

СПЕКТР ЖЕЛТОЙ СИМБИОТИЧЕСКОЙ ЗВЕЗДЫ LT ДЕЛЬФИНА ДО, ВО ВРЕМЯ И ПОСЛЕ ВСПЫШКИ 2017 года

© 2019 г. Н. П. Иконникова^{1*}, М. А. Бурлак¹, В. П. Архипова¹, В. Ф. Есипов¹

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

Поступила в редакцию 28.01.2019 г.; после доработки 28.01.2019 г.; принята к публикации 29.01.2019 г.

LT Del — желтая симбиотическая система, состоящая из яркого гиганта спектрального класса K3 и горячего субкарлика с температурой около 10^5 К. Приводятся результаты спектральных наблюдений LT Del за период 2010–2018 гг. В 2017 г. звезда испытала вторую в истории исследований малоамплитудную ($\Delta V \sim 0.^m7$) вспышку. Эмиссионный спектр звезды, представленный в оптическом диапазоне линиями водорода, нейтрального и ионизованного гелия, во вспышке претерпел существенные изменения. Потoki в эмиссионных линиях H I и He I увеличились в 5–6 раз, линия ионизованного гелия He II $\lambda 4686$ возросла в 10 раз. Во вспышке 2017 г. температура возбуждающей звезды, по нашим оценкам, повысилась до $T_{\text{hot}} \sim 130\,000$ К, тогда как во время первой вспышки 1994 г. изменение температуры было незначительным, что позволяет говорить о холодных и горячих вспышках LT Del по аналогии с подобными событиями другой желтой симбиотической звезды AG Dra.

Ключевые слова: симбиотические звезды, двойные системы, спектральные наблюдения.

DOI: 10.1134/S0320010819040041

ВВЕДЕНИЕ

Переменная LT Del (Hen 2-467) принадлежит к немногочисленной группе желтых симбиотических звезд, прототипом которой принято считать AG Dra. Система LT Del состоит из яркого гиганта позднего G или раннего K класса и компактной горячей звезды с температурой около $100\,000$ К. Аллен (1984) классифицировал LT Del как симбиотическую типа S — двойную систему без околозвездной пылевой оболочки. Орбитальный период системы составляет $P_{\text{orb}} = 476.^d0$ (Архипова и др., 2011). За всю историю наблюдений LT Del испытала две малоамплитудные вспышки в 1994 и 2017 гг., фотометрическое поведение в которых описано в работах Архиповой и др. (1995а) и Иконниковой и др. (2019) соответственно.

Спектральные наблюдения LT Del проводятся уже более 40 лет, начиная с работы Лютца (1975). Неоднократно проводилась классификация холодного компонента системы LT Del. Первоначально Лютц и др. (1976) приписали звезде спектральный класс G, основываясь на присутствии в спектре G-полосы и абсорбции Ca I $\lambda 4226$. Позднее Мунари и Бусон (1992) получили оценку G6III по

инфракрасному (ИК) триплету Ca II. Архипова и др. (1995а) приняли спектральный класс холодного компонента как G8II по фотометрическим данным. Еще одна оценка — K3-4 — получена в работе Архиповой и др. (2011) по показателям цвета в оптической и ближней ИК-области спектра, а также по распределению энергии в непрерывном спектре с учетом всех составляющих измеренного суммарного континуума в диапазоне $3500\text{--}7000$ Å.

Перейра и др. (1998) провели анализ оптического спектра высокого разрешения желтого компонента LT Del и определили, что он представляет собой бедный металлами K-гигант с $T_{\text{eff}} = 4400$ К, $\log g = 1.8$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.1$. Атмосфера холодной звезды обогащена элементами s-процесса, образованными в результате эволюции на асимптотической ветви гигантов (AGB) горячего компонента системы. Высокая лучевая скорость ($V_r = -106.9$ км/с) вместе с низкой металличностью указывают на принадлежность LT Del к населению гало Галактики.

Исследование спектра LT Del в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне по данным спутника IUE позволило Мунари и Бусону (1992) получить оценку температуры горячей звезды $T_{\text{hot}} = 200\,000$ К

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

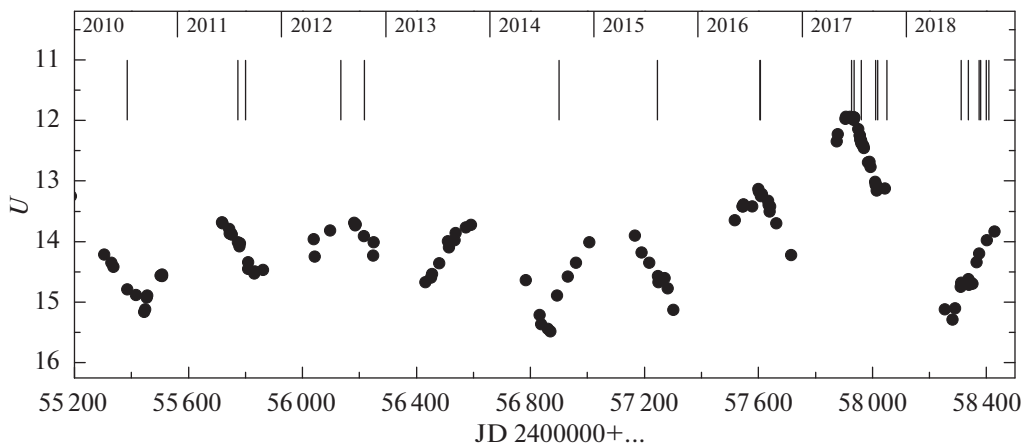


Рис. 1. Кривая блеска LT Del в полосе U за 2010–2018 гг. из статьи Иконниковой и др. (2019). Вертикальными отрезками отмечены моменты спектральных наблюдений.

по распределению энергии в диапазоне 1300–1900 Å и существенно более низкое значение $T_{\text{hot}} = 70\,000$ К методом Занстра по линии HeII $\lambda 1640$.

В оптической области на спектр холодного компонента накладывается эмиссионный спектр газовой составляющей, представленный, в основном, линиями водорода, нейтрального и ионизованного гелия. Лютц и др. (1976) впервые измерили относительные интенсивности эмиссионных линий H γ , HeI, HeII $\lambda 4686$ и SiII $\lambda 4267$. Позднее Лютц (1977) обнаружила изменение отношения интенсивностей линий He II $\lambda 4686$ и H β , а Калер и Лютц (1980) нашли вариации потоков в континууме и эмиссионных линиях H β , H α и HeII $\lambda 4686$. Наварро и др. (1987) получили относительные интенсивности эмиссионных линий в оптическом диапазоне спектра и сравнили свои результаты с данными Лютц и др. (1976) и Лютц (1977). Мунари и Бусон (1992) на спектре, полученном 9 июля 1990 г., измерили абсолютные потоки эмиссионных линий в диапазоне от 3835 до 7065 Å, изучили переменность эмиссионных линий по ранее опубликованным и собственным данным и сделали вывод о том, что источники излучения в линиях H γ и HeII локализованы в разных областях. В работе Архиповой и др. (1995b) дан анализ эмиссионного спектра звезды во вспышке 1994 г. В дальнейшем, по наблюдениям 1995–2009 гг. Архиповой и др. (2011) было подтверждено, что интенсивности бальмеровских линий водорода и линий нейтрального гелия отслеживают ход изменения блеска системы, связанного с орбитальным движением, тогда как поток в линии HeII $\lambda 4686$ не меняется в пределах ошибок измерений.

