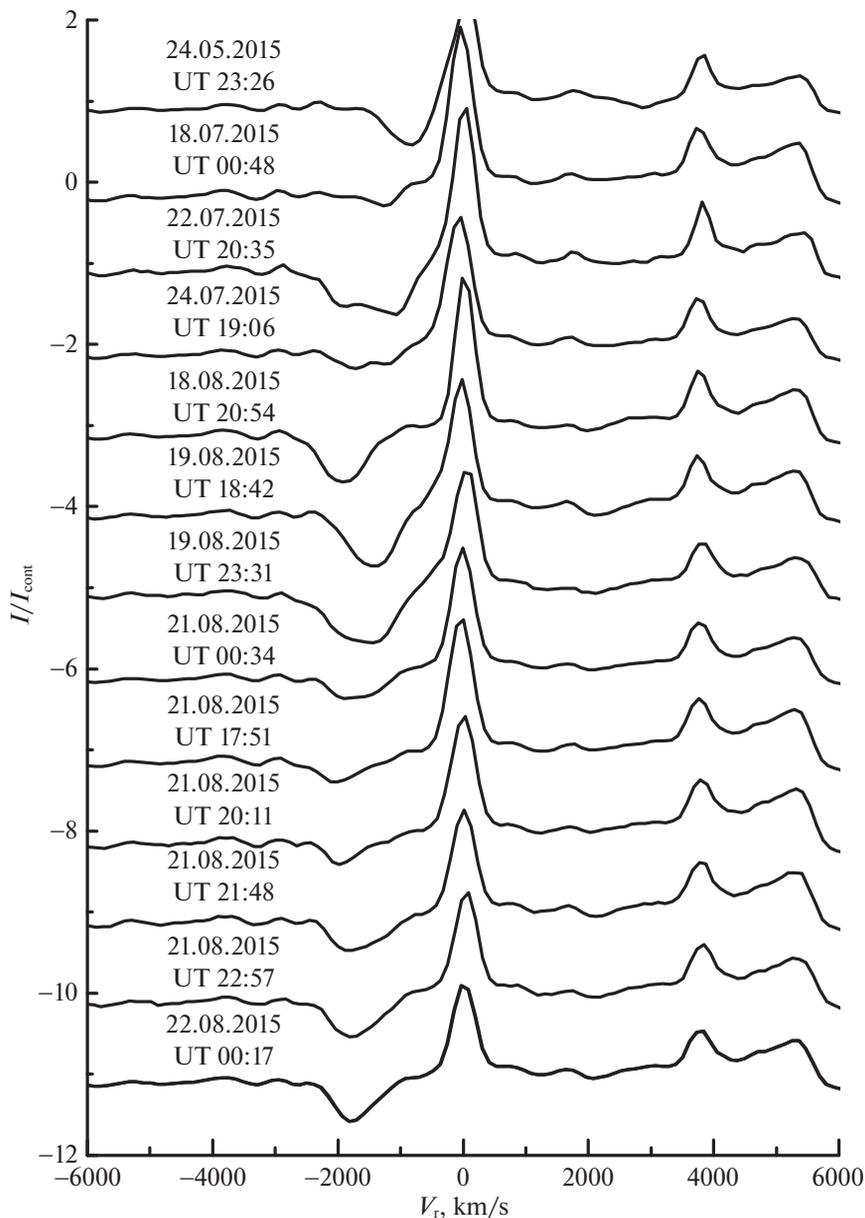


Рис. 4. Вариации профилей спектральной линии $H\beta$ в 2015 г. По оси Y даны нормированные интенсивности, по оси X — гелиоцентрические лучевые скорости в км/с.

вклада излучения от газовой туманности. Когда блеск звезды был близок к максимуму, в синей области спектра увеличился поток излучения и исчез Бальмеровский скачок.

На спектрах, полученных в начале и в конце V -образного падения блеска, спектр такой же, как и в максимуме блеска. На этой фазе активности, но еще до максимума блеска, в линиях Бальмеровской серии появились абсорбционные компоненты. На рис. 6 представлены вариации профиля линии $H\beta$. В отличие от предыдущей фазы, по нашим данным, абсорбционные компоненты были не таки-

ми глубокими, но максимальное значение лучевой скорости было близким к предыдущей фазе: около 2000 км/с (28.08.2017). Р Суг профили линии $H\beta$ наблюдались при входе (21.06.2018, JD2458291) и после выхода (21.07.2018, JD2458321) из V образной впадины на кривой блеска. По форме Р Суг профили отличаются от тех, что наблюдались ранее и, кроме того, имеют меньшую лучевую скорость: около 300 км/с. Из рис. 6 следует, что в это время значительно уменьшилась и интенсивность линии $H\beta$.

