

УДК 524.31.01-355

## ЕДИНСТВО И РАЗНООБРАЗИЕ СЕМЕЙСТВА ЖЕЛТЫХ ГИПЕРГИГАНТОВ

© 2019 В. Г. Клочкова<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия

Поступила в редакцию 8 августа 2019 года; после доработки 24 августа 2019 года; принята к публикации 24 августа 2019 года

Обобщены результаты многолетнего спектрального мониторинга с разрешением  $R \geq 60\,000$  желтых гипергигантов (YHG) северной полушеры. В спектрах этих F–G звезд предельной светимости, компактно расположенных в верхней части диаграммы Герцшпрунга–Рессела, найдено разнообразие спектральных особенностей: различные типы профиля H $\alpha$ , наличие (или отсутствие) запрещенных и разрешенных эмиссий, а также оболочечных компонентов. Изучена переменность спектральных деталей различной природы. Определены абсолютная светимость, скорость расширения околозвездных оболочек, амплитуда пульсаций. Подтверждена достоверность статуса YHG для V1427 AqI; зафиксированы проявления значительной динамической нестабильности верхних слоев атмосферы  $\rho$  Cas после выброса 2017 г. и расслоение ее газовой оболочки; доказано отсутствие компаньона в системе гипергиганта V509 Cas; сделан вывод о приближении гипергиганта V1302 AqI к низкотемпературной границе Желтого Войда.

Ключевые слова: массивные звезды — эволюция — гипергиганты — протяженные атмосферы — нестабильность — пульсации — оболочки

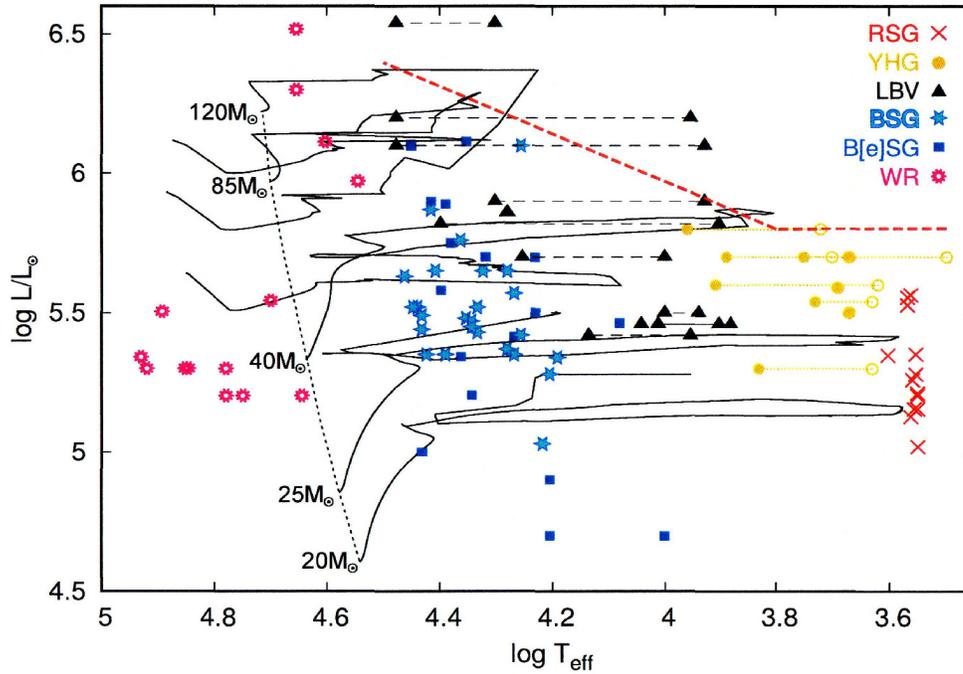
### 1. ВВЕДЕНИЕ

Верхнюю часть диаграммы Герцшпрунга–Рессела (далее — ГРД), вблизи предела Хэмфрис–Дэвидсона [1], заселяют самые массивные звезды на далеких стадиях эволюции: яркие голубые переменные (LBV), звезды Вольфа–Райе, сверхгиганты с феноменом B[e], гипергиганты и другие нестабильные звезды высокой светимости (далее — ЗВС) с эмиссиями в спектрах. В ходе своей предшествующей эволюции эти звезды теряли массу за счет спокойного истечения и за счет звездного ветра, темп которого в некоторые фазы достигает критических значений, переходя в режим сброса поверхностных слоев вещества. Эти звезды с исходной массой на Главной последовательности в интервале  $20\text{--}60 M_{\odot}$ , находясь на продвинутой стадии эволюции после стадии красных сверхгигантов и потеряв значительную долю своей массы, обладают протяженными истекающими атмосферами и структурированными газопылевыми оболочками, наличие которых проявляется прежде всего в комплексном характере распределения энергии (SED), а также в особенностях оптических, ИК- и радиоспектров [2]. На рис. 1 показано положение основных групп массивных проэволюционировавших звезд разных масс, которые будут рассмотрены или упомянуты в тексте:

красные сверхгиганты (RSGs), желтые гипергиганты (YHG), LBV, голубые сверхгиганты (BSGs), горячие сверхгиганты с феноменом B[e]SG, звезды Вольфа–Райе (WR). Наглядно представляет заселенность звездами перечисленных типов верхняя часть ГРД у звездного населения галактик M31 и M33 [3]. Здесь хорошо видна ограниченность выборки YHG по сравнению с количеством их непосредственных предшественников — RSGs. Вероятные ближайшие потомки желтых гипергигантов располагаются в областях ГРД, заселенных горячими сверхгигантами различных типов (BSG, B[e]SG, LBV пониженной светимости).