В настоящей работе сообщаются результаты наших спектральных наблюдений за период с 2010 по 2018 г. Нам удалось проследить развитие эмиссионного спектра LT Del до, во время и после

вспышки 2017 г., а также выявить различия в спектре во вспышках 1994 и 2017 гг.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Систематические спектральные наблюдения LT Del проводятся на 1.25-м телескопе Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, начиная с 1984 г. О результатах наблюдений, полученных в 1984–2009 гг., сообщалось ранее в работах Архиповой и др. (1995b, 2011). Спектры с 2010 по 2018 г. были получены на том же телескопе с матрицей ST-402 и дифракционной решеткой 600 штрихов/мм, что давало разрешение (FWHM) около 7.5 Å. Исследуемый диапазон спектра от 4200 до 7200 Å, а в отдельные даты до 9000 Å. Данные о наблюдательном материале содержатся в табл. 1, а на рис. 1 показаны моменты спектральных наблюдений вместе с кривой блеска U из работы Иконниковой и др. (2019). В табл. 1 указаны орбитальные фазы, рассчитанные с линейными элементами: $\text{JD}(\text{Min}) = 2445930 + 476.^d0E$ (Архипова и др., 2011). В качестве стандартов использовались звезды 50 Boo, 18 Vul, 29 Vul, 40 Cyg, 57 Cyg. Абсолютные распределения энергии в спектрах стандартов в диапазоне 4000–7650 Å взяты из спектрофотометрического каталога Глушневой и др. (1998) и продолжены до 9000 Å с использованием данных из атласа стандартных звездных спектров Пиклеса (1998). Обработка спектров осуществлялась с помощью стандартных пакетов CCDOPS, MAXIM и программы SPE, созданной Сергеевым и Хайсбергером (1993).

АНАЛИЗ ЭМИССИОННОГО СПЕКТРА LT Del

Эмиссионный спектр LT Del в оптическом диапазоне по сравнению со спектрами классических

Таблица 1. Журнал спектральных наблюдений

Дата	JD	Фаза	Диапазон, Å
07.07.2010	2455385	0.86	4000–7200
31.07.2011	2455774	0.68	4000–7200
27.08.2011	2455801	0.74	4000–7200
26.07.2012	2456135	0.44	4000–7200
16.10.2012	2456217	0.61	4000–7200
30.08.2014	2456900	0.05	4000–7200
10.08.2015	2457245	0.77	4000–7200
05.08.2016	2457606	0.53	4000–9000
21.06.2017	2457926	0.20	4000–9000
30.06.2017	2457935	0.22	4000–9000
25.07.2017	2457960	0.27	4000–9000
15.09.2017	2458012	0.38	4000–9000
22.09.2017	2458019	0.40	4000–9000
23.10.2017	2458050	0.46	4000–7200
11.07.2018	2458311	0.01	4000–9000
06.08.2018	2458337	0.06	4000–9000
12.09.2018	2458374	0.14	4000–9000
17.09.2018	2458379	0.15	4000–9000
08.10.2018	2458400	0.20	4000–9000
16.10.2018	2458408	0.21	4000–9000

симбиотических звезд с красными холодными компонентами достаточно беден и представлен лишь линиями водорода, нейтрального и ионизованного гелия. Отсутствуют запрещенные линии, в частности, эмиссии [OIII] и [NII], а также характерная для спектров симбиотических звезд особенность — рамановская линия OVI $\lambda 6825$. В спокойном состоянии в спектре LT Del отчетливо видны абсорбционные детали: линии MgI $\lambda 5167$, D NaI, BaII $\lambda 6496$, инфракрасный триплет CaII, однако низкое спектральное разрешение не позволяет нам количественно анализировать абсорбционный спектр холодного компонента системы.

Мы измерили абсолютные потоки и эквивалентные ширины эмиссионных линий H γ , H β , H α , HeI $\lambda 4388$, $\lambda 4713$, $\lambda 4921$, $\lambda 5016$, $\lambda 5048$, $\lambda 5876$, $\lambda 6678$, $\lambda 7065$, $\lambda 7281$, HeII $\lambda 4686$, $\lambda 5412$ на спектрах 2010–2018 гг. и приводим их в табл. 2 и табл. 3

Таблица 2. Наблюдаемые потоки в эмиссионных линиях в единицах 10^{-14} (эрг/см 2 с)

JD	Фаза	H γ	HeI	HeII	HeI	H β	HeI	HeI
		4340	4388	4686	4713	4861	4921	5016
2455385	0.86	3.7	—	7.2	—	10.2	—	—
2455774	0.68	16	—	11.3	—	50.5	4.3	—
2455801	0.74	7.5	—	6.3	—	16.8	1.3	—
2456217	0.61	10.8	—	7.0	—	28.1	4.7	—
2456900	0.05	3.8	—	5.2	—	6.4	—	—
2457245	0.77	5.4	—	7.3	—	14.6	—	—
2457606	0.53	28.1	3.9	18.1	1.9	91.7	14.1	5.2
2457926	0.20	60.1	5.8	110.0	4.3	157.0	18.0	10.7
2457935	0.22	82.5	8.1	121.0	7.1	202.0	26.1	13.3
2457960	0.27	74.1	7.3	89.8	4.6	214.0	20.5	9.6
2458012	0.38	65.6	—	44.2	4.1	170.0	12.5	5.2
2458019	0.40	51.5	—	37.6	3.1	155.0	9.7	4.7
2458311	0.01	—	—	7.2	—	8.1	—	—
2458374	0.14	—	—	12.6	—	30.2	4.7	—
2458379	0.15	—	—	18.5	—	39.4	5.3	—
2458400	0.20	21.0	—	13.0	—	38.0	4.8	2.1
2458408	0.21	—	—	10.2	—	29.5	4.2	2.1

JD	Фаза	HeI	HeII	HeI	H α	HeI	HeI	HeI
		5048	5411	5876	6563	6678	7065	7281
2455385	0.86	—	—	4.5	84.3	4.5	5.3	—
2455774	0.68	—	—	6.7	150	9.7	5.8	—
2455801	0.74	—	—	2.3	89.3	5.5	3.1	—
2456217	0.61	—	—	7.2	154	13.8	6.2	—
2456900	0.05	—	—	2.6	47.8	4.3	3.3	—
2457245	0.77	—	—	3.7	77.0	—	3.4	—
2457606	0.53	—	—	18.8	376.0	37.6	20.0	12.1
2457926	0.20	—	4.2	27.1	567.0	43.9	23.6	10.0
2457935	0.22	6.4	7.7	31.4	676.0	53.9	28.3	12.5
2457960	0.27	3.4	4.4	34.8	786.0	54.2	31.4	11.8
2458012	0.38	1.8	2.9	31.8	681.0	39.6	32.5	11.6
2458019	0.40	—	2.4	—	662.0	35.2	30.1	8.4
2458311	0.01	—	—	4.7	56.1	4.0	5.9	—
2458374	0.14	—	—	5.1	109.8	7.2	3.3	—
2458379	0.15	—	—	7.2	150.0	10.0	4.7	—
2458400	0.20	—	—	6.7	181.0	13.2	7.2	3.2
2458408	0.21	—	—	7.1	160.7	10.6	6.6	—

