ПИСЬМА В АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ, 2018, том 44, № 7, с. 499–516

МНОГОЦВЕТНАЯ ФОТОМЕТРИЯ И СПЕКТРОСКОПИЯ ЖЕЛТОГО СВЕРХГИГАНТА С ПЫЛЕВОЙ ОБОЛОЧКОЙ HD 179821 = V1427 ОРЛА

© 2018 г. Н. П. Иконникова*, О. Г. Таранова, В. П. Архипова, Г. В. Комиссарова, В. И. Шенаврин, В. Ф. Есипов, М. А. Бурлак, В. Г. Метлов

Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию 20.02.2018 г.

Представлены результаты многоцветной ($UBVJHKLM$) фотометрии за 2009–2017 гг. и спектроскопии с низким разрешением за 2016–2017 гг. полуправильной переменной V1427 Aql = = HD 179821, представляющей собой желтый сверхгигант с газопылевой оболочкой. У звезды в оптическом диапазоне наблюдаются малоамплитудные ($\Delta V < 0^m.2$) квазипериодические колебания блеска на фоне долговременного тренда. Форма кривой блеска и характерное время меняются от цикла к циклу. Наблюдаются как температурные колебания, характерные для пульсаций, так и вариации блеска без заметных изменений цвета. UBV наблюдения за 2009–2011 г. удовлетворительно представляются суперпозицией двух периодических составляющих с $P = 170^d$ и $P = 141^d$ (или $P = 217^d$ — годичносопряженный с $P = 141^d$). После 2011 г. колебания стали менее правильными, характерное время изменения блеска увеличилось и превысило 250^d. На кривых блеска выделяется событие 2015 г., когда блеск звезды за 130 дней повысился на $0^m.25$ в полосе V и достиг максимального значения за все время наших систематических наблюдений с 1990 г. Среднегодовой блеск звезды в полосах V, J, K в 2009–2016 гг. монотонно повышался, тогда как в U и B падал. Среднегодовые показатели цвета $U-B$, $B-V$, $J-K$ увеличивались — звезда краснела. Долговременный ход блеска и показателей цвета можно объяснить охлаждением и расширением фотосферы звезды при увеличении светимости. По нашим фотометрическим оценкам температура фотосферы с 2008 по 2016 г. уменьшилась на ~400 K, радиус увеличился на ~24%, а светимость возросла на ~19%. Обсуждается ход среднегодовых фотометрических данных за почти 30 лет наблюдений. Спектральные наблюдения с низким разрешением в диапазоне λ4000–9000 Å, полученные в 2016–2017 гг., указывают на существенные изменения в спектре V1427 Aql по сравнению с 1994–2008 гг. В частности, заметно усилились абсорбции BaII и инфракрасного триплета CaII, тогда как бленда триплета OI λ7771–4 ослабела, что указывает на уменьшение температуры звезды в зоне образования этих линий. Обсуждается эволюционный статус звезды. Проводится сравнение V1427 Aql с post-AGB звездами и желтыми гипергигантами.

Ключевые слова: post-AGB, post-RSG, желтые гипергиганты, спектральные и фотометрические наблюдения, переменность блеска, эволюция.

DOI: 10.1134/S0320010818070021

ВВЕДЕНИЕ

Эволюционный статус желтого сверхгиганта с инфракрасным (ИК) избытком HD 179821 (BD–00°3679 = SAO 124414 = IRAS 19114 + + 0002 = V1427 Aql) не вполне определен. Нет сомнений в том, что звезда находится на поздней стадии эволюции, о чем свидетельствует наличие сферической околозвездной газопылевой оболочки, образованной в результате потери массы на предыдущих стадиях эволюции. Однако остается дискуссионным вопрос о начальной массе HD 179821. По одним признакам это звезда промежуточной массы ($M_{ZAMS} = 1–8M_\odot$), и в настоящее время HD 179821 — post-AGB сверхгигант — предшественник планетарной туманности (Потташ, Партасарати, 1988; Гривняк и др., 1989; Фергюсон,Уета, 2010), по другим — HD 179821 — массивный объект ($M_{ZAMS} > 20M_\odot$), прошедший фазу красных сверхгигантов (RSG), которому предстоит взорваться как сверхновая II типа,

*Электронный адрес: ikonnikova@gmail.com

сбросить оболочку и стать в дальнейшем нейтронной звездой (Джура и др., 2001; Одмайер и др., 2009; Сахин и др., 2016). Редди и Гривняк (1999), Джосселин и Лебре (2001), Короллер и др. (2003), Архипова и др. (2009) подробно обсудили обе гипотезы.

Важной особенностью HD 179821 является фотометрическая нестабильность. Переменность блеска звезды была обнаружена нами по результатам наблюдений с 1990 по 1992 г. (Архипова и др., 1993). В Общем каталоге переменных звезд звезда получила обозначение V1427 Aql и была отнесена к классу полуправильных переменных типа SRd (Самусь и др., 2017). Дальнейшие наблюдения в 1993–1999 гг. (Архипова и др., 2001), в 1994–2000 гг. (Гривняк, 2001), в 1999–2000 гг. (Короллер и др., 2003) и в 2000–2008 гг. (Архипова и др., 2009) выявили малоамплитудные ($\Delta V = 0\overset{m}{.}1 - 0\overset{m}{.}2$) колебания блеска звезды с продолжительностью циклов около 200 дней, а также долговременный ход блеска и показателей цвета. Известно, что звезды на поздних стадиях эволюции испытывают нестабильность, характер которой различен у post-AGB сверхгигантов и у желтых гипергигантов в стадии post-RSG. Поэтому для звезд с неясным эволюционным статусом, таких как V1427 Aql, знание особенностей фотометрического поведения крайне важно.

В настоящей работе мы представляем новые данные многоцветной фотометрии V1427 Aql, полученные в 2009–2017 гг., и анализируем тренд блеска и показателей цвета за весь период наших фотометрических наблюдений, начиная с 1990 г. В работе также представлены спектральные наблюдения с низким разрешением за 2016–2017 гг. и их сравнение с полученными ранее данными.

НАБЛЮДЕНИЯ

UBV-фотометрия

Фотометрические наблюдения V1427 Aql проводятся нами, начиная с 1990 г. Результаты UBV-наблюдений за 1990–2008 г. опубликованы в работах Архиповой и др. (1993, 2001, 2009).

После 2008 г. мы продолжали наблюдения V1427 Aql на 60-см рефлекторе Цейсса Крымской наблюдательной станции ГАИШ МГУ с помощью электрофотометра, работающего в режиме счета фотонов (Лютый, 1971). Наблюдения проводились с диафрагмой 27″. Звездой сравнения с величинами $U = 9\overset{m}{.}87$, $B = 9\overset{m}{.}56$, $V = 8\overset{m}{.}77$ служила звезда SAO 124412 (sp = G8IV). Точность измерений составила около $0\overset{m}{.}01$. В табл. 1[1] представлены UBV-наблюдения V1427 Aql за 2009–2017 гг.

[1] Таблица 1 публикуется только в электронном виде и доступна через http://vizier.u-strasbg.fr/cats/J.PAZh.htx

ИК-фотометрия

ИК-фотометрия V1427 Aql проводилась на 125-см телескопе Крымской наблюдательной станции ГАИШ МГУ при помощи фотометра с фотовольтаическим приемником из антимонида индия (InSb), охлаждаемого жидким азотом (Шенаврин и др., 2011). Фотометр установлен в кассегреновском фокусе телескопа, выходная диафрагма составляет ∼12″. Фотометрическим стандартом служила звезда BS 7377 (Sp = F0IV) из каталога Джонсона и др. (1966) с величинами: $J = 2\overset{m}{.}75$, $H = 2\overset{m}{.}61$, $K = 2\overset{m}{.}57$, $L = 2\overset{m}{.}54$, $M = 2\overset{m}{.}59$. Фотометрические ошибки наших наблюдений не превышали $0\overset{m}{.}05$ в фильтре M и $0\overset{m}{.}02$ в остальных фильтрах. Анализ результатов ИК-фотометрии 1992–2000 гг. и 2008 г. (две ночи), а также данных других авторов, полученных до 1992 г., приведен в работе Архиповой и др. (2009). В табл. 2 приведены новые результаты $JHKLM$-фотометрии звезды в 2009–2017 гг.

Спектральные наблюдения

Спектральные наблюдения V1427 Aql с низким разрешением проводятся нами, начиная с 1994 г. Анализ спектров, полученных в 1994–2008 гг., приведен в работе Архиповой и др. (2009). Здесь мы представляем наблюдения 2016–2017 гг. Спектры в диапазоне λ4000–9000 Å были получены на 125-см рефлекторе Крымской наблюдательной станции ГАИШ МГУ с помощью светосильного А-спектрографа. В качестве приемника излучения использовалась ПЗС-матрица SBIG ST-402. Разрешение составило ∼2.2 Å на элемент.

Журнал спектральных наблюдений V1427 Aql за 2016–2017 гг. представлен в табл. 3, где даны даты наблюдений и сведения о стандартной звезде. 25 октября 2016 г. спектр звезды-стандарта не был получен из-за ухудшения погоды.

Обработка спектров осуществлялась с помощью стандартной программы CCDOPS, а также программы SPE (Сергеев, Хайсбергер, 1993). Калибровка потоков проводилась по спектрам стандартов, абсолютные распределения энергии для которых в диапазоне λ4000–7650 Å взяты из спектрофотометрического каталога Глушневой и др. (1998) и продолжены до λ9000 Å с использованием данных из атласа стандартных звездных спектров Пиклеса (1998).

Таблица 2. $JHKLM$-фотометрия V1427 Aql в 2009–2017 гг.

JD	J	H	K	L	M
2455048.35	5.43	5.00	4.75	4.48	–
2455319.58	5.43	5.02	4.76	4.54	–
2455410.34	5.36	–	4.72	–	–
2455433.31	5.39	–	4.73	–	–
2455501.15	5.45	–	4.76	–	–
2455700.53	5.40	–	4.72	–	–
2455734.45	5.44	–	4.74	–	–
2455753.40	5.44	–	4.76	–	–
2455782.33	5.40	5.00	4.73	4.50	–
2455818.28	5.36	–	4.68	–	–
2456084.53	5.37	–	4.70	–	–
2456147.35	5.31	–	4.61	–	–
2456409.58	5.33	–	4.63	–	–
2456470.44	5.28	–	4.57	–	–
2456489.38	5.28	–	4.57	–	–
2456515.39	5.25	–	4.57	–	–
2456591.16	5.22	–	4.53	–	–
2456876.31	5.13	–	4.41	–	–
2456968.19	5.13	–	4.40	–	–
2457233.40	5.09	–	4.38	–	–
2457261.32	5.08	–	4.35	–	–
2457266.30	5.06	4.63	4.34	4.10	3.83
2457292.21	5.03	4.60	4.31	4.09	3.70
2457525.50	5.10	4.64	4.37	4.11	4.10
2457529.54	5.11	4.66	4.39	4.14	4.09
2457556.48	5.09	4.62	4.35	4.12	4.11
2457566.44	5.08	4.62	4.32	4.07	3.99
2457583.38	5.08	4.64	4.35	4.09	4.02
2457594.36	5.10	4.66	4.36	4.11	4.02
2457616.32	5.04	4.61	4.31	4.10	3.93
2457640.32	5.04	4.60	4.30	4.11	3.94
2457855.60	5.11	4.64	4.38	4.14	4.14
2457892.50	5.10	4.64	4.41	4.16	4.22
2457909.50	5.07	4.57	4.30	4.06	3.94
2457912.50	5.13	4.63	4.36	4.09	3.95
2457943.40	5.08	4.61	4.37	4.06	4.01
2457948.40	5.07	4.63	4.35	4.07	4.03
2457950.40	5.09	4.61	4.35	4.06	3.97
2457971.40	5.07	4.61	4.33	4.08	4.09
2457975.30	5.06	4.59	4.33	4.07	4.02
2457978.30	5.06	4.61	4.33	4.07	4.13
2457999.30	5.05	4.60	4.34	4.10	3.99
2458008.30	5.06	4.59	4.30	4.04	4.05
2458063.20	5.12	4.63	4.30	4.06	4.00

Таблица 3. Журнал спектральных наблюдений V1427 Aql в 2016–2017 гг.