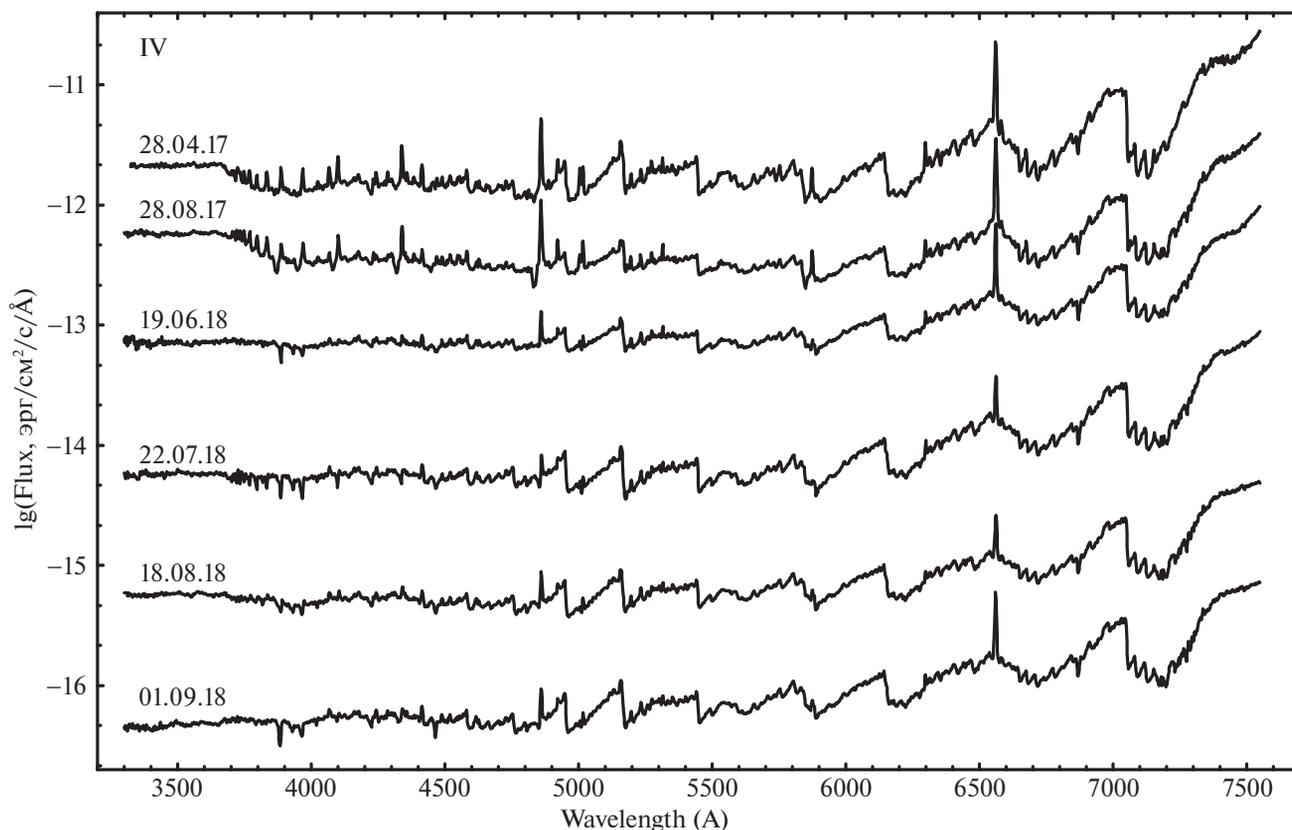


Рис. 5. Спектры для периода активности IV (обозначение осей см. рис. 2).

ПЕРЕМЕННОСТЬ ПОТОКОВ В НЕКОТОРЫХ ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ И ГЛУБИНЫ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛОС TiO

Из спектрофотометрических наблюдений мы определили потоки в некоторых наиболее сильных спектральных линиях за весь период наблюдений и исследовали, как они коррелируют с кривой блеска в полосе U . Потоки в этих линиях представлены в табл. 2 и на рис. 7. Это линии $H\alpha$, $H\beta$, [SII]4069, [OIII]5007, [OI]6300, FeII 4924, 5018, HeI 5876. Там же представлена кривая блеска в полосе U . Переменность потоков в спектральных линиях в предыдущие годы исследовалась в работах Ииджима (2019), Бурмейстер и Леедярв (2009). В работе Кондратьевой и др. (2017), в которой исследовалась активность звезды в 2014–2015 гг., были получены потоки почти в тех же спектральных линиях, что и наши. На рис. 7 незаполненными кружками показаны потоки, взятые из этой работы. Как видно из рис. 7, наилучшее совпадение мы получили для линий $H\beta$ и [OI] 6300. Наибольшее различие в потоках в линии $H\alpha$ наблюдается в максимуме. Максимальное значение потоков в этой линии по нашим данным около 500×10^{-12} эрг/см²/с, а в работе Кондратьевой и др.

(2017) потоки получены в пределах $(330-850) \times 10^{-12}$ эрг/см²/с. Кроме того, не совпадают максимумы потоков в линии FeII 4924. Потоки в линии [OIII]5007 мы не привели на рис. 7, так как они значительно отличаются от наших в максимуме более, чем в три раза.

Из рис. 7 следует, что потоки в разрешенных линиях $H\alpha$, $H\beta$, FeII 4924, 5018, HeI 5876 имеют два максимума. Максимум потоков в линиях FeII 4924 и 5018 имеют острый пик с заметными осцилляциями и практически совпадает с максимумами потоков в бальмеровских линиях. Максимумы потока в линии HeI 5876 выглядят почти также, как максимум потока в линиях железа. Видно, что первый максимум потока в разрешенных линиях достигается в максимуме блеска в полосе U , а второй, по-видимому, близко к максимуму. К сожалению, у нас отсутствуют данные о потоках в максимуме блеска в 2018 г.

В запрещенных линиях, за исключением линии [OIII]5007, второй максимум либо слабо выражен, как у линии [SII]4069, либо отсутствует, как у линии [OI]6300. Отметим, что первый максимум в запрещенных линиях смещен относительно максимума блеска, в отличие от разрешенных линий,