Таблица 3. Эквивалентные ширины эмиссионных линий (EW), Å

JD	Фаза	H γ 4340	HeI 4388	HeII 4686	HeI 4713	H β 4861	HeI 4921	HeI 5016
2455385	0.86	4.4	—	6.4	—	7.4	—	—
2455774	0.68	8.7	—	5.5	—	15.	2.	—
2455801	0.74	7.8	—	5.2	—	12.	1.2	—
2456135	0.44	15.9	—	5.8	—	25.6	4.8	2.5
2456217	0.61	9.9	—	5.3	—	18.2	3.1	1.9
2456900	0.05	3.6	—	4.3	—	5.5	—	—
2457245	0.77	6.9	—	5.0	—	9.2	0.8	—
2457606	0.53	27.7	1.6	13.2	1.2	62.2	9.7	3.4
2457926	0.20	19.9	0.8	34.0	1.3	46.1	5.2	3.3
2457935	0.22	24.8	0.4	30.0	1.1	52.3	6.7	3.2
2457960	0.27	27.5	1.1	30.0	1.8	71.3	7.1	4.1
2458012	0.38	47.3	—	25.5	2.6	90.3	7.1	3.1
2458019	0.40	32.4	—	20.8	1.6	71.4	5.2	2.3
2458050	0.46	28.4	—	13.1	—	62.3	5.7	3.0
2458311	0.01	—	—	6.9	—	6.7	—	—
2458337	0.07	—	—	5.9	—	8.4	—	—
2458374	0.14	—	—	7.8	—	14.9	—	—
2458379	0.15	7.7	—	7.7	—	15.1	1.9	—
2458400	0.20	11.2	—	6.6	—	16.8	1.8	0.9
2458408	0.21	—	—	7.8	—	19.9	2.9	1.1

JD	Фаза	HeI 5048	HeII 5411	HeI 5876	H α 6563	HeI 6678	HeI 7065	HeI 7281
2455385	0.86	—	—	2.1	28.5	1.6	1.6	—
2455774	0.68	—	—	2.0	49.2	2.9	1.8	—
2455801	0.74	—	—	1.8	41.0	2.4	1.2	—
2456135	0.44	—	—	5.1	73.4	7.7	3.9	—
2456217	0.61	—	—	1.8	47.4	4.3	2.2	—
2456900	0.05	—	—	1.1	19.2	1.5	1.2	—
2457245	0.77	—	—	1.4	29.0	1.8	1.2	—
2457606	0.53	—	—	8.6	164.0	11.7	7.6	3.0
2457926	0.20	1.6	1.7	6.1	124.0	10.4	4.4	1.0
2457935	0.22	1.5	2.2	6.8	134.0	11.6	5.6	2.6
2457960	0.27	1.5	1.3	8.8	176.0	12.3	7.1	2.7
2458012	0.38	0.9	1.5	11.4	249.0	14.1	11.2	3.2
2458019	0.40	—	1.0	—	226.0	12.7	10.5	2.8
2458050	0.46	—	—	6.7	173.0	10.3	7.8	2.2
2458311	0.01	—	—	2.3	24.0	1.6	2.2	—
2458337	0.07	—	—	0.8	25.6	1.6	1.0	—
2458374	0.14	—	—	1.6	40.9	2.6	1.2	—
2458379	0.15	—	—	1.6	45.4	3.0	1.5	—
2458400	0.20	—	—	2.4	56.4	4.4	2.3	0.7
2458408	0.21	—	—	2.7	56.5	3.6	2.92	—

соответственно. Точность измерения потоков и эквивалентных ширин мы оцениваем в пределах от 5% для сильных до 10% для более слабых линий.

Потоки и эквивалентные ширины эмиссионных линий заметно меняются со временем. Изменение потоков наиболее сильных линий — H α , HeI λ 6678 и HeII λ 4686 за период с 1984 по 2018 г. по данным из работ Мунари и Бусона (1992), Архиповой и др. (1995b, 2011), Мунари и др. (2017) и новым наблюдениям вместе с кривой блеска в полосе U из работы Иконниковой и др. (2019) показано на рис. 2.

Вне вспышек переменность эмиссионных линий H β и HeI синхронизована с вариациями блеска в полосе U и отражает изменение условий видимости области образования этих линий в процессе орбитального движения. В отличие от линий низкого возбуждения, поток в линии HeII λ 4686 не зависит от фазы орбитального периода, что было показано ранее (Мунари, Бусон, 1992; Архипова и др., 2011) и подтверждается новыми наблюдениями. Это является прямым указанием на то, что в системе не происходит затмения компактной области образования эмиссии HeII и горячей звезды. На рис. 3 показаны изменения эквивалентных ширин линий H β , HeI λ 6678 и HeII λ 4686 с фазой орбитального периода вместе с фазовой кривой в полосе U по наблюдениям в спокойном состоянии с 2010 по 2015 г. и в 2018 г.

В 2016 г., когда звезда находилась в предвспышечном состоянии, мы получили спектр вблизи орбитального максимума ($\phi = 0.53$). В это время потоки в линиях, в том числе в линии HeII λ 4686, стали заметно выше, чем были в близких фазах в предшествующие годы, что продемонстрировано на рис. 4, где, в частности, приведены фрагменты спектров 2016 г. ($\phi = 0.53$) и 2012 г. ($\phi = 0.44$).

В 1994 г. произошла первая в истории исследований LT Del малоамплитудная ($\Delta V \sim 0.^m8$) вспышка, которая пришлась на фазы 0.57–0.90 орбитального цикла и продолжалась около 160 дней (Архипова и др., 1995a). Абсорбционные детали, принадлежащие холодному компоненту, во вспышке оставались видны. Потоки в эмиссионных линиях H β , HeI, HeII усилились в 2–3 раза по сравнению со средними значениями для данных фаз орбитального цикла. Температура горячей звезды во вспышке, оцененная методом Занстра по линии HeII λ 4686, оказалась равной $T_{\text{hot}}(\text{flash}) = 65\,000$ К. Это значение ниже полученного для спокойного состояния звезды $T_{\text{hot}}(\text{quiet}) = 74\,000$ К (Архипова и др., 1995b).