Дата	JD-2400000	Стандарт
07.05.2016	57516	4 Aql
05.06.2016	57545	50 Boo
08.06.2016	57548	4 Aql
27.07.2016	57597	4 Aql
25.10.2016	57687	–
27.06.2017	57932	4 Aql
30.06.2017	57935	4 Aql
16.10.2017	58043	4 Aql

АНАЛИЗ ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ И СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЕРЕМЕННОСТИ V1427 Aql

Фотометрическая переменность V1427 Aql в 2009–2017 гг.

На рис. 1 мы приводим кривые блеска V1427 Aql в полосах UBV и кривые показателей цвета $U-B$, $B-V$ и $U-V$ по наблюдениям в Крыму с 2009 по 2017 гг. Фотометрическое поведение звезды в 2009–2017 гг. не было строго однородным.

В 2009–2010 г. (JD = 24 549 70 – 55 516) наблюдались периодические колебания блеска V1427 Aql, во время которых показатели цвета менялись строго в фазе с изменением блеска — в максимумах блеска звезда была наиболее голубой, в минимумах — красной. В 2010 г., когда пульсации проявились наиболее четко, амплитуда изменения блеска составила $\Delta V = 0^m.18$, а показатель цвета $B-V$ варьировался в пределах $0^m.58-0^m.66$.

В 2011 г. звезда показала переменность блеска с меньшей амплитудой около $0^m.1$ в UBV-полосах, причем изменения блеска не сопровождались существенными изменениями показателей цвета.

В 2012–2014 гг. (JD = 24 56040–56605) вариации блеска стали менее регулярными, характерное время изменения блеска увеличилось и стало сравнимо с продолжительностью сезонов наблюдений. Максимальная амплитуда колебаний в полосе V составила $0^m.15$.

В 2015 г. UBV-фотометрия проводилась в течение 138 сут, с 19 мая по 3 октября (JD = = 24 57162–57299). В этот интервал времени блеск звезды стремительно повышался и возрос на $0^m.25$ в V, $0^m.33$ в B и $0^m.40$ в U полосах. К JD = 24 57299 блеск в полосе V достиг наивысшего значения за все время наших наблюдений с 1990 г: $V = 7^m.85$. К сожалению, эта дата стала последней в 2015 г., и момент максимума в этом цикле колебаний не был

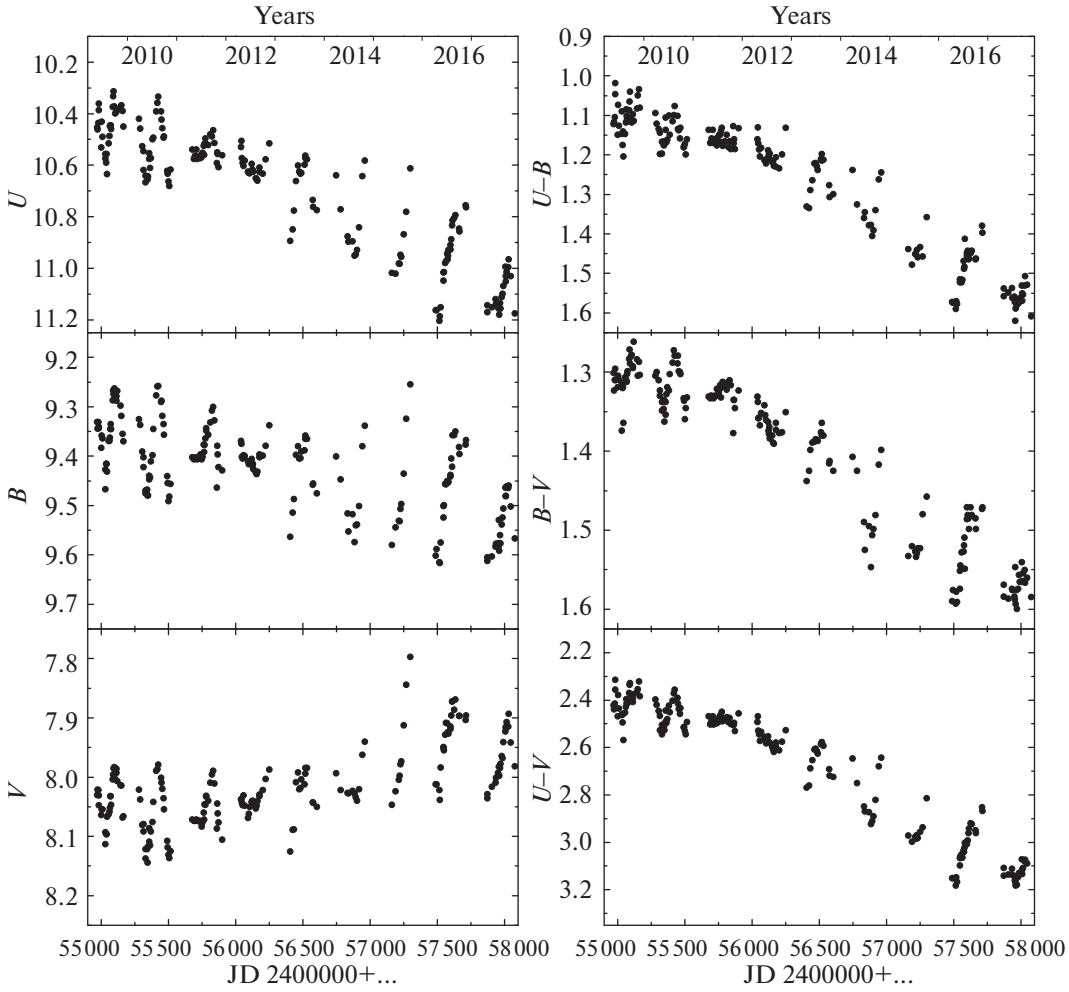


Рис. 1. Кривые блеска и показателей цвета V1427 Aql в 2009–2017 гг.

нами зафиксирован. Необычным было поведение показателей цвета: при повышении блеска от $V = 8\overset{m}{.}05$ до $V = 7\overset{m}{.}91$ показатели цвета $B - V$ и $U - B$ практически не менялись, следовательно, светимость росла за счет увеличения радиуса без изменения температуры, затем звезда незначительно поголубела.

Наблюдательный сезон 2016 г. начался 7 апреля (JD = 24 57486) и продолжался 228 сут. В этот интервал времени наблюдалось систематическое повышение блеска во всех фильтрах, на фоне которого на кривых блеска B и U выделяются локальные экстремумы: минимум на JD = 24 57517 и максимум, который пришелся на JD ∼ 24 57630. Блеск звезды в этом цикле колебаний повысился на $0\overset{m}{.}15$ в V, $0\overset{m}{.}27$ в B и $0\overset{m}{.}39$ в U полосах, а показатели цвета уменьшились: $B - V$ на $0\overset{m}{.}10$ и $U - B$ на $0\overset{m}{.}15$.

В 2017 г. блеск звезды повышался в течение 146 сут, начиная с первой даты наблюдений — 26 апреля (JD = 24 57870), достиг максимума около 18 сентября (JD = 24 58015), и затем звезда начала ослабевать. Максимальная амплитуда в этом цикле колебаний в полосе V составила около $0\overset{m}{.}13$.

Двухцветная диаграмма $(B - V) - (U - B)$ и диаграмма цвет–величина $V - (B - V)$ (рис. 2) демонстрируют различие связи между цветом и блеском в разные сезоны наблюдений.

Помимо колебаний, связанных с пульсациями и, возможно, процессами в нестабильной атмосфере, в 2009–2017 гг. звезда показала долговременный тренд блеска и показателей цвета: в среднем от сезона к сезону блеск в полосе V повышался, тогда как в U и B падал, при этом показатели цвета $U - B$ и $B - V$ систематически увеличивались (звезда краснела).

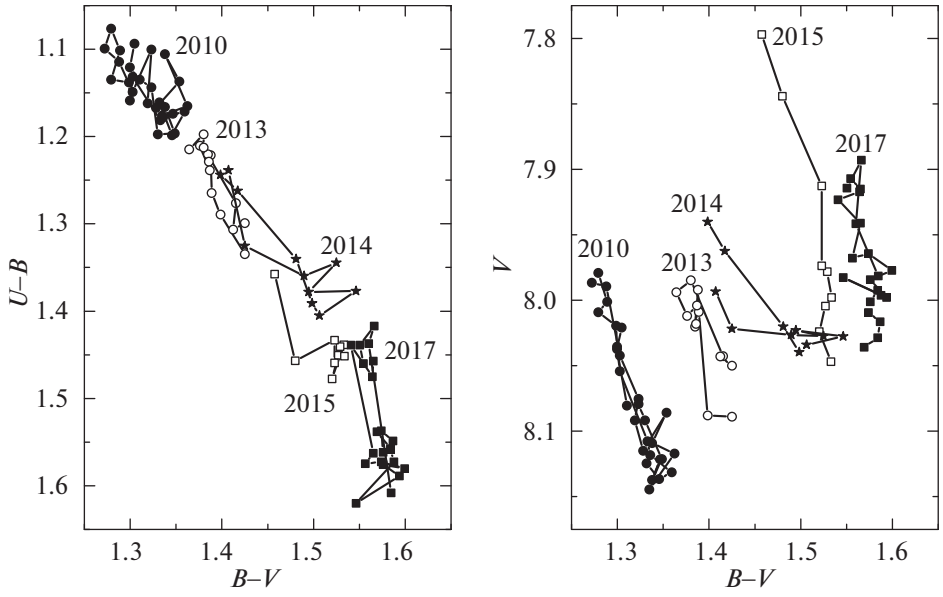


Рис. 2. Двухцветная диаграмма и диаграмма цвет–величина V1427 Aql по данным пяти сезонов наблюдений. Числами обозначены годы.

В ближнем ИК-диапазоне в 2009–2017 гг. наиболее полные ряды наблюдений получены в полосах J (1.25 мкм) и K (2.2 мкм). На рис. 3 показаны кривые блеска звезды в J, K, L и M полосах и изменение со временем показателей цвета $J - K$, $H - K$, $L - M$. Переменность блеска внутри сезона связана с пульсациями звезды, амплитуда которых максимальна в полосе J и не превышает $\sim 0^m.1$. С 2009 по 2015 г. наблюдалось систематическое повышение блеска в $JHKL$-полосах от сезона к сезону. В J-полосе звезда поярчала к 2015 г. на $\sim 0^m.4$, при этом показатели цвета росли, в частности, $J - K$ увеличился на $\sim 0^m.1$. Следует отметить, что в 2015 г. наблюдался значительный избыток излучения в M-полосе.