В данной статье основное внимание уделяется группе динамически нестабильных F–G звезд экстремально высокой светимости, обладающих специфическими особенностями спектров. Нестабильность проявляется в пульсациях, звездном ветре с высоким темпом потери вещества (типичные значения  $dM_{\odot}/dt$  см. в таблице 1), а также в рекуррентных эпизодах сброса больших масс вещества, что приводит к временному снижению блеска звезды и изменению ее спектрального класса. Совокупность этих особенностей позволила выделить эти звезды в малочисленное семейство желтых гипергигантов. Термин «желтые гипергиганты» принят [2] взамен менее удобного термина сверхсверхгиганты. В качестве названия

\*E-mail: valenta@sao.ru



**Рис. 1.** Основные фазы далеко проэволюционировавших массивных звезд на ГРД. Рисунок публикуется с разрешения М. Крауз, Астрономический институт Ондржейов, Чехия (Credit: M. Kraus, Astronomical Institute Ondrejov, Czech Republic).

**Таблица 1.** Избранные параметры рассматриваемых YHGс: темп потери массы  $dM_{\odot}/dt$ , наличие околозвездного диска, по данным [4] на основе наличия эмиссий [O I] и [Ca II]; расстояние, соответствующее параллаксу из [5].

Звезда	ИК источник	$\lg(dM_{\odot}/dt), M_{\odot} \text{ год}^{-1}$	Наличие диска	$d$ , кпк
V1427 Aql	RAFGL 2343 / IRAS 19114+0002	от $-2.5$ до $-4.3$ [6]	+ [6]	$3.22 \pm 0.16$
$\rho$ Cas	RAFGL 3173 / IRAS 23518+5713	$-4.85$ [2]	+ [4]	$1.05 \pm 0.21$
V509 Cas	IRC+60379 / IRAS 22579+5640	$-4.92$ [2]	+ [4]	$4.81 \pm 0.43$
V1302 Aql	IRC+10420 / IRAS 19244+1115	$-3.30$ [2]	+ [7]	$1.72 \pm 0.28$

этих объектов порой используется и термин «холодные гипергиганты» [8]. Согласно современным представлениям об эволюции массивных звезд, эту стадию заселяют звезды с исходной массой в интервале около  $20\text{--}40 M_{\odot}$  [2, 9]. После выгорания водорода в ядре массивная звезда большую часть дальнейшего существования проводит в стадии сверхгигантов, светимость которых обеспечивается горением гелия в ядре. Интерес к этим объектам обусловлен, в частности, тем, что наблюдаемые особенности, фиксируемые в основном за счет долговременного мониторинга этих быстро эволюционирующих объектов, служат источником сведений для тестирования моделей эволюции массивных звезд и химического состава в Галактике. Понимание этих заключительных фаз эволюции

массивных звезд важно и в проблеме предшественников сверхновых (см. статью [10]).

В настоящее время в Галактике отождествлено менее десятка желтых гипергигантов, все они перечислены в обзоре [2]. Малочисленность YHGс обусловлена низкой продолжительностью данной эволюционной фазы: де Ягер [2] указывал характерную длительность ниже  $10^5$  лет, позже Массей [11] привел крайне низкую характерную длительность, измеряемую лишь тысячами лет, т.е. около  $0.01\%$  всей жизни массивной звезды. На ГРД желтые гипергиганты, имеющие светимость  $\lg L/L_{\odot} = 5\text{--}6$  (класс светимости по МК-классификации  $Ia^+$ ), занимают ограниченную область вблизи предела светимости [12]. Помимо экстремально высокой светимости специфическим

свойством YNGs являются их внутренняя динамическая нестабильность [13]. Нестабильность, проявляющаяся в пульсациях и в многократных эпизодах сброса гигантских масс вещества, обеспечивает формирование мощной и структурированной околосветной газопылевой оболочки. Изменения оптической толщи оболочки проявляются в зигзагообразном прохождении положения звезды на ГРД, что наблюдалось, к примеру, у звезды V509 Cas [12]. Ожидаемым для столь массивных звезд является обнаружение в атмосферах YNGs больших избытков азота и натрия [14–16], синтез и вынос в приповерхностные слои атмосферы которых происходят на предшествующих этапах эволюции массивных звезд.