Мунари и др. (2017) сообщили о новой вспышке LT Del в 2017 г. Согласно спектральным данным, полученным ими 8 мая 2017 г. на 1.22-м телескопе в Асьяго (Италия) (диапазон 3200–7900 Å,

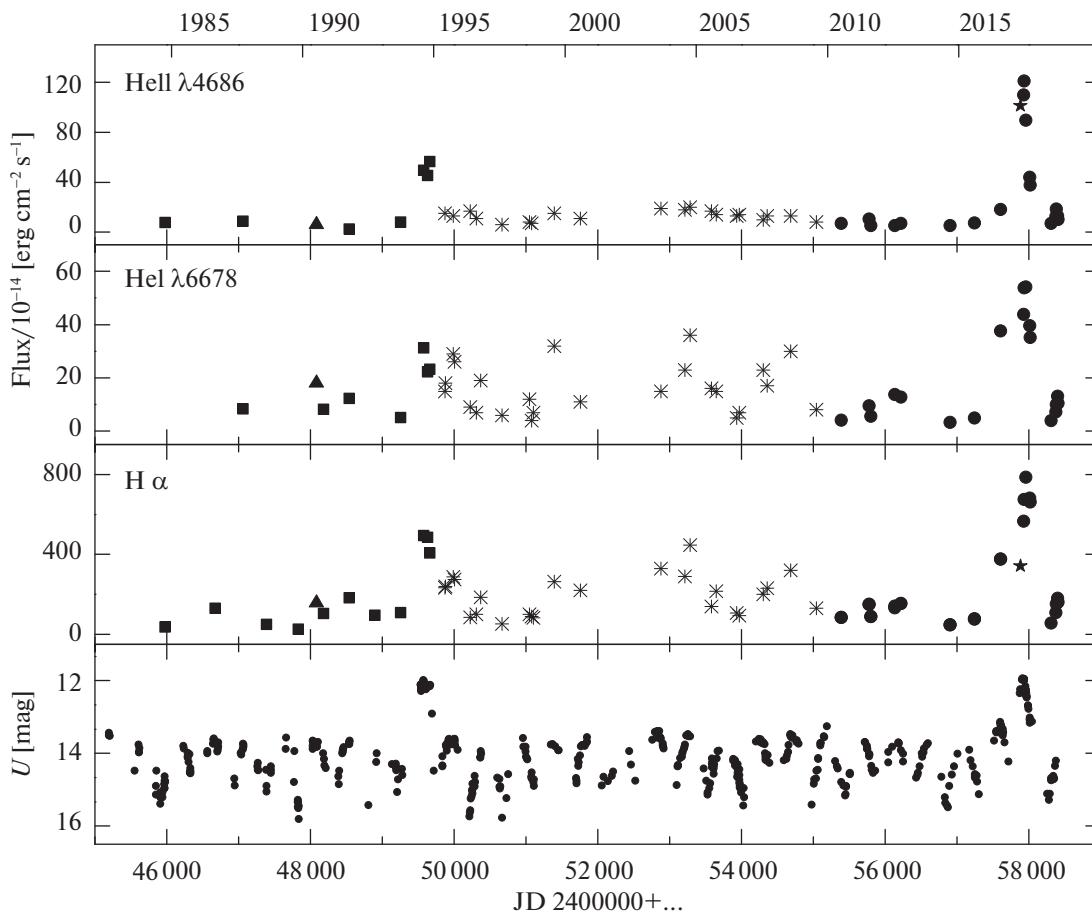


Рис. 2. Изменение потоков линий $H\alpha$, HeI $\lambda 6678$ и HeII $\lambda 4686$ со временем за период с 1984 по 2018 г. по данным из работ Архиповой и др. (1995b) (квадраты), Мунари и Бусона (1992) (треугольники), Архиповой и др. (2011) (перечеркнутые крестики), Мунари и др. (2017) (звездочки) и нашим новым наблюдениям (закрытые кружки). На нижней панели показана кривая блеска LT Del в полосе U по данным из работ Архиповой и др. (1995a), Архиповой и др. (2011) и Иконниковой и др. (2019).

дисперсия $2.31 \text{ \AA}/\text{пиксель}$), небулярный континуум усилился и скрыл особенности континуума холодной звезды. На этом спектре эмиссионная линия HeII $\lambda 4686$ была несколько сильнее, чем $H\beta$ (10.11×10^{-13} против $9.71 \times 10^{-13} \text{ эрг см}^{-2} \text{ с}^{-1}$), были видны линии высокого возбуждения OIII $\lambda 3444$ и $\lambda 3429$, OIV $\lambda 3411$, [Ne V] $\lambda 3345$ и $\lambda 3427$. Соотношение потоков бальмеровских линий $H\alpha:H\beta:H\gamma:H\delta$ составило $3.53:1.00:0.46:0.36$.

В 2017 г., с 21 июня по 23 октября, мы получили 6 спектрограмм для LT Del. Из табл. 2 видно, что все эмиссионные линии во вспышке значительно усилились. Потоки в линиях HI и HeI увеличились в 5–6 раз, а в линии HeII $\lambda 4686$ — в 10 раз по сравнению со спокойным состоянием системы в тех же фазах орбитального цикла. Появились эмиссионные линии HeI $\lambda 4388$, $\lambda 4713$, $\lambda 5048$, $\lambda 7281$, которые ранее в спектре LT Del не обнаруживались. На рис. 5 показаны изменения потоков в

линиях $H\beta$, HeI $\lambda 6678$ и HeII $\lambda 4686$ в 2017 г. и кривая блеска в полосе V . В спектре, полученном 8 мая 2017 г. (Мунари и др., 2017), линия HeII $\lambda 4686$ была несколько сильнее, чем $H\beta$, тогда как на наших более поздних спектрах (21 июня 2017 г. и позднее) $H\beta$ значительно интенсивнее, чем HeII $\lambda 4686$. Согласно нашим данным, максимальный поток в линии HeII $\lambda 4686$ наблюдался вблизи максимума блеска ($JD=2457935$), тогда как потоки в линиях водорода и нейтрального гелия достигли максимальных значений через ~ 30 дней, когда блеск звезды в полосе V понизился на $0.^m3$, что может быть связано с разной локализацией областей образования линий ионизованного гелия (близко к горячему субкарлику) и эмиссий водорода и нейтрального гелия (область в ветре и вблизи поверхности холодного компонента). Во вспышке из-за увеличения вклада газового континуума и