В разделе “Вековой ход блеска и показателей цвета” мы подробно обсудим изменение среднесезонных фотометрических характеристик звезды.

Поиск периодичности

На рис. 4 показана полная кривая блеска V1427 Aql в полосе V за 1990–2017 гг. На рисунке видно, что звезда испытывала полуправильные вариации блеска с переменной амплитудой, характерные для мультичастотных колебаний.

Поиск периодов колебаний блеска V1427 Aql проводился в работах Архиповой и др. (2001, 2009) по наблюдениям 1990–1999 и 2000–2008 гг. соответственно, а также в работе Короллера и др. (2003) по их собственным наблюдениям 1999 и 2000 гг. с привлечением данных Архиповой и др. (2001) и Гривняка (2001).

По UBV-наблюдениям V1427 Aql в 1994–1999 гг. (Архипова и др., 2001) мы нашли периоды колебаний $P_0 = 205^d$ и $P_1 = 142^d$ и предположили, что они принадлежат основному тону и первому обертону пульсаций. Близкие значения периодов получены Короллером и др. (2003).

В работе Архиповой и др. (2009) указано на возможное изменение периода пульсаций V1427 Aql и сбой фазы колебаний после 2000 г. По наблюдениям 2001–2008 гг. были найдены периоды $P_0 = 196 \pm 5$ и $P_1 = 128 \pm 5$ сут, которые являются годичносопряженными. Выбор одного из них в качестве основного, определяющего продолжительность цикла колебаний, вызвал трудности. Наблюдения 2001, 2004 и 2005 гг., когда четко проявились пульсационные колебания, скорее удовлетворяют периоду $P_1 = 128 \pm 5^d$, тогда как в 2002, 2003, 2006 и 2007 гг. характерное время изменения блеска было близко к 200^d.

В настоящей работе приводится частотный анализ новых UBV-данных за 2009–2017 гг.

Для поиска периода использовались программа PERIOD04 (Ленц, Брегер, 2005) и программа В.П. Горанского EFFECT, реализующая фурье-преобразование для временных рядов с произвольным распределением наблюдений по времени (Диминг, 1975).

В амплитудном спектре, построенном по UBV-наблюдениям трех сезонов 2009, 2010 и 2011 гг.,

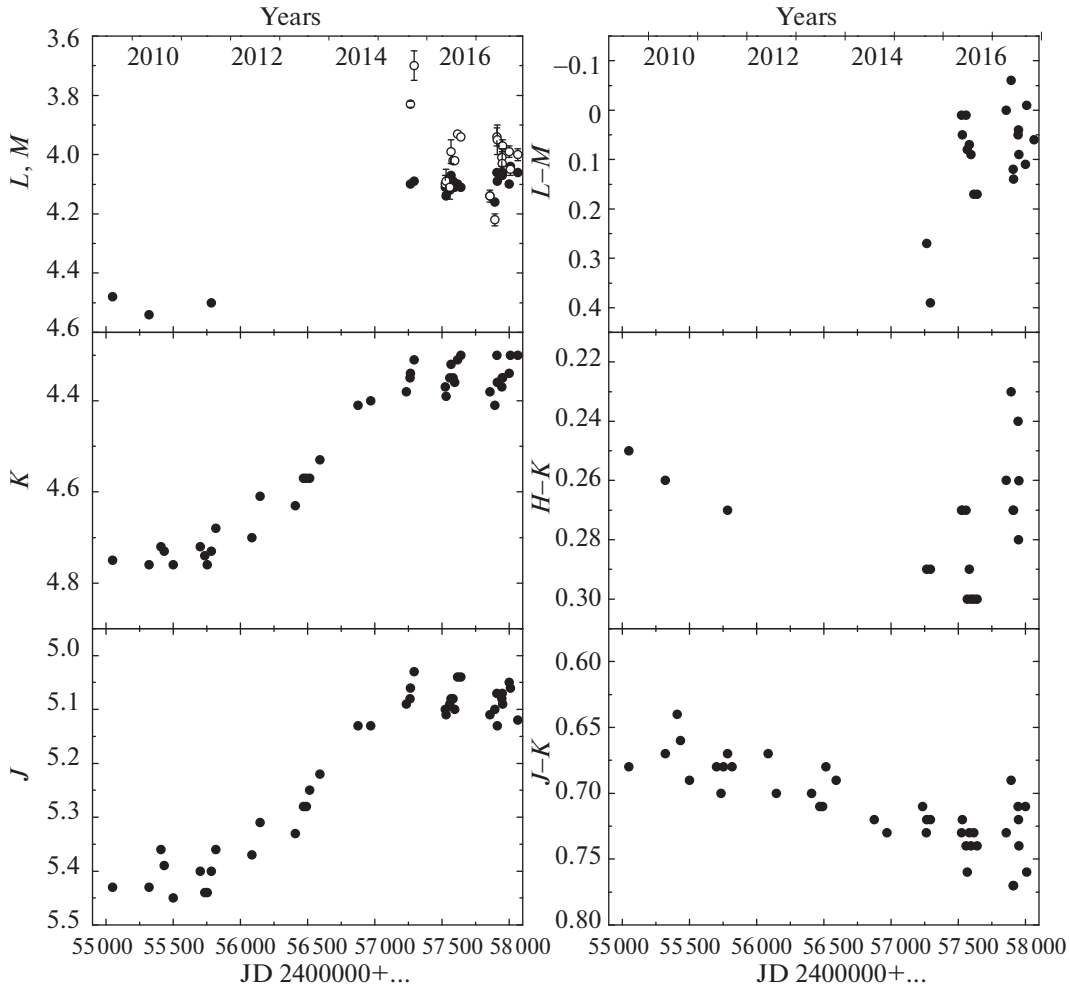


Рис. 3. Кривые блеска и показателей цвета V1427 Aql в ближнем ИК-диапазоне в 2009–2017 гг. На левом верхнем рисунке точки — L-величины, открытые кружки — M-величины.

выделяется пик, соответствующий периоду $P_1 = 170 \pm 5$ сут, после вычитания которого в остаточном спектре доминируют периоды $P_2 = 141 \pm 5$ и $P_3 = 217 \pm 5$ сут. Амплитудные спектры V1427 Aql в диапазоне периодов 10^d–400^d показаны на рис. 5. Эти спектры получены по 87 наблюдениям в полосе B за 2009–2011 гг. За 2009–2011 гг. получено 10 оценок блеска в полосе J, по этим данным найдены годичносопряженные периоды 137 и 216 сут, близкие к полученным по UBV-наблюдениям P_2 и P_3.

В 2012–2017 гг. период колебаний возрос и стал превышать продолжительность сезонов наблюдений. В 2012–2014 гг. характерное время изменения блеска составило около 260 сут. По наблюдениям 2015–2017 гг. частотный анализ выявляет период около 370 сут в полосе V. По 22 оценкам блеска в полосе J за 2015–2017 гг. получен период 175 сут, значимость которого невелика.

Природа квазипериодической переменности V1427 Aql не вполне ясна. Вместе с циклическими изменениями блеска, подобными пульсационным, присутствуют вариации иного характера, возможно, связанные с переменным звездным ветром.

Вековой ход блеска и цвета

Систематические наблюдения V1427 Aql с 1990 по 2017 г. позволили выявить долговременный ход блеска и показателей цвета звезды. На рис. 6 показаны кривые блеска в полосе V и кривые показателей цвета $U - B$ и $B - V$ для среднесезонных значений за весь период наших наблюдений с учетом данных из работы Архиповой и др. (2009), а также изменение со временем блеска J и показателей цвета $J - K$ и $K - L$ с 1987 по 2017 г. по опубликованным ранее (Гривняк и др., 1989; Кастнер, Вайнтрауб, 1995; Архипова и др., 2009) и новым данным.

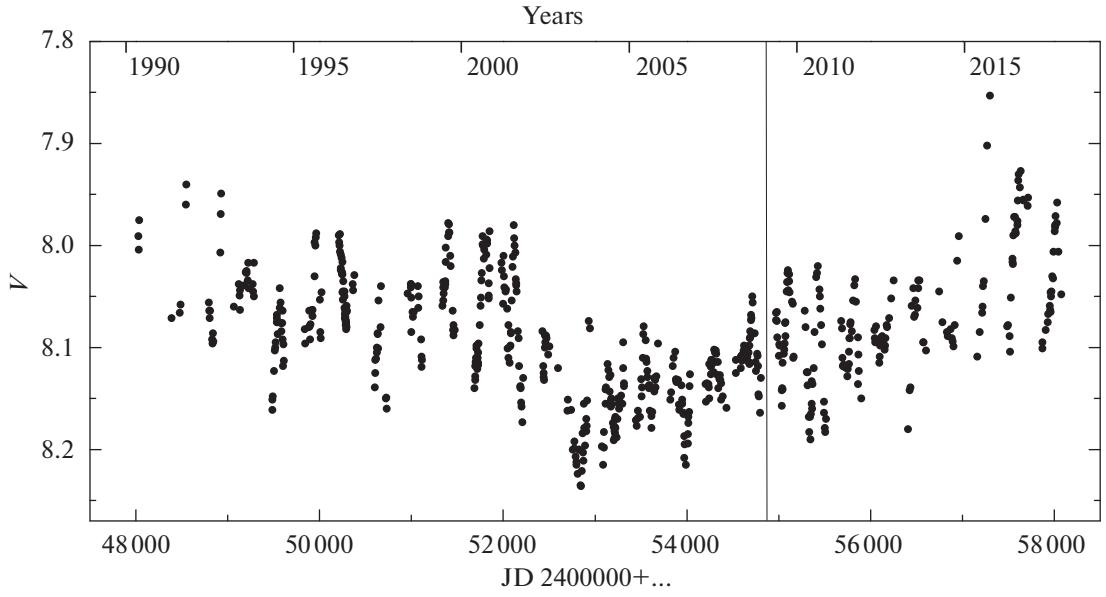


Рис. 4. Кривая блеска V1427 Aql в полосе V в 1990–2017 гг. Новые наблюдения 2009–2017 гг. расположены правее вертикальной линии.

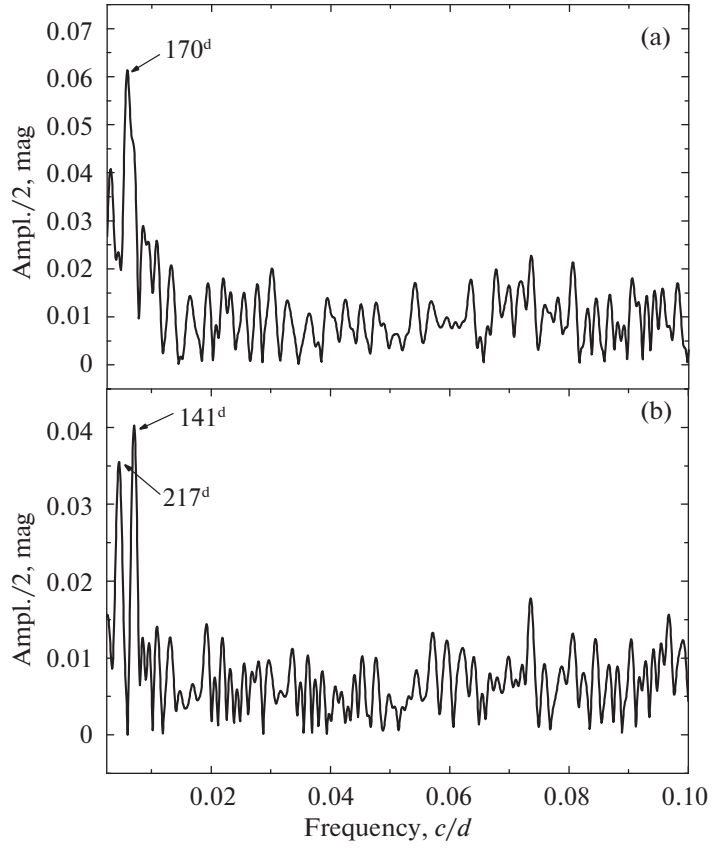


Рис. 5. Амплитудные спектры полного ряда наблюдений V1427 Aql в полосе B за 2009–2011 гг.: (a) — спектр первоначального ряда, (b) — спектр, полученный после "отбеливания" 1-й периодической составляющей кривой блеска.