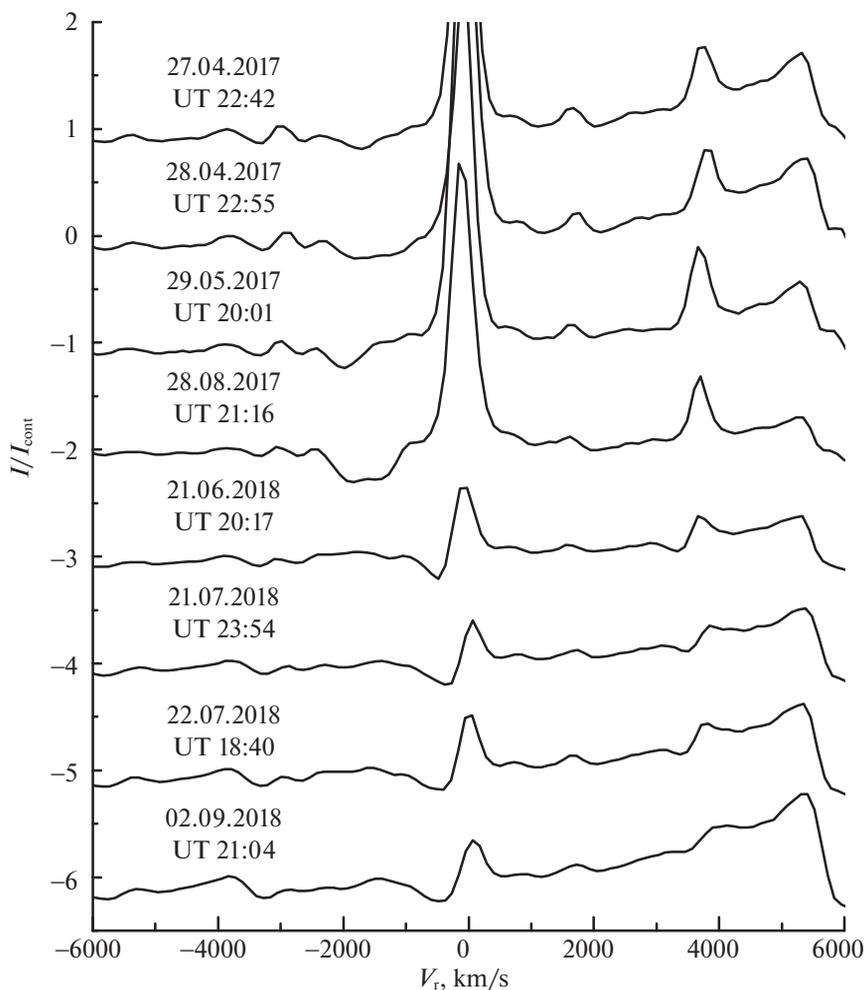


Рис. 6. Вариации профилей спектральной линии $H\beta$ в 2017–2018 гг. (обозначение осей см. рис. 4).

и наблюдался до того, как блеск начал увеличиваться. Второй максимум потока совпадает с максимумом потока в разрешенных линиях. Поток в линии $[SII]4069$ имеет большой разброс значений в период активности в 2017–2018 гг. Разброс значений потоков в линиях, скорее всего, связан с тем, что из-за появления абсорбционных компонент в профилях разрешенных линий точнее определить потоки с нашим разрешением не получилось. На рисунке на кривой блеска вертикальными черточками указаны даты, когда мы наблюдали глубокие абсорбционные компоненты в профилях линий.

В работе Бурмейстер и Леедярв (2009) были измерены потоки в линиях $H\alpha$, $H\beta$, $[OIII]5007$, $[OI]6300$ в активный и спокойный периоды звезды с 1996 по 2007 г. Авторы показали, что поток в линиях $H\alpha$, $H\beta$, $[OI]6300$ коррелирует с блеском. Поток же в линии $[OIII]5007$ явного максимума не показал, наблюдался большой разброс значений.

Если предположить, что модуляция блеска в

полосе R обусловлена пульсациями красного гиганта, то должна наблюдаться зависимость между глубиной молекулярных полос TiO и блеском. Мы определили глубину молекулярных полос титана $TiO 6144$ и 7125 . На рис. 8 представлены изменения этого параметра в зависимости от юлианской даты. Римскими цифрами обозначены условные периоды активной фазы. Корреляция глубины полос и блеска просматривается во всех выделенных эпизодах активной фазы, за исключением третьего. Скорее всего, поскольку звезда наиболее активна в этот период, глубина молекулярных полос замывается излучением от активного компонента системы. Связь между блеском и глубиной полос можно объяснить, если принять, что с расширением звезды во время пульсаций (блеск увеличивается) температура падает и глубина молекулярных полос увеличивается, а когда звезда сжимается, температура повышается и уменьшается глубина молекулярных полос.