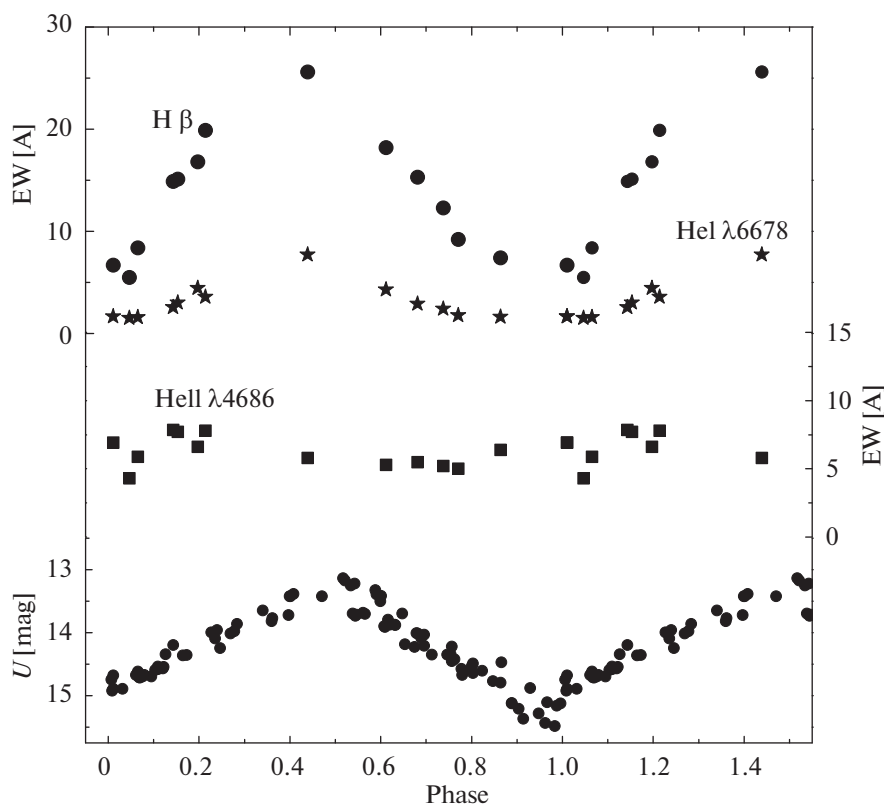


Рис. 3. Зависимость эквивалентных ширин (EW) эмиссионных линий и блеска в полосе U от орбитальной фазы. Данные относятся к спокойному состоянию LT Del: 2010–2015 гг. и 2018 г.

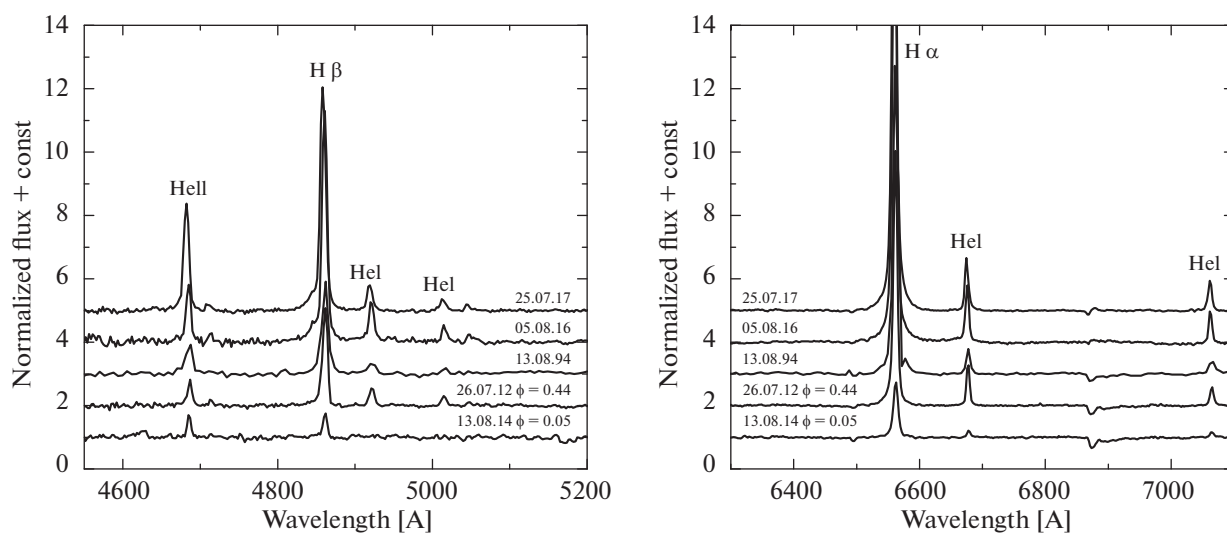


Рис. 4. Фрагменты нормализованного спектра LT Del в разных фазах орбитального цикла в спокойном состоянии, во вспышках 1994 и 2017 гг. и в предвспышечном состоянии в 2016 г.

горячей звезды стали незаметными абсорбционные детали, принадлежащие холодной звезде.

В 2018 г. звезда вернулась в спокойное состояние. С 11 июля по 16 октября мы получили 6 спектрограмм, система при этом находилась в ор-

битальных фазах от 0.01 до 0.21. Как и ожидалось, по мере выхода из орбитального минимума блеска потоки в линиях H β и HeI повышались. Линия HeII λ 4686 в 2018 г. была сильнее, чем до вспышки 2017 г., за исключением даты JD=2458311, относя-

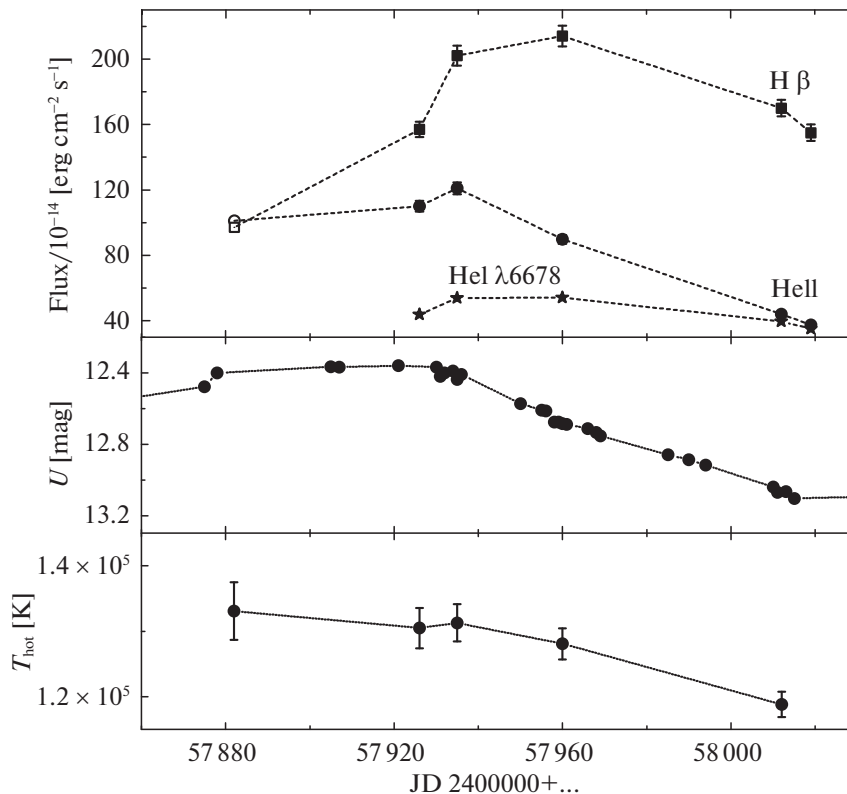


Рис. 5. Изменение абсолютных потоков в эмиссионных линиях $H\beta$, $HeI \lambda 6678$, $HeII \lambda 4686$, блеска в полосе V и температуры горячей звезды (T_{hot}) в 2017 г. Открытыми значками показаны наблюдения Мунари и др. (2017).