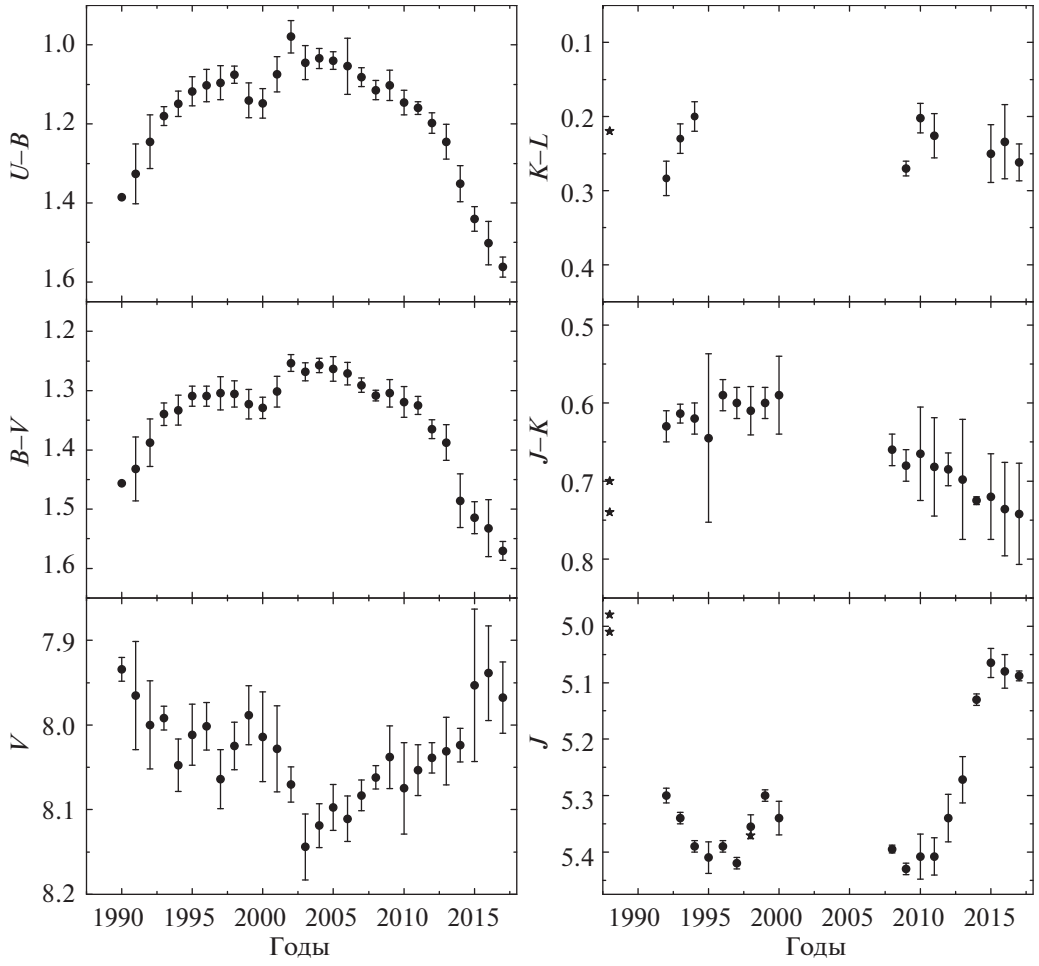


Рис. 6. Среднесезонные кривые блеска и показателей цвета V1427 Aql в оптическом и ближнем ИК-диапазонах. Точки — наши наблюдения, звездочки — отдельные наблюдения из работ Гривняка и др. (1989), Кастнера и Вайнтрауба (1995), а также данные из каталога 2MASS. Вертикальные отрезки показывают амплитуду переменности внутри сезона.

С 1990 по 1994 г. показатели цвета $U-B$ и $B-V$ монотонно уменьшались при ослаблении V-блеска. После 1994 г. показатель цвета $B-V$ практически не менялся, а $U-B$ продолжал уменьшаться. Наблюдения 1998–2000 гг. показали тенденцию к покраснению звезды, в 2001–2002 гг. звезда опять голубела, достигнув в 2002 г. минимальных значений $U-B$ и $B-V$ за все время наших наблюдений. После 2002 г. звезда краснеет при систематическом поярчании в полосе V. К 2016 г. блеск звезды в полосе V достиг уровня 1990 г., при этом показатели цвета стали более красными, чем в начале наших наблюдений.

В ближнем ИК-диапазоне первые наблюдения V1427 Aql принадлежат Гривняку и др. (1989) и Кастнеру и Вайнтраубу (1995) и относятся к 1987–1988 гг. К началу наших наблюдений в 1992 г. блеск J ослабел на $\sim 0^m.3$, а показатель цвета $J-K$ стал более голубым. С 1992 по 2000 г. блеск в J-полосе менялся не более, чем на $0^m.1$ при изменении показателя цвета $J-K$ на $0^m.05$. С 2001 по 2007 г. наблюдения в ИК-диапазоне не проводились. Начиная с 2008 г., звезда становилась все более яркой в J, H, K и L полосах при увеличении показателей цвета $J-H$ и $J-K$, а после 2015 г. наметилась тенденция к ослаблению блеска во всех фильтрах и уменьшению показателей цвета $J-H$ и $J-K$. В области 1–5 мкм у звезды не обнаружено ИК-избытка, т.е. все излучение в этом диапазоне принадлежит фотосфере звезды и определяется ее параметрами.

Двухцветная диаграмма для среднесезонных UBV данных V1427 Aql с 1990 по 2017 г. показана на рис. 7. Видно, что звезда голубела с 1990 по 2002 г., а затем началось систематическое покраснение. Наиболее быстрое изменение цвета наблюдалось в последние годы — с 2013 по 2017 г. За этот промежуток времени среднесезонные

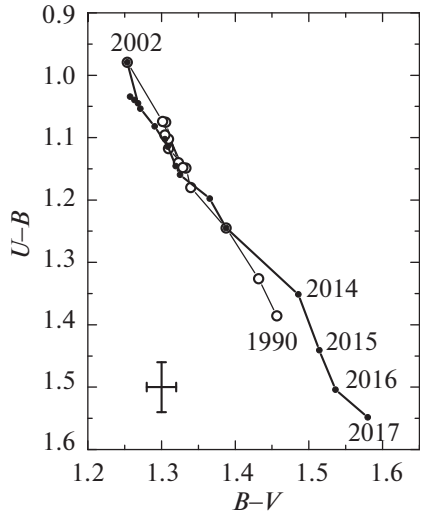


Рис. 7. Двухцветная диаграмма $(B-V)-(U-B)$ для среднесезонных наблюдаемых данных V1427 Aql. Открытые кружки — наблюдения 1990–2002 гг., точки — наблюдения 2002–2017 гг. Числами обозначены годы.

показатели цвета увеличились значительно — на $\Delta(U-B)\sim 0\overset{m}{.}3$ и $\Delta(B-V)\sim 0\overset{m}{.}2$. Как было показано в нашей предыдущей работе (Архипова и др., 2009), долговременный тренд показателей цвета совпадает с ходом $B-V$ и $U-B$ во время пульсаций. Поэтому основной причиной векового хода показателей цвета мы считаем изменение температуры звезды: увеличение с 1990 до 2002 г., а затем систематическое уменьшение к 2017 г.

На рис. 8 показаны диаграммы цвет–величина среднесезонных значений оптических и инфракрасных наблюдаемых данных V1427 Aql. Звезда на обеих диаграммах ведет себя сходным образом. После первых наблюдений V1427 Aql в 1987–1988 гг. наблюдалось ослабление блеска V и J вместе с поголубением, которое сменилось пояркчанием и покраснением в последние годы. Ход блеска и показателей цвета отражает изменение температуры и светимости фотосферы звезды. На рис. 8 стрелками показано направление полного и селективного покраснения по законам $A_V = 3.1 \times \times E(B-V)$ и $A_J = 1.50 \times E(J-K)$ (Курниеф, 1983). Если имело место изменение поглощения света в околозвездной оболочке, то его величина не превышает $\Delta E(B-V) = 0\overset{m}{.}02$.

Спектральная переменность V1427 Aql в 1994–2017 гг.

Результаты наших спектральных наблюдений V1427 Aql за период 1994–2008 гг. приведены в работе Архиповой и др. (2009). Тогда мы оценили температуру и спектральный класс звезды из сравнения с другими объектами и сообщили о переменности линии Hα. Других изменений в спектре в этот интервал времени мы не обнаружили.

С 2009 по 2015 г. спектральные наблюдения нами не проводились, а в 2016 г. возобновились и продолжались с мая 2016 г. по октябрь 2017 г. (табл. 3).

Анализ новых наблюдательных данных показал, что спектр V1427 Aql к 2016 г. претерпел заметные изменения по сравнению с периодом 1994–2008 гг. На рис. 9 приведены нормированные на континуум спектры звезды в диапазоне λ4200–9000 Å, полученные 07 июня 2008 г. и 27 июля 2016 г. На рисунке отмечены линии, на которые следует обратить внимание. Видно, что линии BaII в 2016 г. стали более глубокими, чем в 2008 г. Усилились абсорбции, принадлежащие ИК-триплету CaII. Вместе с тем триплет OI на λ7771-4 Å и линии серии Пашена ослабели, изменилось соотношение между G-полосой и линией Hγ.

Для количественного анализа мы измерили эквивалентные ширины абсорбций Hα, BaII λ5857 и λ6497, FeII λ6516, триплета OI λ7771-4, линий пашеновской серии водорода P12, P14 и P17 и абсорбций триплета CaII (CaT = λ8498 + λ8542 + + λ8662) на спектрах из работы Архиповой и др. (2009) и на спектрах 2016 и 2017 г. и приводим их в табл. 4. Следует отметить, что при нашем спектральном разрешении компоненты ИК-триплета CaII блендируются с линиями серии Пашена P13, P15 и P16. Точность измерений составила около 10%.

Изменение со временем эквивалентных ширин отдельных линий показано на рис. 10.

На наших спектрограммах эквивалентная ширина линии Hα меняется более, чем в 2.5 раза в пределах 0.7–1.97 Å. На спектрах с высоким разрешением линия Hα имеет сложный профиль с переменными эмиссионными компонентами в синем и красном крыльях линии, а также показывает существенные изменения ширины и лучевой скорости абсорбции (Тамура, Такеути, 1991; Зач и др., 1996; Киппер, 2008; Сахин и др., 2016). Основными факторами, влияющими на тип профиля Hα и его переменность у звезд на поздних стадиях эволюции, окруженных протяженными околозвездными оболочками, являются темп потери вещества, скорость звездного ветра, кинематика и оптическая толща оболочки (Клочкова, 2014).