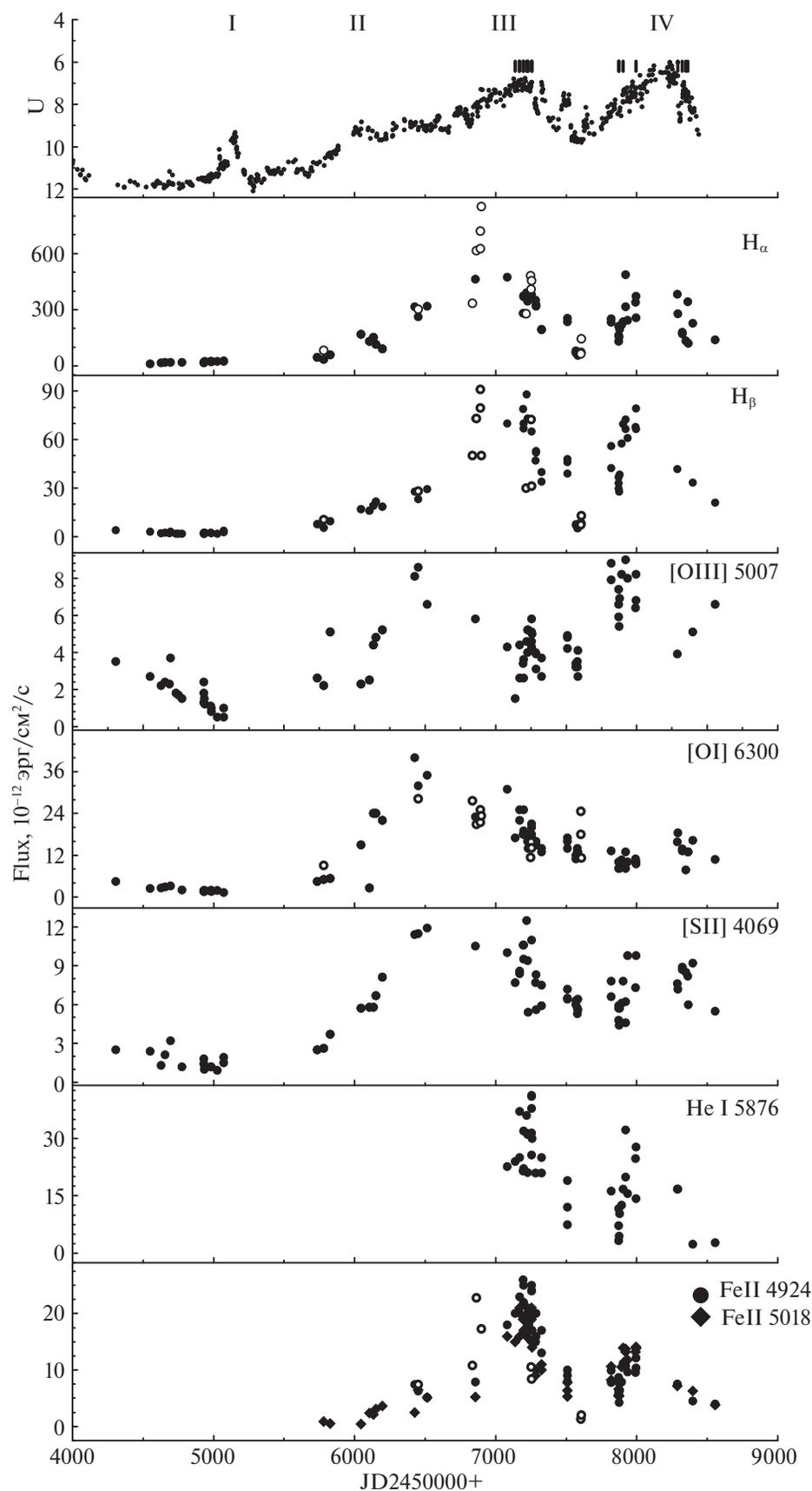


Рис. 7. Кривая блеска в полосе U и переменность абсолютных потоков излучения в некоторых эмиссионных спектральных линиях с 2008 по 2019 г. По оси Y даны абсолютные потоки в единицах 10^{-12} эрг/см²/с, по оси X — JD-2450000.

Таблица 2. Абсолютные потоки излучения в эмиссионных линиях, 10^{-12} эрг/см²/с

Дата	[SII]4069	H β	FeII54924	[OIII]5007	FeII5018	HeI5876	[OI]6300	H α
26.07.2007	2.5	4		3.5			4.4	
23.03.2008	2.4	3		2.7			2.4	11.8
08.06.2008	1.3	2.1		2.2			2.5	17.3
06.07.2008	2.1	2.5		2.4			2.9	20.1
15.08.2008	3.2	3.1		3.7			3.2	19.2
03.11.2008	1.2	1.9		1.5			2	20
07.04.2009	1.4	1.7		1.8			1.7	17.4
08.04.2009	1.4	2.5		2.4			1.5	17.8
10.04.2009	1.8	1.7		1.3			1.8	19.4
11.04.2009	1	1.8		1.5			1.6	19.4
15.04.2009	1.1	2.3		1.2			1.8	25.3
28.05.2009	1.2	2.3		1.1			1.9	25.7
30.05.2009	1.2	2.2		1			1.5	23.6
31.05.2009	1.2	2.1		0.8			1.9	22.5
13.07.2009	0.9	1.7		0.5			1.8	25.8
28.08.2009	1.5	2.6		0.5			1.2	25.4
28.08.2009	1.9	3.7		1			1.3	26.7
23.06.2011	2.5	7.6		2.6	0.9		4.4	46
06.08.2011	2.6	5.4		2.2	0.5		5	36
21.09.2011	3.7	9.6		5.1	0.4		5.3	60
27.04.2012	5.7	17		2.3	2.4		15	169
25.06.2012	5.8	16		2.5	2.1		2.5	131
24.07.2012	5.8	19		4.4	3.1		24	154
10.08.2012	6.7	21.5		4.8	3.6		24	117
24.09.2012	8.1	18.4		5.2	2.5		22	93
12.05.2013	11.4	24.5	7.4	8.1	6.5		40	316
05.06.2013	11.5	23.1	6.3	8.6	5.1		32	264
09.08.2013	11.9	249	5.1	6.6	5.2		35	318
16.07.2014	10.5	57	7.9	5.8	11.6		23	463
27.02.2015	10	62	18	4.3	16	22.7	31	474
24.04.2015	7.7		20	1.5	15	24	17	
25.05.2015	8.6		20	2.6	16	25	22	
26.05.2015	8.4		23	4.4	21	37	25	

Таблица 2. Продолжение

Дата	[SII]4069	H β	FeII54924	[OIII]5007	FeII5018	HeI5876	[OI]6300	H α
21.06.2015	10.6	80	26	3.4	19	21.5	18	282
22.06.2015	9.5	82	22	3.6	17	22.1	19	370
23.06.2015	10.6	70	25	2.6	19	31.9	25	375
17.07.2015	12.5	88	17	4.6	16	36	18	392
22.07.2015	+		19	5.2	20	31	16	
23.07.2015	9.4	77	21	4	17	21.1	17	346
24.07.2015	5.4		20	5.2	18	31.3	14	
18.08.2015	+		25	4.3	21	41.3	18	
19.08.2015	+		24		21	37.9	17	
20.08.2015	11	65	20	5.1	20	41	21	381
21.08.2015	+		17	4.6	15	31.4	16	
18.09.2015	7.7	47	15	4.0	9	21	15	350
19.09.2015	5.6	53	16	3.9	10	+	15	328
20.09.2015	8.3	52	20	3.1	10	+	16	320
29.10.2015	7.5	40	17	3.7	11	21	14	193
30.10.2015	5.9	34	13	2.7	10	25	13	195
28.04.2016	6.4	48	10	4.8	7.8	19	16	254
30.04.2016	7.2	46	9	4.9	6.4	12	14	235
01.05.2016	6.5	39	8	4.2	5.3	7.4	17	235
27.06.2016	6	7.8	+	3.2	+		12	70
29.06.2016	6.3	7.1	+	3.4	+		11	82
08.07.2016	5.7	6.3	+	3.5	+		13	71
09.07.2016	5.3	5.2	+	3.2	+		14	62
11.07.2016	6.4	5.1	+	2.7	+		13	66
12.07.2016	5.6	7.4	+	4.1	+		12	56
05.03.2017	7.8	55.9	9.9	8.8	10.6	16.2	13.2	252
06.03.2017	6.6	42.5	7.8	7.9	8.2	16.2	13.2	234
27.04.2017	4.8	36.8	8.7	7.4	6.6	11.6	10	211
27.04.2017	5.7	33	8.1	5.9	5.6	7.2	10	165
28.04.2017	5.9	29.6	6.1	6.6	5.4	3.2	8.2	133
29.04.2017	4.4	27.7	4.2	5.4	5.4	4.5	8.2	155
04.05.2017	5.7	38.4	6.4	6.9	7.5	10.3	8.3	195
19.05.2017	6.1	57.7	7.9	8.2	10.5	12.6	10.6	219