шейся к орбитальной фазе 0.01. В 2018 г. в спектре LT Del отчетливо проявились абсорбции холодной звезды.

Отношение потоков в линиях $HeII \lambda 4686$ и $H\beta$ и температура горячей звезды

Отношение абсолютных потоков в линиях $HeII \lambda 4686$ и $H\beta$ в спектре LT Del меняется с фазой орбитального периода, причем изменения касаются линии $H\beta$, а интенсивность линии $HeII \lambda 4686$ остается примерно постоянной. На рис. 6 показана зависимость $F(4686)/F(H\beta)$ от фазы по данным из работ Лютц и др. (1976), Лютц (1977), Аллена (1984), Наварро и др. (1987), Мунари и Бусона (1992), Архиповой и др. (1995b), Архиповой и др. (2011), Мунари и др. (2017) и нашим новым наблюдениям. В спокойном состоянии отношение $F(4686)/F(H\beta)$ варьируется от 0.16 в максимуме до 0.95 в минимуме блеска. В фазе 0.5 полностью видны области образования эмиссий $HeII$ и HeI , тогда как в фазе 0.0 значительная часть зоны излучения линий водорода закрыта от наблюдателя холодным компонентом.

В активном состоянии отношение $F(4686)/F(H\beta)$ также следует за изменением фазы, что видно на рис. 6. Однако между вспышками

1994 и 2017 гг. есть существенное различие: если в 1994 г. величины $F(4686)/F(H\beta)$ практически не отличались от таковых для спокойного состояния системы на тех же орбитальных фазах, то в 2017 г. они были заметно выше, что может указывать на увеличение температуры горячей звезды.

Ииджима (1981) предложил модифицированный метод Амбарцумяна (1932) для оценки температуры центральных звезд планетарных туманностей и горячих компонентов симбиотических двойных в виде уравнения

$$T_{hot} = (19.38 \sqrt{\frac{2.22F(4686)}{4.16F(H\beta) + 9.94F(4471)}} + 5.13) \times 10^4, \quad (1)$$

где T_{hot} — температура горячей звезды, $F(4686)$, $F(H\beta)$ и $F(4471)$ — потоки в линиях $HeII \lambda 4686$, $H\beta$ и $HeI \lambda 4471$, исправленные за межзвездное поглощение света.

В спектре LT Del в спокойном состоянии линия $HeI \lambda 4471$ с трудом выделяется на фоне континуума, во вспышке она крайне слаба, и ее измерение ненадежно. Другие линии триплетной серии HeI —

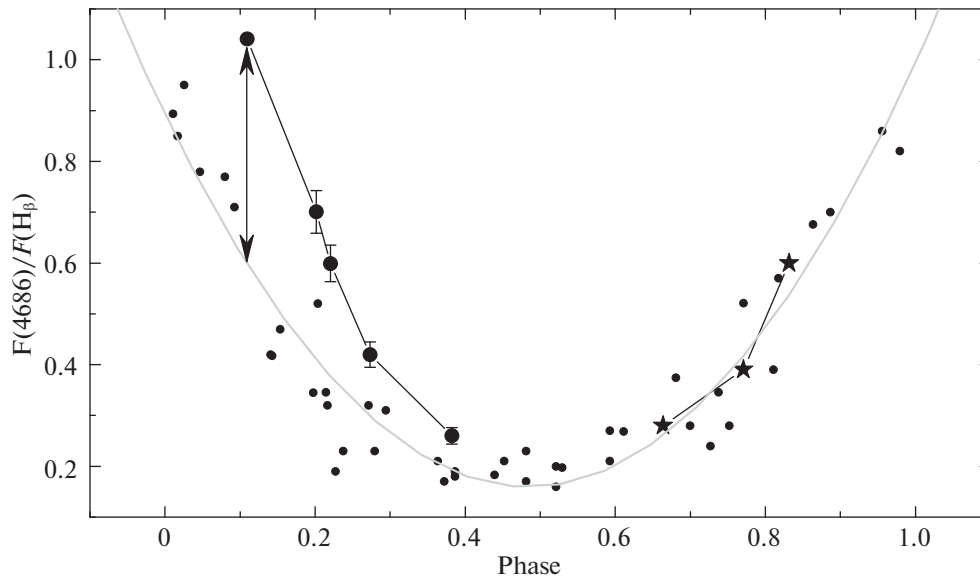


Рис. 6. Зависимость отношения $F(4686)/F(H\beta)$ от орбитальной фазы. Мелкие значки относятся к спокойному состоянию LT Del, серая сплошная линия — аппроксимация этих данных параболой. Звездочки описывают вспышку 1994 г., крупные кружки — вспышке 2017 г. Двойная стрелка показывает разницу $F(4686)/F(H\beta)$ в одной фазе в спокойном состоянии и во вспышке 2017 г.

$\lambda 5876$ и $\lambda 7065$ — довольно сильны, поэтому мы решили использовать линию HeI $\lambda 5876$ для учета доли квантов излучения горячей звезды, поглощаемой атомами гелия. Эффективный коэффициент рекомбинации для линии HeI $\lambda 5876$ получен с помощью пакета PyNeb (Луридиана и др., 2015), который использует результаты Портера и др. (2012, 2013) для расчета атома HeI. С учетом вышесказанного, мы преобразовали (1) в следующее уравнение:

$$T_{\text{hot}} = (19.38 \sqrt{\frac{2.22F(4686)}{4.16F(H\beta) + 2.88F(5876)}} + 5.13) \times 10^4, \quad (2)$$

где $F(4686)$, $F(H\beta)$ и $F(5876)$ — потоки в линиях HeII $\lambda 4686$, $H\beta$ и HeI $\lambda 5876$, и использовали его для оценки температуры возбуждающей звезды в системе LT Del. Потоки в линиях были исправлены за межзвездное покраснение с $E(B - V) = 0.^m2$ (Скопал, 1995).

Наиболее достоверное значение T_{hot} для LT Del может быть получено для орбитальной фазы 0.5, когда область ионизованного водорода максимально открыта наблюдателю. При других конфигурациях системы часть III области закрыта холодным компонентом, что увеличивает отношение $F(4686)/F(H\beta)$ и дает завышенное значение T_{hot} . С помощью уравнения (2) получено, что в спокойном состоянии в максимуме блеска $T_{\text{hot}}(\text{quiet}) \sim$

$\sim 105\,000$ К, что согласуется с оценкой $T_{\text{hot}} = 100\,000$ К из работы Скопала (2005) и существенно выше значения температуры горячей звезды $T_{\text{hot}} = 70\,000$ К, полученного методом Занстра по линии HeII $\lambda 1640$ (Мунари, Бусон, 1992).