Триплет OI на λ7771-4 на наших спектрограммах не разделяется на компоненты. Средняя эквивалентная ширина бленды OI по наблюдениям 1994–1999 гг. составляет 2.9 ± 0.1 Å, на спектре 2008 г. EW(OI) равна 2.57 ± 0.30 Å, а к 2016 г.

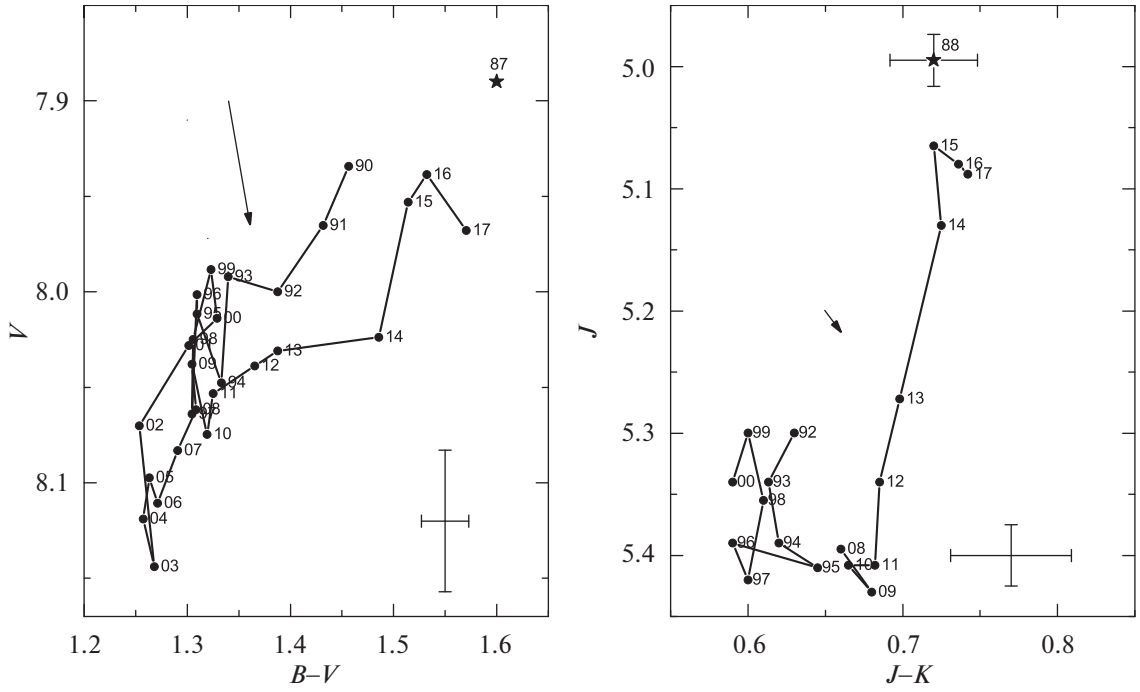


Рис. 8. Диаграммы цвет–величина $(B-V)-V$ и $(J-K)-J$. Точки — наши среднесезонные наблюдения, звездочки — наблюдения из работы Гривняка и др. (1989). Числами обозначены годы. Стрелками показано направление стандартного закона межзвездного покраснения. Длина стрелок соответствует покраснению с $E(B-V)=0^m02$.

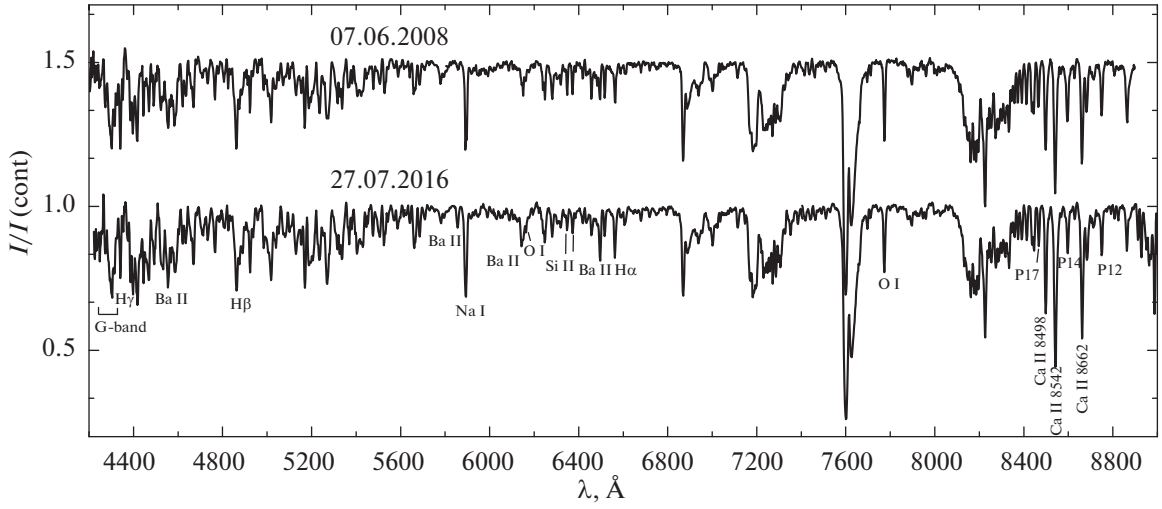


Рис. 9. Нормированные на континуум спектры V1427 Aql, полученные 07 июня 2008 г. и 27 июля 2016 г. Верхний спектр сдвинут по вертикальной оси на 0.5.

величина EW(OI) уменьшилась до 2.33 ± 0.10 Å. В литературе для EW(OI) приводятся следующие значения: 2.6 Å (Редди, Гривняк, 1999), 2.9 Å (Пули, 2003), 3.0 Å (Санчес Контрерас и др., 2008), которые получены на спектрограммах высокого разрешения 15–16 октября 1997 г., 7 мая 1999 г. и 2 июня 2003 г. соответственно.

Кислородный триплет является хорошим индикатором светимости A-G сверхгигантов. Неоднократно обращалось внимание на чрезвычайно высокое значение EW(OI) для V1427 Aql, которое

Таблица 4. Эквивалентные ширины линий в спектре V1427 Aql и оценки эффективной температуры звезды

Дата	JD-2400000	EW, Å									
		Hα	FeII(6516)	BaII(6497)	BaII(5854)	OI(7774)	P12	P14	P17	CaT	$T_{\rm eff}$, K
12.09.1994	49608	–	–	–	–	2.9	2.0	2.4	1.5	12.5	6835
30.08.1996	50326	–	–	–	–	3.0	1.8	2.8	1.3	13.6	6720
03.08.1998	51029	1.90	0.70	1.40	0.60	2.9	–	–	–	–	–
07.08.1999	51398	1.97	0.86	1.11	0.29	2.9	2.0	2.5	1.6	13.6	6766
20.09.1999	51442	1.79	0.81	0.93	0.40	–	2.3	2.3	1.7	12.8	6893
25.07.2000	51751	1.10	0.68	1.20	0.46	–	–	–	–	–	–
11.10.2001	52194	1.10	0.63	1.50	0.33	–	–	–	–	–	–
02.07.2003	52823	0.70	0.82	1.50	–	–	–	–	–	–	–
09.08.2005	53592	1.40	0.78	1.40	–	–	–	–	–	–	–
30.08.2006	53978	1.40	0.78	1.50	0.31	–	–	–	–	–	–
06.07.2008	54654	1.70	0.84	1.30	0.24	2.6	2.0	2.6	1.6	13.9	6759
01.08.2008	54680	1.70	0.69	1.21	0.18	–	–	–	–	–	–
07.05.2016	57516	1.77	0.48	1.68	0.74	2.2	1.2	1.8	1.2	19.3	5850
05.06.2016	57545	1.88	0.79	1.93	0.60	2.3	1.8	2.0	1.2	18.5	6124
08.06.2016	57548	1.80	0.62	1.76	0.84	2.4	1.4	1.9	1.1	19.2	5922
27.07.2016	57597	1.58	0.63	1.82	0.80	2.2	1.7	2.0	1.1	18.3	6080
25.10.2016	57687	1.67	0.57	1.67	0.58	2.4	1.9	2.0	1.0	18.7	6100
27.06.2017	57932	1.90	0.91	2.15	0.56	2.6	1.8	1.5	1.1	19.2	5920
30.06.2017	57935	1.79	0.90	2.08	0.54	2.5	1.8	1.5	1.1	18.4	5924
16.10.2017	58043	1.58	0.83	2.08	0.77	2.5	1.7	2.0	0.9	19.2	5975

приводит к оценке абсолютной звездной величины $M_V \approx -8^m.0 \pm 0.1$ (Редди, Гривняк, 1999). Однако следует иметь в виду, что интенсивность ИК-триплета OI зависит и от эффективной температуры звезды (Ковтюх и др., 2012). Например, в работе Перейры и Миранды (2007) приведены зависимости EW(OI) от спектрального класса и класса светимости, на которых видно, что максимальных значений EW(OI) достигает для сверхгигантов спектрального класса F0 и монотонно уменьшается к более поздним спектральным классам. Можно предположить, что ослабление триплета OI в спектре V1427 Aql, обнаруженное по нашим данным, указывает на уменьшение температуры звезды с 2008 по 2016 г.

Как видно из табл. 4, эквивалентные ширины водородных линий пашеновской серии в спектре V1427 Aql незначительно ослабели к 2016–2017 гг., а абсорбции, принадлежащие ИК-триплету CaII, усилились. Так, в 1994–2008 гг. среднее значение суммы эквивалентных ширин трех линий, принадлежащих триплету CaII, составило $EW(\mathrm{CaT}) = 12.9 \pm 0.9$ Å, тогда как к 2016–2017 гг. оно увеличилось до $EW(\mathrm{CaT}) = 18.8 \pm \pm 0.4$ Å.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ КЛАСС И ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗВЕЗДЫ

Спектральная классификация V1427 Aql проводилась неоднократно. В каталоге HD для звезды приведен спектральный класс G5. В 80–90-е годы прошлого века звезда классифицировалась как GIa (Байдельман, 1981), G5Ia (Баскомб, 1984), G40-Ia (Кинан, Мак Нейл, 1989), G5Ia (Гривняк и др., 1989), F8I (Фольк, Квок, 1989), F8/G0Ia (Хоук, Свифт, 1999). В спектральном атласе post-AGB звезд и родственных объектов (Суарес и др., 2006) для звезды приведен спектральный класс F7I по спектру, полученному в июне 1995 г. Таким образом, в литературе имеются разногласия относительно спектрального класса звезды. Связаны