Таблица 2. Окончание

Дата	[SII]4069	H β	FeII54924	[OIII]5007	FeII5018	HeI5876	[OI]6300	H α
29.05.2017	7.8	69.6	11.2	11.5	13.9	16.7	10.1	235
14.06.2017	4.6	66.5	11.6	9	13.2	19.9	8.2	315
16.06.2017	6.2	72.4	10.7	10.6	13.7	32.2	13	488
01.07.2017	9.8	61	9.7	8	11.8	15.6	10	245
26.08.2017	7.3	67.7	9.6	6.4	13.2	24.8	11	339
27.08.2017	9.8	79.1	12.1	8.2	14.1	27.7	10.1	373
28.08.2017		66.5	10.4	6.8	13.8	14.3	9.5	257
24.04.2018	4.8	33.9	7.1	1.7	5.8	9.7	6.4	153
19.06.2018	7.6	41.9	7.5	3.9	7.17	16.7	15.8	383
07.10.2018	9.2	33.5	4.5	4.6	6.3	2.3	16.2	227
13.03.2019	5.5	21	4	6.0	3.8	2.8	10.8	140

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАБЛЮДАЕМОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Моделируя наблюдаемое распределение энергии, мы можем определить физические параметры компонент симбиотической звезды SN Sng, исследовать, как они меняются, когда система переходит в активное состояние, а следовательно, предложить механизм, ответственный за активность звезды. Для построения синтетического распределения энергии в спектре звезды использовалась модель, предложенная Скопал (2005). В этой модели в оптических длинах волн можно выделить три основных компонента излучения. Два из них имеют звездную природу. Это холодный компонент, в частности, красный гигант, и горячий компонент. Третий компонент — это газовая составляющая (туманность), сосредоточенная в окрестности двойной системы.

В активном состоянии в симбиотической звезде вокруг белого карлика формируется пространственно расширяющийся нейтральный диск. Таким образом, горячий компонент имеет дископодобную структуру. В случае, когда такая система видна для наблюдателя с “ребра” (угол наклона орбиты около 90°), расширяющийся оптически толстый внешний край диска имитирует теплую псевдофотосферу. Излучение от центрального горячего источника переносится в диске, переизлучается в оптически толстой/тонкой оболочке, формируя на прямой видимости теплую псевдофотосферу с более низкой температурой (1–2) $\times 10^4$ К. В то же время газовая составляющая (туманность) выше и

ниже диска ионизируется непосредственно горячим источником (Скопал, 2005, рис. 27).

Вклад от теплой псевдофотосферы в данной модели мы аппроксимировали излучением абсолютно черного тела с некоторой температурой, вклад от туманности — излучением водородной плазмы. Таким образом, согласно этой модели, излучение, регистрируемое на Земле от симбиотической звезды в оптическом диапазоне, можно представить выражением

$$F(\lambda) = \mathcal{F}_\lambda(T_{\text{eff}}) + \theta_{\text{warm}}^2 \pi B_\lambda(T_{\text{warm}}) + k_N \varepsilon_\lambda(T_e), \quad (1)$$

где $\mathcal{F}_\lambda(T_{\text{eff}})$ — синтетический спектр красного гиганта, рассчитанный по моделям из работы Флакк (1994), $\theta_{\text{warm}} = R_{\text{warm}}^{\text{eff}}/d$ — угловой радиус теплой псевдофотосферы, определяемый как отношение ее эффективного радиуса $R_{\text{warm}}^{\text{eff}}$ (радиус сферы с той же светимостью) к расстоянию d до объекта. Для SN Sng мы взяли $d = 250$ пк (Хинкл и др., 2009). Третье слагаемое в уравнении — это излучение от газовой оболочки, которое выражено через некоторый масштабированный коэффициент объемной эмиссии $\varepsilon_\lambda(H, T_e)$, $k_N = EM/4\pi d^2$, где EM — мера эмиссии газовой оболочки.

Подгоняя поток излучения, полученный из данного уравнения (1), к наблюдаемому спектру, мы можем определить основные параметры компонент симбиотической звезды, а именно, спектральный тип гиганта или его эффективную температуру, чернотельную температуру, эффективный радиус и светимость теплой псевдофотосферы, а также