Мы оценили также температуру возбуждающей звезды во вспышке 2017 г. Спектральные наблюдения 2017 г. относятся к моментам, когда часть области излучения линий III и HeI может быть закрыта диском холодной звезды. Мы ввели допущение о том, что во вспышке III и HeII области не изменили свои размеры и экранирование их диском холодной звезды при орбитальном движении происходило так же, как и в спокойном состоянии, а область HeIII видна всегда.

По нашим оценкам температура горячей звезды во вспышке 2017 г. увеличилась до $\sim 130\,000$ К, оставалась на этом уровне до $\text{JD} \sim 2457935$, после чего начала понижаться вместе с ослаблением блеска системы. На рис. 5 показан график изменения $T_{\text{hot}}(\text{flash})$ по наблюдениям 2017 г.

Распределение энергии в оптическом спектре LT Del

На рис. 7 представлены исправленные за покраснение с $E(B - V) = 0.^m2$ (Скопал, 2005) спектры во вспышке 2017 г. и в спокойном состоянии в минимуме блеска вместе с модельными спектрами и данными UBV -фотометрии.

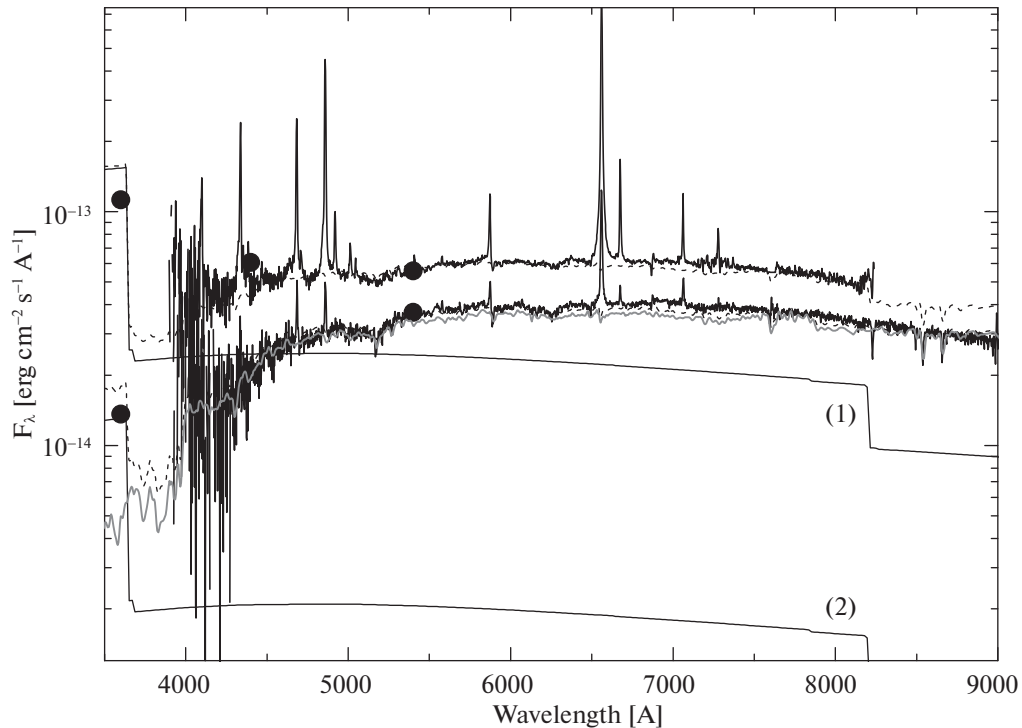


Рис. 7. Исправленные за межзвездное покраснение оптические спектры LT Del, полученные во вспышке 2017 г. (27.07.2017, $\phi = 0.27$; верхний спектр) и в спокойном состоянии (11.07.2018, $\phi = 0.01$; нижний спектр). Пунктирными линиями показаны модельные кривые распределения энергии, полученные суммированием постоянного вкладчика — гиганта спектрального класса K3 (серая сплошная линия) и переменного газового континуума с $T_e = 15\,000$ К: (1) — для спектра во вспышке и (2) — для спектра в минимуме блеска. Кружками изображены потоки, пересчитанные из звездных величин в полосах *UBV* на соответствующую дату.

Модельные кривые представляют собой сумму излучений от холодного компонента и фотоионизованной туманности, поглощающей все Lc-кванты. Спектр K3III взят из библиотеки звездных спектров Пиклеса (1998).

Газовый континуум получен как сумма водородного и гелиевого континуумов с электронной температурой $T_e = 15\,000$ К. Содержание гелия было принято равным $\text{He}/\text{H} = 0.12$.

Спектр, полученный 11 июля 2018 г. в фазе орбитального периода, близкого к минимуму ($\phi = 0.01$), в диапазоне длин волн 4000–9000 Å хорошо представляется излучением гиганта спектрального класса K3 с незначительным добавлением газового континуума с $T_e = 15\,000$ К (кривая (2) на рис. 7). Вклад излучения красного гиганта на длине волны $\lambda 5500$ в 16 раз превышает долю излучения газового континуума.

Во вспышке 2017 г. уровень континуума LT Del в оптическом диапазоне повысился значительно, что связано с увеличением доли излучения газового компонента. В диапазоне длин волн 4000–9000 Å спектр LT Del, полученный 27 июля 2017 г., может

быть представлен суммой излучения гиганта K3 и газового континуума (кривая (1) на рис. 7) с отношением $F_\lambda(\text{K3})/F_\lambda(\text{gas}) = 1.4$ на длине волны $\lambda = 5500$ Å.

Таким образом, уровень газового континуума во вспышке повысился в ~ 10 раз по сравнению со спокойным состоянием в орбитальной фазе, близкой к 0.0.

Спектральный диапазон, доступный нам для анализа, к сожалению, не позволяет получить сведения об излучении горячей звезды.

LT Del и AG Dra

LT Del принадлежит к немногочисленной группе желтых симбиотических систем, холодные компоненты которых имеют спектральный класс не позднее K5. Прототипом этой группы принято считать AG Dra.

AG Dra и LT Del имеют похожий набор эмиссионных линий в оптическом диапазоне (H α , HeI, HeII). Основное отличие — это присутствие в спектре AG Dra рамановской линии OVI $\lambda 6825$, которой нет в спектре LT Del. Изучение спектра

AG Dra показало, что у этой звезды, как и в случае LT Del, в спокойном состоянии наблюдаются вариации эквивалентных ширин эмиссионных линий низкого возбуждения (H I и He I) с орбитальной фазой и отсутствует такая зависимость для линии высокого возбуждения He II $\lambda 4686$ (Леэдьярв и др., 2016). Сделан вывод о том, что линии H I и He I возникают в расширенном газовом объеме вместе с излучением в континууме в ближней ультрафиолетовой и оптической спектральной области, тогда как линии He II образуются в значительно меньшей области вблизи горячей звезды, что справедливо и для LT Del.