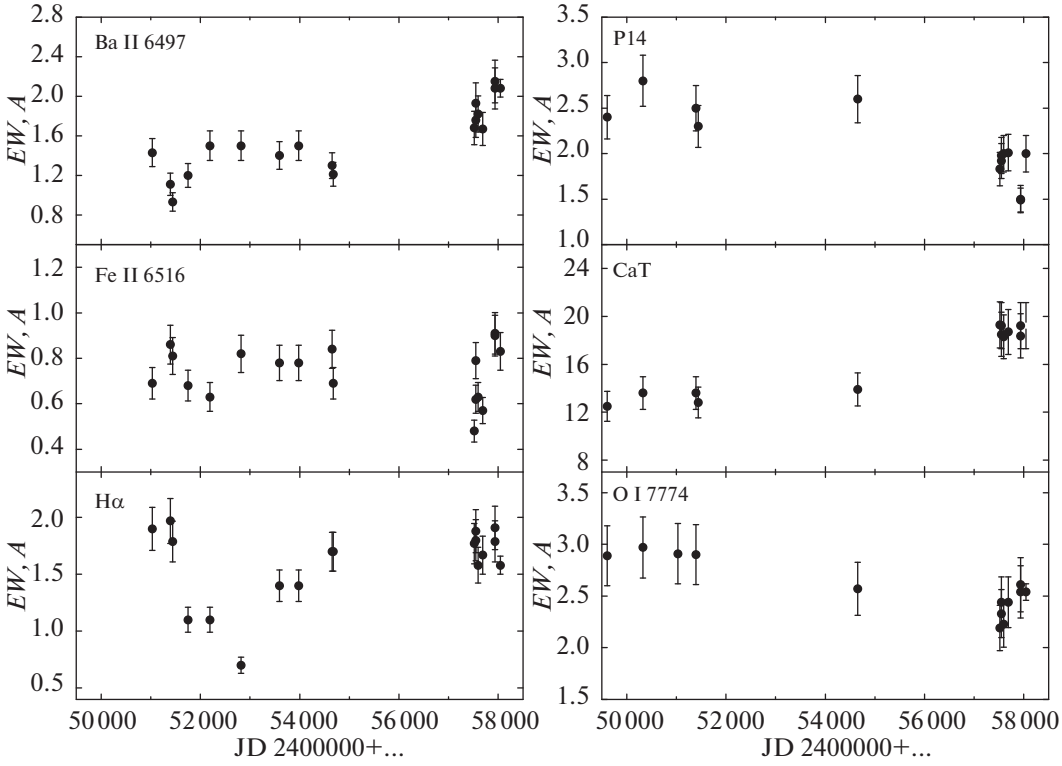


Рис. 10. Изменение со временем эквивалентных ширин абсорбционных линий в спектре V1427 Aql.

они с истинным изменением спектра или вызваны применением разных критериев классификации к спектру пекулярного объекта, выяснить не удалось.

В ряде работ получены параметры атмосферы V1427 Aql на основе анализа спектров с высоким разрешением. В статье Зача и др. (1996) получена оценка $T_{\rm eff} = 6800$ K, Редди и Гривняк (1999) определили $T_{\rm eff}$ как 6750 K, Тевенин и др. (2000) получили $T_{\rm eff} = 5660$ K. Оценка эффективной температуры из работы Киппера (2008) составляет 6750 ± 200 K. Сахин и др. (2016) получили параметры звезды по собственным наблюдениям за период 2008–2013 гг. и переопределили параметры, полученные ранее другими авторами. В работе Сахина и др. (2016) получено более высокое значение эффективной температуры, чем прежде: $T_{\rm eff} = 7350 \pm 200$ K и не обнаружено систематических изменений температуры с 1992 по 2008 гг. Столь высокое значение $T_{\rm eff}$ приводит к спектральному классу около F0 в калибровке Страйжиса (1977).

Редди и Гривняк (1999) указали на несоответствие между спектральной классификацией, выполненной для V1427 Aql по спектрам с низким спектральным разрешением, и эффективной температурой звезды, полученной по эшельным спектрам методом моделей атмосфер. Новые определения $T_{\rm eff}$ Сахина и др. (2016) усиливают это расхождение.

Мы оценили эффективную температуру и спектральный класс V1427 Aql по нашим спектрам низкого разрешения. Оценки $T_{\rm eff}$, полученные нами из эмпирической зависимости между отношением эквивалентных ширин линий ИК-триплета CaII и линий пашеновской серии водорода (P12, P14 и P17) и эффективной температурой звезды (уравнение (1) из работы Мантегацца, 1991), приведены в табл. 4. Среднее значение $T_{\rm eff}$ с 1994 по 2008 г. по нашим данным составляет 6870 ± 180 K. К 2016–2017 гг. температура звезды понизилась до $T_{\rm eff} = 5990 \pm 100$ K. Согласно калибровкам Страйжиса (1977) для сверхгигантов, этим температурам соответствуют спектральные кассы между F2 и F5 в 1994–2008 гг. и около F8 в 2016–2017 гг.

В работе, посвященной поиску желтых гипергигантов в галактике M33 (Корниотис и др., 2017), показана сетка звездных параметров, построенная на основе работы Сенарро и др. (2002) в плоскости PaT-CaT*. Индекс PaT равен сумме эквивалентных ширин пашеновских линий P12, P14 и P17, а индекс CaT* (Сенарро и др., 2001) измеряет сумму эквивалентных ширин триплета CaII, скорректированную за влияние линий серии Пашена: $\mathrm{CaT}^* = \mathrm{CaT} - 0.93 \times \mathrm{PaT}$. Если построить зависимость PaT-CaT* для V1427 Aql по нашим данным, то четко разделяются два состояния звезды: с более

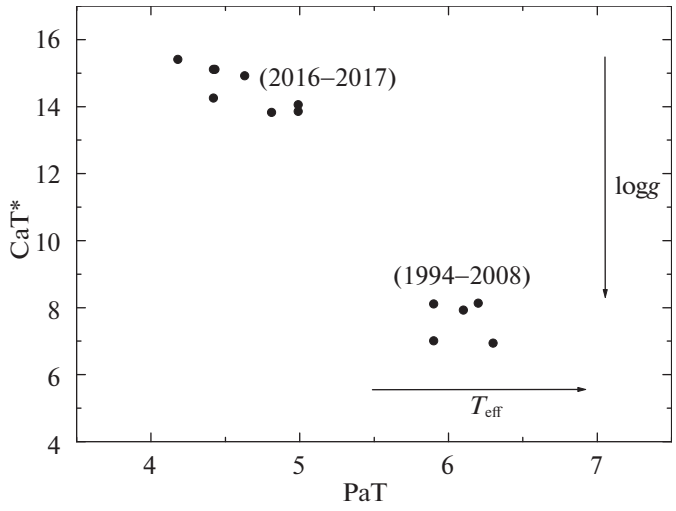


Рис. 11. Диагностическая диаграмма PaT-CaT* для V1427 Aql, построенная по наблюдениям 1994–2008 гг. и 2016–2017 гг. Индексы PaT и CaT* характеризуют интенсивности линий серии Пашена P12, P14 и P17 и абсорбций ИК-триплета CaII соответственно. Стрелками показаны направления роста звездных параметров $\log g$ и $T_{\rm eff}$.

высокими значениями $T_{\rm eff}$ и $\log g$ в 1994–2008 гг. и более низкими — в 2016–2017 гг. (рис. 11).

Мы получили также оценки $T_{\rm eff}$ по фотометрическим данным. Для этого исправленные за покраснение с $E(B-V) = 0\overset{m}{.}7$ среднегодовые показатели цвета $B-V$ были переведены в $T_{\rm eff}$ с использованием зависимости $(B-V)$–$T_{\rm eff}$ для нормальных сверхгигантов из работы Флауэра (1996). Кроме того, мы получили $T_{\rm eff}$, используя соотношение $(V-K)$–$T_{\rm eff}$ из работы Бесселя и др. (1998). На рис. 12 приведены графики изменения температуры со временем. $T_{\rm eff}$ показывает явный ход: повышение, начиная с первых наблюдений в 1990 г. ($\sim$5500 K), до максимального значения в 2001–2003 гг. ($\sim$6000 K), и в дальнейшем понижение до $\sim$5300 K. Обращает внимание тот факт, что данные, полученные по оптическим наблюдениям, и оценки с использованием ИК-данных (величин K) расходятся после 2014 г.

Эффективная температура звезды, полученная нами по данным оптической и ИК-фотометрии, несколько ниже определенной по спектральным наблюдениям. Это может быть связано как с тем, что "фотометрическая" температура отражает состояние так называемой "псевдофотосферы", т.е. той области в ветре звезды, где формируется наблюдаемое континуальное излучение, а "спектральная" относится к зоне формирования соответствующих абсорбций, так и с возможным недоучетом поглощения света. Если принять для звезды $E(B-V) = 1\overset{m}{.}0$, то "фотометрические" и "спектральные" температуры придут в соответствие. Нужно сказать, что поглощение света для HD 179821 оценивалось неоднократно, и величина A_V у разных авторов варьируется в пределах от 1^m до 4^m (Потташ, Партасарати, 1988; Редди, Гривняк, 1999; Архипова и др., 2001; Архипова и др., 2009).

Мы оценили также среднегодовые видимые болометрические величины V1427 Aql $m_{\rm bol} = V - A(V) + BC(V)$ и $m_{\rm bol} = K - A(K) + BC(K)$, используя болометрические поправки $BC(V)$ и $BC(K)$ из работы Бесселя и др. (1998) и принимая $A(V) = 3.1 \times E(B-V)$ и $A(K) = 0.28 \times E(B-V)$ (Курниеф, 1983). На верхней панели рис. 12 показано изменение $m_{\rm bol}$ со временем. Болометрическая величина меняется в пределах $0\overset{m}{.}3$, что соответствует изменению светимости на $\sim$30%.

По фотометрическим данным получено, что температура фотосферы между 2008 и 2016 гг. понизилась на $\sim$400 K, светимость возросла на $\sim$19%, а радиус в соответствии с законом Стефана-Больцмана увеличился на $\sim$24%.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Многолетние фотометрические наблюдения V1427 Aql показали, что звезда испытывает квазипериодические колебания вместе с долговременным трендом блеска и цвета. Спектральные и фотометрические данные свидетельствуют об изменении параметров звезды за короткий интервал времени.

Попытаемся объяснить эти изменения в рамках предположений о природе объекта.

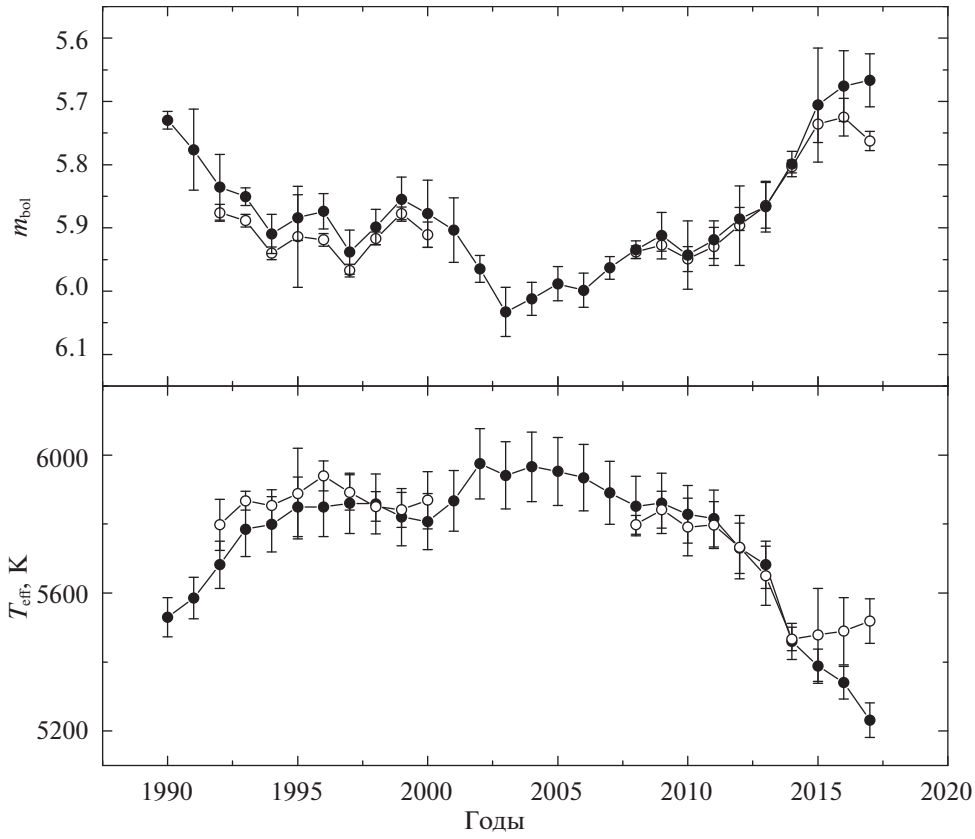


Рис. 12. Изменение эффективной температуры и болометрической величины V1427 Aql со временем. На нижнем рисунке точки, соединенные линией, — оценки $T_{\rm eff}$, полученные с использованием зависимости $(B-V)$–$T_{\rm eff}$ для нормальных сверхгигантов из работы Флауэра (1996). Открытые кружки — оценки $T_{\rm eff}$ из соотношения $(V-K)$–$T_{\rm eff}$ Бесселя и др. (1998). На верхнем рисунке точками обозначены болометрические величины $m_{\rm bol} = V - A(V) + BC(V)$, открытыми кружками — болометрические величины $m_{\rm bol} = K - A(K) + BC(K)$.