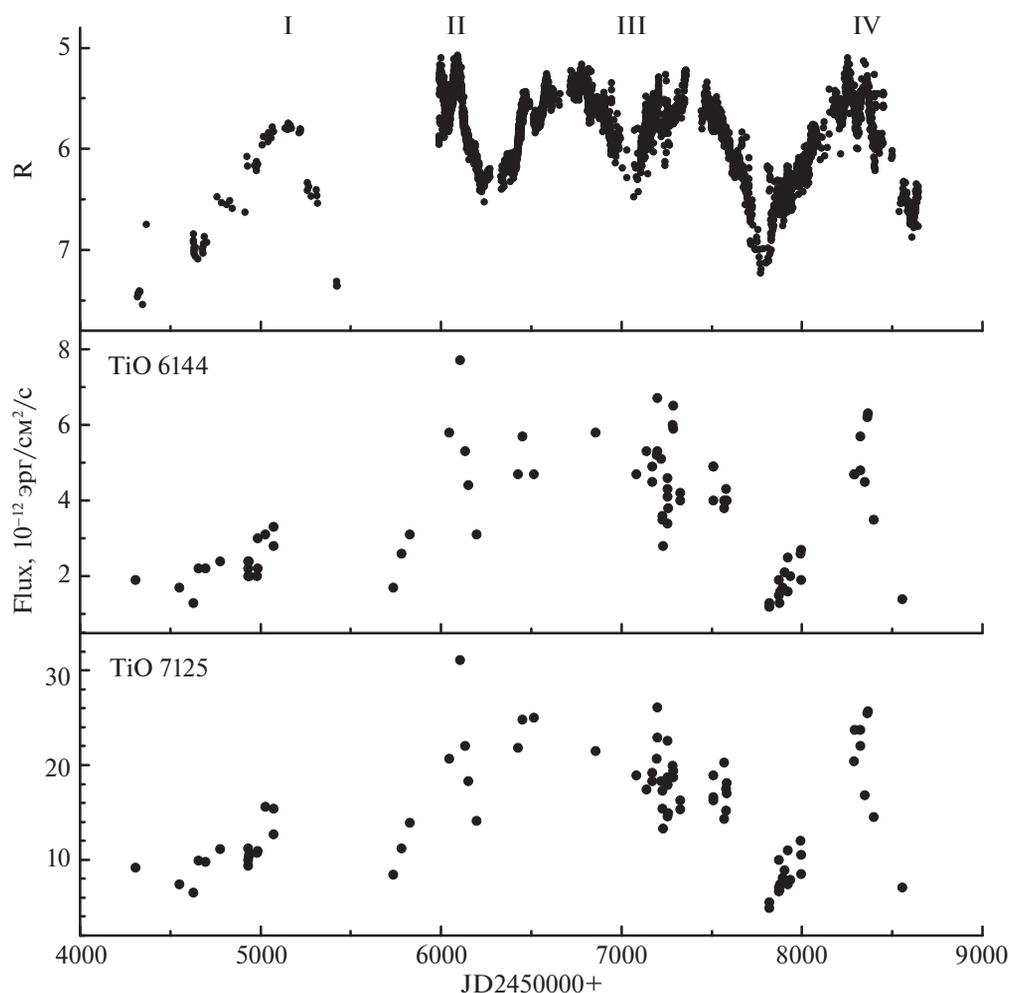


Рис. 8. Кривая блеска в полосе R и глубины молекулярных полос TiO 6144, 7125 с 2008 по 2019 г. (обозначение осей см. рис. 7).

электронную температуру и меру эмиссии водородной оболочки. Для подгонки использовался критерий χ^2 . Соответствующие параметры представлены в табл. 3, а примеры модельного и наблюдаемого распределения энергии — на рис. 9. Следует отметить, что параметры $R_{\text{warm}}^{\text{eff}}$, L_{warm} и EM в табл. 3 определены для расстояния $d = 250$ пк.

Согласно моделям SED (спектральное распределение энергии), CN Sgr была неактивна с 2008 г. до середины 2011 г. (период I на кривой блеска). В течение этого периода в наблюдаемом спектре, согласно нашему моделированию, присутствовал исключительно спектр красного гиганта спектрального типа M8 III, согласно синтетическим спектрам Флакс (1994).

В течение следующего периода, вплоть до августа 2013 г. (период II на кривой блеска), теплая псевдофотосфера была небольшого размера $R_{\text{warm}}^{\text{eff}} \sim 0.5\text{--}1.5 R_{\odot}$ и имела относительно слабую

светимость. Ее температура составляла $T_{\text{warm}} \sim 6500\text{--}11\,000$ К. Излучение от газовой оболочки было слабым и не всегда регистрировалось.

Через год, начиная с июля 2014 г., вклады в излучение от теплой псевдофотосферы и газовой оболочки значительно увеличились (период III на кривой блеска). Светимость L_{warm} увеличилась в $\sim 5\text{--}10$ раз, а радиус $R_{\text{warm}}^{\text{eff}}$ в ~ 3 раза при той же температуре T_{warm} . Одновременно увеличилась, более чем в 4 раза, и была переменной мера эмиссии EM газовой оболочки. В минимуме блеска между 2016.41 и 2016.64 вклад излучения в спектр от теплой псевдофотосферы заметно понизился ($L_{\text{warm}} = 4.0 L_{\odot}$, $R_{\text{warm}}^{\text{eff}} = 1.10 R_{\odot}$), а от газовой оболочки исчез (спектр с 12 июля 2016 г.).

Наконец, в последний период (период IV на кривой блеска) увеличился вклад в излучение, как от теплой псевдофотосферы, так и от газовой оболочки, достигнув максимума в конце апреля

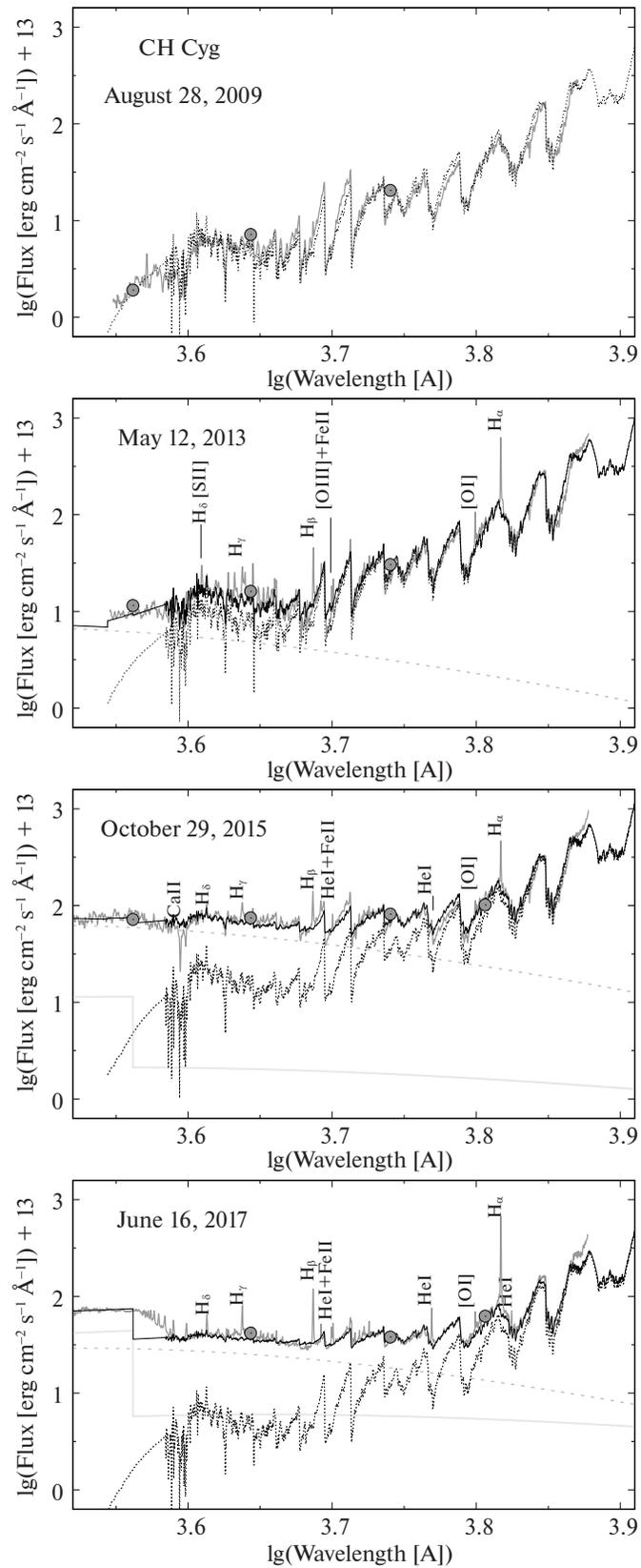


Рис. 9. Эволюция наблюдаемого и теоретического распределения энергии в спектре симбиотической звезды CH Cyg. Наблюдаемый спектр изображен сплошной темно-серой линией, модельное распределение энергии — черной сплошной линией, спектр холодного компонента — короткой черной пунктирной линией, спектр теплой псевдофотосферы — длинной серой пунктирной линией, а спектр туманности — сплошной светло-серой линией. Заполненными кружками показаны потоки, соответствующие фотометрическим наблюдениям в полосах U , B , V и R_c .