Во вспышках эмиссионные линии в спектре AG Dra усиливаются, однако нет однозначной зависимости между их эквивалентными ширинами и блеском звезды. Так, во время активного состояния AG Dra в 2007 г. (событие F1), когда блеск звезды повысился на $\sim 3.7^m$ в полосе U , эмиссии H α , H β , He I $\lambda 6678$, He II $\lambda 4686$ не изменились, а рамановская линия OVI $\lambda 6825$ ослабела по сравнению со спокойным состоянием, тогда как во вспышке 2005 г. (событие E10) с меньшей амплитудой все эмиссии в спектре AG Dra усилились значительно (Леэдьярв и др., 2016). Это указывает на различие вспышек: в одних температура возбуждающей звезды возрастает, в других, по-видимому, уменьшается. Подобное наблюдается и у LT Del, у которой во вспышках с примерно равной амплитудой в полосе V , эмиссионный спектр изменился по-разному. В 1994 г. потоки в эмиссиях возросли незначительно, отношение линий He II $\lambda 4686$ и H β не изменилось по сравнению со спокойным состоянием, и поэтому можно считать, что температура горячей звезды не увеличилась. В 2017 г. наблюдалось более существенное изменение эмиссионного спектра – значительное усиление эмиссионных линий, увеличение отношения интенсивностей эмиссий He II $\lambda 4686$ и H β и повышение уровня небулярного континуума, что свидетельствует об увеличении температуры горячего источника.

ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты спектральных наблюдений желтой симбиотической звезды LT Del.

1. Анализ новых данных вместе с опубликованными ранее показал, что в спокойном состоянии, между вспышками 1994 и 2017 гг., изменение эмиссионных линий H I и He I было связано с условиями видимости областей образования этих линий в двойной системе, состоящей из горячей субкарлика и холодного яркого гиганта, и синхронизовано с переменностью блеска звезды в полосе U . Интенсивность линии ионизованного гелия He II $\lambda 4686$ не

зависит от фазы орбитального цикла, однако показала монотонное изменение: небольшое усиление с 1995 по 2003 г., а затем ослабление до 2015 г.

2. В предвспышечном состоянии в 2016 г., в фазе 0.53 орбитального цикла, нами был получен один спектр, на котором все линии усилились по сравнению с наблюдениями в близких фазах в спокойном состоянии.

3. В 2017 г. во время второй в истории исследований LT Del вспышки потоки в эмиссионных линиях возросли значительно. Впервые в спектре обнаружались эмиссии He I $\lambda 4388$, $\lambda 4713$, $\lambda 5048$ и $\lambda 7281$, которые ранее не наблюдались. Линия He II $\lambda 4686$ увеличила свою интенсивность в 10 раз, а эмиссии H I и He I усилились в 5–6 раз. В оптическом диапазоне увеличился вклад газового континуума, что привело к ослаблению абсорбционных деталей спектра холодного компонента.

4. Получены оценки температуры горячего субкарлика аналитическим методом с использованием интенсивностей линий He II $\lambda 4686$, H β и He I $\lambda 5876$. Показано, что по сравнению со спокойным состоянием с $T_{\text{hot}}(\text{quiet}) \sim 105\,000$ К температура во вспышке 2017 г. возросла до $T_{\text{hot}}(\text{flash}) \sim 130\,000$ К, тогда как во вспышке 1994 г. изменение температуры было незначительным. В связи с этим можно заключить, что LT Del испытывает холодные и горячие вспышки, как и прототип подкласса желтых симбиотических звезд AG Dra.

5. В 2018 г. звезда вернулась в спокойное состояние, однако потоки в эмиссионных линиях оставались более высокими, чем до вспышки 2017 г.

6. Проведено моделирование оптического спектра LT Del в минимуме блеска и во вспышке 2017 г. Показано, что распределение энергии в оптическом спектре системы удовлетворительно аппроксимируется суммой излучения двух составляющих: холодного гиганта K3 III и газового континуума с $T_e = 15\,000$ К. Получено, что уровень газового континуума во вспышке повысился в ~ 10 раз по сравнению со спокойным состоянием в орбитальной фазе, близкой к 0.0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аллен (D.A. Allen), Proc. Astron. Soc. Austral. **5**, 369 (1984).
2. Амбарцумян (V.A. Ambartsumyan), Circ. Glav. Astron. Observ. **4**, 8 (1932).
3. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **21**, 379 (1995a) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **21**, 339 (1995a)].
4. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Письма в Астрон. журн. **21**, 439 (1995b) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **21**, 391 (1995a)].

5. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **37**, 377 (2011) [V.P. Arkhipova et al., *Astron. Lett.* **37**, 343 (2011)].
6. Глушнева и др. (I.N. Glushneva, V.T. Doroshenko, T.S. Fetisova, T.S. Khruzina, E.A. Kolotilov, L.V. Mossakovskaya, S.L. Ovchinnikov, and I.B. Voloshina), *VizieR Online Data Catalog III/208* (1998).
7. Ииджима (T. Iijima), *Photometric and Spectroscopic Binary Systems* (Ed. E.B. Carling, Z. Kopal, Kluwer, Dordrecht, p. 517, 1981).
8. Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Архипова В.П., Письма в Астрон. журн., в печати (2019).
9. Калер, Лютц (J.B. Kaler and J.H. Lutz), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **92**, 81 (1980).
10. Леэдярв и др. (L. Leedjäv, R. Gális, L. Hric, J. Merc, and M. Burmeister), *MNRAS* **456**, 2558 (2016).
11. Луридиана и др. (V. Luridiana, C. Morisset, and R.A. Shaw), *Astron. Astrophys.* **573**, 42 (2015).
12. Лютц и др. (J.H. Lutz), *Bull. Am. Astron. Soc.* **7**, 243 (1975).
13. Лютц и др. (J.H. Lutz, T.E. Lutz, J.B. Kaler, D.E. Osterbrock, and S. A. Gregory), *Astrophys. J.* **203**, 481 (1976).
14. Лютц (J. H. Lutz), *Astron. Astrophys.* **60**, 93 (1977).
15. Мунари, Бусон (U. Munari and L.M. Buson), *Astron. Astrophys.* **255**, 158 (1992).
16. Мунари и др. (U. Munari, P. Ochner, S. Dallaporta, and R. Belligoli), *Astron. Telegram* 10361 (2017).
17. Наварро и др. (S. Navarro, R. Costero, P.G. Serrano, and L. Carrasco), *Rev. Mex. Astrofis.* **14**, 339 (1987).
18. Перейра и др. (C.B. Pereira, V.V. Smith, and K. Cunha), *Astron. J.* **116**, 1997 (1998).
19. Пиклес (A.J. Pickles), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **110**, 863 (1998).
20. Портер и др. (R.L. Porter, G.J. Ferland, P.J. Storey, and M.J. Detisch), *MNRAS* **425**, L28 (2012).
21. Портер и др. (R.L. Porter, G.J. Ferland, P.J. Storey, and M.J. Detisch), *MNRAS* **433**, L89 (2013).
22. Сергеев, Хайсберггер (S.G. Sergeev and F. Heisberger), *A Users Manual for SPE*. Wien (1993).
23. Скопал (A. Skopal), *Astron. Astrophys.* **440**, 995 (2005).