Звезда прошла значительный путь своей эволюции, о чем свидетельствует наличие вокруг нее обширной, почти сферической газопылевой оболочки. Распределение энергии в спектре V1427 Aql в диапазоне $\lambda\lambda 0.4$–100 мкм имеет "двугорбый" вид, характерный для post-AGB объектов (Потташ, Партасарати, 1988; Гривняк и др., 1989). Основные вкладчики в излучение — фотосфера звезды и холодная пылевая оболочка с температурой $T_d = 128$ K (Оденвальд, 1986).

Согласно теоретическим расчетам, звезды малой и средней массы после стадии асимптотической ветви гигантов (AGB) продолжают свою эволюцию при постоянной светимости, перемещаясь в область более горячих звезд. Новые фотометрические и спектральные наблюдения V1427 Aql показали, что в последние годы происходило быстрое охлаждение фотосферы, рост светимости звезды и увеличение характерного времени квазипериодических колебаний, что никак не согласуется с теоретическим эволюционным треком post-AGB объекта.

Одним из весомых аргументов в пользу post-AGB природы V1427 Aql являлся химсостав звезды, полученный в работах Зача и др. (1996), Редди и Гривняка (1999), Тевенина и др. (2000), Киппера (2008). Авторы обнаружили избыточное по отношению к Солнцу содержание углерода, кислорода, азота и элементов s-процесса, что является типичным для post-AGB объектов. Однако в недавней работе Сахина и др. (2016) утверждается, что атмосфера звезды не обогащена элементами s-процесса, а оценки светимости, эффективной температуры и поверхностной гравитации свидетельствуют о том, что HD 179821 является массивной звездой на пути к красным сверхгигантам и со временем станет сверхновой типа II.

Имеются и другие признаки того, что V1427 Aql может быть массивным объектом повышенной светимости, на которые не раз обращалось внимание в более ранних работах. Так, например, высокая ско-

рость расширения CO оболочки $V_{\rm exp} = 33.9$ км/с (Цукерман, Дейк, 1986) заметно больше величины 10–15 км/с, типичной для post-AGB звезд. Эквивалентная ширина ИК-триплета OI λ7774 Å в спектре V1427 Aql составляет по разным оценкам от 2.3 до 3.0 Å, этому значению соответствуют абсолютная звездная величина $M_{\rm bol} < -8\overset{m}{.}0$ и светимость $L > 10^5 L_\odot$. С таким значением светимости и ее температурой звезда попадает на диаграмме Гершпрунга–Рессела в область, занимаемую желтыми гипергигантами. Область желтых гипергигантов ограничена со стороны высоких температур так называемым Желтым эволюционным провалом (Yellow Evolutionary Void), впервые предложенной и описанной Ньювенхузеном и де Джагером (1995). В этой фазе эволюции происходят события крупномасштабной потери массы, в результате которых звезды испытывают неоднократные движения в голубую и в красную части диаграммы Гершпрунга–Рессела при почти постоянной болометрической светимости. После того, как звезда эволюционирует от RSG и достигает температуры около 7000 K, происходит большая потеря массы, звезда окружается холодной фотосферой и начинает свое движение в область красных сверхгигантов, а после просветления оболочки возвращается в голубую часть диаграммы Гершпрунга–Рессела (Одмайер и др., 2009). Фотометрическое поведение V1427 Aql вполне укладывается в эту концепцию.

Сравним V1427 Aql с другими, хорошо изученными гипергигантами — ρ Cas, V509 Cas, V1302 Aql. Все эти звезды показывают значительные изменения спектров и звездных параметров.

У наиболее известного объекта — мощного источника ИК-излучения IRC+10 420 (V1302 Aql) обнаружены повышение эффективной температуры на ∼1000 K за 20 лет с начала 70-х годов прошлого столетия (Одмайер и др., 1996) и изменение спектрального класса от F (Хамфрис и др., 1973) до A5 (Одмайер и др., 1996; Клочкова и др., 1997; Клочкова и др., 2002). Было показано, что температура звезды росла с темпом около 120 K в год, вследствие чего звезда приближалась к стадии Вольфа–Райе (Клочкова и др., 2002; Хамфрис и др., 2002). Продолжая спектральный мониторинг V1302 Aql в 2001–2014 гг., Клочкова и др. (2016) пришли к выводу о том, что гипергигант вошел в фазу замедления (или прекращения) роста эффективной температуры и на диаграмме Гершпрунга–Рессела находится вблизи высокотемпературной границы Желтого провала.

Значительные изменения блеска и спектра иного характера, чем у V1302 Aql, показала и другая звезда — прототип класса желтых гипергигантов ρ Cas (Халбедел, 1991). За последние сто лет у звезды наблюдалось три эпизода крупномасштабной потери массы: в 1945–1947, в 1985–1986 и в 2000–2001 гг., последний из которых подробно описан в работе Лобела и др. (2003). В период с июня по сентябрь 2000 г. блеск звезды упал почти на 1^m, а к апрелю 2001 г. звезда вышла из минимума. Летом 2000 г. в спектре звезды появились полосы TiO, модельные спектры показали понижение температуры, по крайней мере, на 3000 K, а скорость потери массы в этом эпизоде оценивается в $\dot{M} \simeq 5.4 \times 10^{-2} M_\odot$. В ходе так называемых “shell episodes” звезда особенно интенсивно теряет вещество и на несколько сотен дней укутывается выброшенным холодным веществом, образующим псевдофотосферу. Клочкова и др. (2014) детально изучили особенности оптического спектра и выявили особенности кинематического состояния протяженной атмосферы звезды.

Для V509 Cas фотометрическая история прослежена за полтора века (Жольдош, 1986a; Перси, Жольдош, 1992; Халбедел, 1993; Ньювенхузен и др., 2012). У V509 Cas наблюдалось монотонное изменение блеска и показателей цвета (Перси, Жольдош, 1992; Ньювенхузен и др., 2012). В работе Ньювенхузена и др. (2012) показано, что эффективная температура, $\log g$, радиус и светимость звезды значительно менялись со временем. Вариации $\log g$ и турбулентной скорости ξ_t свидетельствуют о том, что звезда претерпела ряд последовательных выбросов газа. Во время каждого выброса псевдофотосфера характеризуется меньшими значениями g и более высокой турбулентной скоростью ξ_t. После дисперсии в пространство сброшенных оболочек и после перестройки атмосферы звезды наблюдается более горячая и более компактная фотосфера.

Рассмотрим пульсационную активность упомянутых здесь звезд.

Данных о периодических изменениях блеска V1302 Aql нет, у объекта наблюдаются лишь монотонные долговременные тренды блеска.

V509 Cas испытывает квазипериодические колебания с периодом около $400^{\rm d}$ и амплитудой до $0\overset{m}{.}2$ (Жольдош, 1986b). Перси и Жольдош (1992) обнаружили три пика в спектре мощности ($203\overset{\rm d}{.}3$, $299\overset{\rm d}{.}2$ и $385\overset{\rm d}{.}4$) и уменьшение амплитуды фундаментальной моды вместе с поголубением $B - V$.

Переменная звезда ρ Cas, кроме упомянутых выше ослаблений блеска более чем на 1^m, показывает квазипериодические колебания с меньшей амплитудой. Арельяно Ферро (1985) нашел период $483\overset{\rm d}{.}5$ по наблюдениям с 1964 по 1981 г.

У объекта нашего исследования — V1427 Aql — обнаружены квазипериодические колебания блеска с периодами от 170 до 200 сут, а также увеличение характерного времени и амплитуды изменения

блеска в последние годы. Звезда испытывает как температурные колебания, так и изменения блеска без заметных вариаций цвета.

В работе, посвященной теоретическим расчетам пульсационной неустойчивости желтых гипергигантов, Фадеев (2011) упомянул V1427 Aql как объект, который не может быть гипергигантом, поскольку, во-первых, периоды колебаний звезды превосходят верхнее предельное значение для периодов радиальных пульсаций желтых гипергигантов, и, во-вторых, средняя эффективная температура звезды $T_{\rm eff} = 6750$ K (Киппер, 2008) соответствует области пульсационной устойчивости. На основании этого автор предлагает отнести V1427 Cyg к post-AGB объектам.

Однако периоды колебаний известных post-AGB звезд в широком диапазоне спектральных классов от F0 до G5 не превышают 150 сут (Архипова и др., 2003; Архипова и др., 2010; Гривняк и др., 2010; Гривняк и др., 2015). А кроме того, истинные гипергиганты ρ Cas и V509 Cas испытывают колебания с периодами $>200^{\rm d}$ при $T_{\rm eff}$, для которых радиальные пульсации запрещены теорией. Ареллано Ферро (1985) предположил, что колебания ρ Cas и V509 Cas вызваны нерадиальными пульсациями. Возможно, этот же механизм является причиной квазипериодической переменности V1427 Aql.

Итак, анализ фотометрической и спектральной переменности V1427 Aql показал, что звезда своим поведением напоминает желтые гипергиганты вблизи крайне нестабильной области Желтого провала и заметно отличается от типичных post-AGB объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новые фотометрические и спектральные наблюдения желтого сверхгиганта с газопылевой оболочкой V1427 Aql и сравнение их с архивными данными позволили получить следующие результаты.

1. По наблюдениям в UBV-полосах за 2009–2011 гг. обнаружены периоды колебаний $P = 170^{\rm d}$ и $P = 141^{\rm d}$ (или $P = 217^{\rm d}$). Показано, что после 2011 г. колебания стали менее правильными, характерное время изменения блеска увеличилось и составило в 2012–2014 гг. около 260 сут, а в период с 2015 по 2017 г. возросло до 370 сут.

2. Обнаружено, что среднегодовой блеск звезды в полосах V, J, K в 2009–2015 гг. систематически повышался, тогда как в U и B падал. Среднегодовые показатели цвета $U-B$, $B-V$, $J-K$ увеличивались (звезда краснела). В 2016–2017 гг. повышение блеска в ближнем ИК-диапазоне остановилось и наметилась тенденция к поголубению звезды, тогда как в оптическом диапазоне звезда продолжала краснеть.