Таблица 3. Параметры симбиотической системы CN Cyg, полученные из моделирования наблюдаемого распределения энергии

Дата, год/мес/день	JD 2 450 000+	Гигант	Псевдофотосфера			Туманность		$\chi^2_{\text{red}}/\text{d.o.f.}$
		ST	$L_{\text{warm}},$ L_{\odot}	$R_{\text{warm}}^{\text{eff}},$ R_{\odot}	$T_{\text{warm}}, \text{K}$	T_e, K	$EM,$ 10^{58}cm^{-3}	
2008/03/23	4548.526	7.9	—	—	—	—	—	6.8/1800
2008/06/08	4626.305	7.7	—	—	—	—	—	7.9/2040
2008/07/06	4654.350	8.0	—	—	—	—	—	7.5/2050
2008/08/10	4689.284	8.1	—	—	—	—	—	7.7/1990
2008/09/25	4734.518	8.2	—	—	—	—	—	8.0/2003
2009/05/31	4983.314	8.0	—	—	—	—	—	6.1/2080
2009/08/28	5072.458	7.9	—	—	—	—	—	4.7/2176
2009/09/24	5099.246	7.9	—	—	—	—	—	4.3/2190
2011/06/23	5736.458	7.8	0.86	0.38	9000	—	—	3.3/1989
2011/08/06	5780.428	7.8	1.10	0.48	8500	—	—	5.0/2091
2012/04/27	6045.424	7.9	6.43	0.94	9500	—	—	3.7/2203
2012/06/25	6104.417	7.9	4.55	1.68	6500	20 000	1.12	5.1/1993
2012/07/24	6133.301	7.9	3.63	0.78	9000	20 000	0.75	3.7/1947
2012/08/10	6150.361	7.9	7.21	1.83	7000	20 000	0.75	3.0/1981
2012/09/24	6195.372	7.8	3.84	0.72	9500	—	—	3.1/2094
2013/05/12	6424.546	7.9	5.90	0.81	10 000	—	—	3.4/1937
2013/06/05	6449.313	7.7	4.32	0.57	11 000	—	—	3.7/1987
2013/08/09	6514.334	7.8	4.61	0.65	10 500	—	—	4.7/1978
2014/07/16	6855.453	7.7	22.60	1.67	9750	20 000	1.12	2.7/2170
2015/02/27	7080.563	7.9	27.32	2.73	8000	20 000	3.92	1.5/1866
2015/04/24	7137.459	7.9	28.47	2.78	8000	20 000	5.94	1.8/2066
2015/05/26	7169.386	7.9	52.79	4.31	7500	20 000	8.97	1.4/1942
2015/07/23	7227.327	7.8	46.08	3.06	8600	20 000	8.23	2.4/2009
2015/08/18	7253.367	7.5	50.32	2.62	9500	20 000	8.55	3.4/1940
2015/08/21	7256.462	7.5	47.63	3.19	8500	20 000	7.10	3.0/2010
2015/10/29	7325.194	7.6	57.55	2.87	9400	20 000	3.22	2.3/2150
2016/04/28	7507.452	7.7	26.94	4.10	6500	20 000	4.94	1.8/2195
2016/07/12	7582.421	7.9	4.00	1.10	7800	—	—	5.4/2106
2017/04/28	7872.463	7.7	23.80	2.42	8200	18 000	5.46	5.7/1954
2017/06/16	7921.375	7.8	29.32	2.50	8500	16 000	9.57	2.0/1984
2017/08/28	7994.395	7.8	38.80	2.95	8400	17 500	10.09	2.2/1949
2018/04/24	8233.398	8.0	88.14	6.77	6800	20 000	6.71	1.7/2225
2018/06/21	8291.353	7.9	84.34	3.40	9500	20 000	2.62	1.8/1835
2018/09/02	8364.385	7.3	36.70	2.87	8400	—	—	5.7/2075
2018/10/07	8395.350	7.8	28.64	4.10	6600	—	—	1.7/2198

2018 г. Мы получили светимость и радиус тепловой псевдофотосферы, равные $L_{\text{warm}} = 88.14 L_{\odot}$ и $R_{\text{warm}}^{\text{eff}} = 6.77 R_{\odot}$ соответственно. Мера эмиссии газовой оболочки составила $EM \sim 7 \times 10^{58} \text{ см}^{-3}$ (24 апреля 2018 г.). Последний спектр, взятый нами после максимума, показал уменьшение вклада в излучение от теплой псевдофотосферы, а излучение от газовой оболочки не было обнаружено.

Используя соотношение $L_{\text{acc}} = GM_{\text{warm}}\dot{M}_{\text{acc}}/R_{\text{warm}}$, можно оценить темп аккреции $\dot{M}_{\text{acc}} \sim 4.7 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ для массы белого карлика, равной $M_{\text{WD}} = 0.6 M_{\odot}$ (Хинкл, 2009), и его радиуса $R_{\text{WD}} = 0.01 R_{\odot}$, который соответствует светимости $L_{\text{warm}} = L_{\text{acc}} = 90 L_{\odot}$.

Следует отметить, что в течение всего периода наблюдений, в целом, излучение от теплой псевдофотосферы и газовой оболочки коррелировало с изменением блеска звезды в U - и B -диапазонах (рис. 1).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя полученные нами на протяжении почти десятилетнего периода спектрофотометрические наблюдения симбиотической звезды СН Суг, мы установили, что за исследуемый период она была наиболее активной в 2015 и 2018 г. В эти периоды у звезды наблюдались похожие признаки активности. Отмечалось увеличение потока излучения в непрерывном спектре и в эмиссионных линиях, причем максимумы потоков в разрешенных линиях совпадали с максимумом блеска в полосе U , а в запрещенных линиях максимумы потока наблюдались до того, как блеск звезды стал максимальным.

Кроме того, до и в максимуме блеска линии Бальмеровской серии водорода от $H11$ до $H\beta$ приобрели форму P Суг профилей. Показано, что абсорбционные компоненты P Суг профилей имели сложную форму, которая могла меняться не только от ночи к ночи (с 18.08.2015 по 22.08.2015), но и в течение суток. Лучевые скорости абсорбционных компонент находились в пределах от -300 км/с до -2000 км/с .

Сделано заключение, что первый период активности звезды связан с положением компонент в системе, которые находились в это время в периастре. Фаза орбитального периода 5689 сут была в пределах от 0.95 до 0.05. В 2018 г. звезда занимала другое положение, была вне периастра, фаза орбитального периода 5689 сут была около 0.2. Однако в этот период звезда проявила себя не менее активно. Мы предположили, что такая

высокая активность звезды в этот период дополнительно поддерживалась еще и пульсациями холодного компонента двойной системы. Пульсации холодного компонента дополнительно поставляли вещество в двойную систему, которое, аккрецируя на белый карлик, усиливало его активность.

Предположение о том, что период 750 сут может быть периодом пульсаций, подкрепляется существованием корреляции между молекулярными полосами $\text{TiO } 6144$ и 7125 и блеском звезды в полосе R . Кроме того, пульсации холодного компонента могли подпитывать некоторую активность звезды в периоды, когда она была близка к периастру, но не находилась в этом положении в 2009 и в 2012 г. Есть основание считать, что это возможно, если принять, что период 750 сут является периодом пульсаций холодного компонента, и максимальная амплитуда пульсаций достигается на фазе около 0.5. Действительно, фаза периода 750 сут в максимумах блеска в полосе R в 2009, 2012, 2015 и в 2018 г. была около 0.5, 0.6, 0.42 и 0.6, а в минимуме — 0.84, 0.97, 0.09.

Модельное распределение энергии показало, что в спокойном состоянии в спектре преобладало излучение от холодного компонента — гиганта спектрального типа $MIII$ 8. В активном состоянии в системе развилась теплая псевдофотосфера вокруг белого карлика, в результате по мере роста блеска симбиотической звезды радиус и светимость ее увеличились в десятки раз, достигнув в 2018 г. $R_{\text{WD}} = 6.77 R_{\odot}$, $L_{\text{WD}} = 88.14 L_{\odot}$. Показано, что относительно низкая светимость псевдофотосферы СН Суг указывает на то, что источником активности звезды является аккреция. Исходя из значения светимости оценен темп аккреции на белый карлик, равный $\dot{M}_{\text{acc}} \sim 4.7 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$.

Данное исследование было поддержано грантом Словацкой академии наук VEGA No. 2/0030/21 и грантом Словацкого научно-исследовательского агентства по развитию по контракту No. APVV-15-0458.

Мы выражаем благодарность всем наблюдателям переменных звезд, которые внесли вклад в создание всемирной базы данных AAVSO, за использование их наблюдений в нашей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурнашев В.И., Бюлл. Абастуманск. астрофиз. обсерв. **59**, 83 (1985).
2. Бурмейстер, Леедярв (M. Burmeister and L. Leedjarv), *Astron. Astrophys.* **504**, 171 (2009).
3. Ииджима (T. Iijima), *MNRAS* **297**, 77 (1998).

4. Ииджима (T. Iijima), *Astron. Astrophys.* **622**, 45 (2019).
5. Кенеон, Фернандез-Кастро (S.J. Kenyon and T. Fernandez-Castro), *Astron. J.* **93**, 938 (1987).
6. Кондратьева Л.Н., Рспаев Ф.К., Кругов М.А., Серебрянский А.В., *Астрофизика* **60**, 169 (2017).
7. Мукаи и др. (K. Mukai, J.A. Kennea, G.J.M. Luna, and J.L. Sokoloski), *Astron. Telegram* 2245 (2009).
8. Секерас и др. (M. Sekeras, A. Skopal, S. Shugarov, N. Shagatova, E. Kundra, R. Komzik, M. Vrastak, S.P. Peneva, E. Semkov, and R. Stubbings), *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* **49**, 19 (2019).
9. Скопал (A. Skopal), *Inf. Bull. Var. Stars* **415** (1995).
10. Скопал и др. (A. Skopal, M.F. Bode, and M. Bryce), *MNRAS* **282**, 327 (1996).
11. Скопал и др. (A. Skopal, M.F. Bode, M.M. Crocker, H. Drechsel, S.P.S. Eyres, and R. Komzik), *MNRAS* **335**, 1109 (2002).
12. Скопал (A. Skopal), *Astron. Astrophys.* **440**, 995 (2005).
13. Скопал и др. (A. Skopal, M. Vanko, T. Pribulla, D. Chochol, E. Semkov, M. Wolf, and A. Jones), *Astron. Nachr.* **328**, 909 (2007).
14. Скопал и др. (A. Skopal, S. Shugarov, and D. Chochol), *Astron. Telegram* 2394 (2010).
15. Скопал и др. (A. Skopal, S. Shugarov, and M. Vanko), *Astron. Nachr.* **333**, 242 (2012).
16. Тейлор и др. (A.R. Taylor, E.R. Seaquist, and J.A. Mattei), *Nature* **319**, 38 (1986).
17. Флакс и др. (M.A. Fluks, B. Plez, P.S. The, D. de Winter, B.E. Westerlund, and H.C. Steenman), *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* **105**, 311 (1994).
18. Хинкл и др. (K. Hinkle, H. Kenneth, and F. Fekel), *Astron. J.* **105**, 107 (1993).
19. Хинкл и др. (K. Hinkle1, F. Fekel, and R. Joyce), *Astrophys. J.* **692**, 1360 (2009).
20. Шугаров и др. (S. Shugarov, A. Skopal, and M. Sekeras), *EAS* **71**, 107 (2015).
21. Ямашита, Маехара (M. Yamashita and H. Maehara), *Publ. Astron. Soc. Japan* **31**, 307 (1979).