3. Показано, что вековой ход показателей цвета отражает изменение температуры фотосферы — повышение с 1990 по 2002 г. и затем систематическое уменьшение. Долговременная переменность болометрической звездной величины не согласуется с предположением о быстрой эволюции звезды при постоянной светимости, а по-видимому, связана с эпизодами потери массы, в результате которых увеличивается оптическая толща протяженной оболочки звезды и излучение в непрерывном спектре формируется в более высоких и холодных слоях.

4. Сравнение спектральных наблюдений V1427 Aql за 2016–2017 гг., с данными 1994–2008 гг. показало усиление абсорбций BaII, линий ИК-триплета CaII и ослабление бленды ИК-триплета OI. Эти изменения можно объяснить уменьшением эффективной температуры звезды в зоне образования этих линий.

Дальнейшие фотометрические и спектральные наблюдения столь быстро меняющегося объекта чрезвычайно важны. Необходимо проводить фотометрический и спектральный мониторинг звезды без существенных пропусков.

При проведении исследований были использованы базы данных ADS, SIMBAD, VIZIER.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арельяно Ферро (A. Arellano Ferro), MNRAS **216**, 571 (1985).
2. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Письма в Астрон. журн. **19**, 436 (1993) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **19** (1993)].
3. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Носкова Р.И., Сокол Г.В., Шугаров С.Ю., Письма в Астрон. журн. **27**, 187 (2001) [V. P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **27**, 156 (2001)].
4. Архипова В.П., Носкова Р.И., Иконникова Н.П., Комиссаров Г.В., Письма в Астрон. журн. **29**, 545 (2003) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **29**, 480 (2003)].
5. Архипова В.П., Есипов В.Ф., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Татарников А.М., Юдин Б.Ф., Письма в Астрон. журн. **35**, 846 (2009) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **35**, 764 (2009)].
6. Архипова В.П., Иконникова Н.П., Комиссарова Г.В., Письма в Астрон. журн. **36**, 281 (2010) [V.P. Arkhipova et al., Astron. Lett. **36**, 269 (2010)].
7. Байдельман (W.P. Bidelman), Astron. J. **86**, 553 (1981).
8. Баскомб (W. Buscombe), *MK Spectral Classification, Sixth General Catalog* (Evanston: Northwestern Univer., 1984).
9. Бессель и др. (M. S. Bessell, F. Castelli, and P. Planesas), Astron. Astrophys. **333**, 231 (1998).

10. ван дер Вин и др. (W.E.C.J. van der Veen, H.J. Habing, and T.R. Geballe), Astron. Astrophys. **226**, 108 (1989).
11. ван Лювен (F. van Leeuwen) Astron. Astrophys. **474**, 653 (2007).
12. 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).
13. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, S. Kwok, and K.M. Volk), Astrophys. J. **346**, 265 (1989).
14. Гривняк (B.J. Hrivnak), *Torun Workshop "post-AGB Objects as a Phase of Stellar Evolution"* (Ed. R. Szczerba, S. K. Górny, Astroph. Space Sci. Library, 265 (Kluwer Academic Publ.), 101 (2001).
15. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, W. Lu, R.E. Maupin, and B.D. Spitzbart), Astrophys. J. **709**, 1042 (2010).
16. Гривняк и др. (B.J. Hrivnak, W. Lu, and K.A. Nault), Astron. J. **149**, 184 (2015).
17. Джонсон и др. (H.L. Johnson, R.I. Mitchel, B. Iriarte, and W.Z. Wisniewski), Comm. Lunar and Planet. Lab. **4**, 99 (1966).
18. Джосселин, Лебре (E. Josselin and A. Lebre), Astron. Astrophys. **367**, 826 (2001).
19. Джура и др. (M. Jura, T. Velusamy, and M.W. Werner), Astrophys. J. **556**, 408 (2001).
20. Диминг (T. J. Deeming), Astrophys. Space Sci. **36**, 137 (1975).
21. Жольдош (E. Zsoldos), The Observatory **106**, 156 (1986a).
22. Жольдош (E. Zsoldos), I.A.U. Symp. No. 116 (Reidel Publ. Co., Dordrecht, 1986b), p. 87.
23. Зач и др. (L. Zacs, V.G. Klochkova, V.E. Panchuk, and R. Spelmanis), MNRAS **282**, 1171 (1996).
24. Кастнер, Вайнтрауб (J.H. Kastner and D.A. Weintraub), Astrophys. J. **452**, 833 (1995).
25. Кинан, Мак Нейл (P.C. Keenan and R.C. McNeil), Astrophys. J. Suppl. Ser. **71**, 245 (1989).
26. Киппер (T. Kipper), Baltic Astronomy **17**, 87 (2008).
27. Клочкова и др. (V. Klochkova, E.L. Chentsov, and V. Panchuk), MNRAS **292**, 19 (1997).
28. Клочкова В.Г., Юшкин М.В., Ченцов Е.Л., Панчук В.Е., Астрон. журн. **79**, 158 (2002).
29. Клочкова В.Г., Астрофиз. бюлл. **69**, 297 (2014).
30. Клочкова В.Г., Панчук В.Е., Таволжанская Н.С., Усенко И.А., Астрон. журн. **91**, 123 (2014).
31. Клочкова и др. (V.G. Klochkova, E.L. Chentsov, A.S. Miroshnichenko, V.E. Panchuk, and M.V. Yushkin), MNRAS **459**, 4183 (2016).
32. Ковтюх и др. (V.V. Kovtyukh, N.I. Gorlova, and S.I. Belik), MNRAS **423**, 3268 (2012).
33. Корниотис и др. (M. Kourniotis, A.Z. Bonanos, W. Yuan, L.M. Macri, D. Garcia-Alvarez, and C.-H. Lee), Astron. Astrophys. **601**, 21 (2017).
34. Короллер и др. (H. Coroller, A. Lébre, D. Gillet, and E. Chapellier), Astron. Astrophys. **400**, 613 (2003).
35. Курниеф (J. Koornneef), Astron. Asrophys. **128**, 84 (1983).
36. Ленц, Брегер (P. Lenz and M. Breger), Communications in Asteroseismology **146**, 53 (2005).
37. Лобел и др. (A. Lobel, A.K. Dupree, R.P. Stefanik, G. Torres, G. Israelian, N. Morrison, C. de Jager, H. Nieuwenhuijzen, I. Ilyin, and F. Musaev), Astrophys. J. **583**, 923 (2003).
38. Лютый В.М., Сообщ. ГАИШ № 172, 30 (1971).
39. Мантегацца (L. Mantegazza), Astron. Astrophys. Suppl. Ser. **88**, 255 (1991).
40. Ньювенхузен, де Джагер (H. Nieuwenhuijzen and C. de Jager), Astron. Astrophys. **302**, 811 (1995).
41. Ньювенхузен и др. (H. Nieuwenhuijzen, C. De Jager, I. Kolka, G. Israelian, A. Lobel, E. Zsoldos, A. Maeder, and G. Meynet), Astron. Astrophys. **546**, A105 (2012).
42. Оденвальд (S.F. Odenwald), Astrophys. J. **307**, 714 (1986).
43. Одмайер и др. (R.D. Oudmaijer, M.A.T. Groenewegen, H.E. Matthews, J.A.D.L. Blommaert, and K.C. Sahu), MNRAS **280**, 1062 (1996).
44. Одмайер и др. (R.D. Oudmaijer, B. Davies, W.-J. de Wit, and M. Patel), The Biggest, Baddest, Coolest Stars ASP Conference Series, Vol. 412, proceedings of the workshop held 16-18 July 2007, at the Millennium Centre, Johnson City, Tennessee, USA. Edited by Donald G. Luttermoser, Beverly J. Smith, and Robert E. Stencel. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, p.17 (2009).
45. Перейра, Миранда (C.B. Pereira and L.F. Miranda), Astron. Astrophys. **462**, 231 (2007).
46. Перси, Жольдош (J.R. Percy and E. Zsoldos), Astron. Astrophys. **263**, 123 (1992).
47. Пиклес (A.J. Pickles), Publ. Astron. Soc. Pacific **110**, 863 (1998).
48. Потташ, Партасарати (S.R. Pottasch and M. Parthasarathy), Astron. Astrophys. **192**, 182 (1988).
49. Пули (D. Pooley), Thesis, University of Canterbury (2003).
50. Редди, Гривняк (B.E. Reddy and B.J. Hrivnak), Astron. J. **117**, 1834 (1999).
51. Самусь Н.Н, Казаровец Е.В., Дурлевич О.В., Киреева Н.Н., Пастухова Е.Н., Астрон. журн. **60** (2017).
52. Сахин и др. (T. Şahin, D.L. Lambert, V.G. Klochkova, and V.E. Panchuk), MNRAS **461**, 4071 (2016).
53. Санчес Контрерас и др. (C. Sánchez Contreras, R. Sahai, A. Gil de Paz, and R. Goodrich), Astrophys. J. Suppl. Ser. **179**, 166 (2008).
54. Сенарро и др. (A.J. Cenarro, P.N. Cardiel, J. Gorgas, R.F. Peletier, A. Vazdekis, and F. Prada), MNRAS **326**, 959 (2001).
55. Сенарро и др. (A.J. Cenarro, J. Gorgas, N. Cardiel, A. Vazdekis, and R.F. Peletier,), MNRAS **329**, 863 (2002).
56. Сергеев, Хайсбергер (S.G. Sergeev and F. Heisberger), A Users Manual for SPE. Wien (1993).
57. Страйжис В.Л., *Многоцветная фотометрия звезд* (Вильнюс: Мокслас, 1977).

58. Суарес и др. (O. Suarez, J.F. Gomez, and O. Morata), Astron. Astrophys. **458**, 173 (2006).
59. Тамура, Такеути (S. Tamura and M. Takeuti), Inform. Bull. Var. Stars №3561 (1991).
60. Тевенин и др. (F. Thévenin, M. Parthasarathy, and G. Jasniewicz), Astron. Astrophys. **359**, 138 (2000).
61. Фадеев Ю.А., Письма в Астрон. журн. **37**, 440 (2011) [Yu.A. Fadeyev, Astron. Lett. **37**, 403 (2011)].
62. Фергюсон, Уета (B.A. Ferguson and T. Ueta), Astrophys. J. **711**, 613 (2010).
63. Флауэр (P.J. Flower), Astrophys. J. **469**, 355 (1996).
64. Фольк, Квок (K.M. Volk and S. Kwok), Astrophys. J. **342**, 345 (1989).
65. Халбедел (E.M. Halbedel), Inform. Bull. Var. Stars №3616, 1 (1991).
66. Халбедел (E.M. Halbedel), Inform. Bull. Var. Stars №3849, 1 (1993).
67. Хамфрис и др. (R.M. Humphreys, D.W. Strecker, T.L. Urdock, and F.J. Low), Astrophys. J. **179**, L49 (1973).
68. Хамфрис и др. (R.M. Humphreys, K. Davidson, and N. Smith), Astron. J. **1724**, 1026 (2002).
69. Хоук, Свифт (N. Houk and C. Swift), Michigan catalogue of two-dimensional spectral types for the HD Stars; vol. 5. By Nancy Houk and Carrie Swift. Ann Arbor, Michigan: Department of Astronomy, University of Michigan, 1999.
70. Цукерман, Дейк (B. Zuckerman and H.M. Dyck), Astrophys. J. **311**, 345 (1986).
71. Шенаврин В.И., Таранова О.Г., Наджип А.Э., Астрон. журн. **88**, 34 (2011) [V.I. Shenavrin et al., Astron. Rep. **55**, 31 (2011)].