В данной работе сопоставлены наблюдаемые различия спектральных и кинематических особенностей, а также их поведение во времени у четырех желтых гипергигантов северной полусферы, перечисленных в таблице 1. В разделе 2 кратко описаны методы наблюдений и анализа данных. В разделе 3 мы приводим полученные результаты, сопоставляя их с ранее опубликованными, в разделе 4 приводим выводы.

## 2. СВЕДЕНИЯ О СПЕКТРАЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ

Многолетний спектральный мониторинг четырех YNGs проведен с эшелльным спектрографом НЭС [17, 18], размещенным в фокусе Нэсмита 6-м телескопа БТА Специальной Астрофизической Обсерватории РАН. Спектрограф НЭС оснащен крупноформатной ПЗС-матрицей размером  $2048 \times 2048$  (в последние годы ПЗС  $4608 \times 2048$ ) элементов и снабжен резателем изображения на три среза, что уменьшает световые потери без потери спектрального разрешения. Каждый спектральный порядок на изображении повторяется трижды, со смещением вдоль дисперсии эшелл-решетки [18]. Спектральное разрешение составляет  $\lambda/\Delta\lambda \geq 60\,000$ , отношение сигнала к уровню шумов  $S/N > 100$  для всех использованных в данной работе спектров.

Экстракция одномерных данных из двумерных эшелл-спектров выполнена с помощью модифицированного с учетом особенностей эшелл-кадров спектрографа контекста ECHELLE комплекса программ MIDAS (см. детали в работе [19]). Удаление следов космических частиц проводилось медианным усреднением двух эшелл-спектров, полученных последовательно один за другим. Калибровка по длинам волн осуществлялась по спектрам Th–Ag лампы с полым катодом. Вся дальнейшая обработка, включающая фотометрические и позиционные измерения, выполнена с помощью современной версии программы DECH20t [20].

Отметим, что эта традиционно используемая нами программа обработки спектров позволяет измерять лучевые скорости для отдельных деталей профилей линий. В статье используются только гелиоцентрические значения скоростей  $V_r$ , систематические ошибки которых, оцененные по резким межзвездным компонентам Na I, не превышают  $0.25 \text{ км с}^{-1}$  (по одной линии); случайная ошибка для неглубоких абсорбций около  $0.7 \text{ км с}^{-1}$  — среднее значение на одну линию.

Спектральный мониторинг V1427 Aql выполнен на двух телескопах: на 6-м телескопе в сочетании со спектрографом НЭС и на 2.7-м рефлекторе обсерватории McDonald с куде-эшелл-спектрографом. Как следует из сопоставления в работе [16], полученный на двух телескопах материал однороден по спектральному разрешению. Подробное отождествление деталей в спектре V1302 Aql опубликовано на основе спектрального атласа [21], в котором детально сопоставлены спектры V1302 Aql и сверхгиганта MWC 314 с феноменом B[e]. Отождествление деталей в спектрах V509 Cas, V1427 Aql и  $\rho$  Cas проведено с использованием опубликованного ранее спектрального атласа для F–G звезд [22] и сведений базы данных VALD.

## 3. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЖЕЛТЫХ ГИПЕРГИГАНТОВ

Желтые гипергиганты, рассмотренные в данной статье, перечислены в таблице 1, где указаны наиболее употребляемые для этих звезд имена ассоциированных ИК источников, а также некоторые сведения, необходимые для сравнения этих звезд. Темп потери вещества для V1427 Aql заимствован из работы [6], авторы которой оценили параметр, моделируя эмиссию CO. Далее указано наличие у объекта околосветного диска по данным из [4], на основе наличия в спектре запрещенных эмиссий [Ca II] и [O I]. В последнем столбце этой таблицы для каждой звезды приведено расстояние на основе параллакса по данным DR2 Gaia [5]. Здесь обращают на себя внимание крайне низкие значения расстояния для V1427 Aql,  $\rho$  Cas и V1302 Aql. Удаленность этих звезд, полученная иными методами, значительно выше: около 6 кпк для V1427 Aql согласно авторам [10], около 2.5 кпк для  $\rho$  Cas [8] и до 5–6 кпк для V1302 Aql [7, 23]. Это противоречие служит дополнительным подтверждением ограниченной точности параллакс для звезд с протяженными оболочками [24, 25].

В таблице 2 приведены параметры для YNGs, полученные по спектральным наблюдениям преимущественно на 6-м телескопе БТА. В первой строке этой таблицы указана эквивалентная ширина  $W_\lambda(7773)$  триплета кислорода OI 7773 Å —

**Таблица 2.** Сведения о YNGs, полученные на основе данных оптической спектроскопии: абсолютная величина  $M_V$ , амплитуда пульсаций  $\Delta V_r$ , скорость расширения оболочки  $V_{\text{exp}}$ , микротурбулентная скорость  $\xi_t$ , наличие или отсутствие эмиссии и ее переменность в линиях H $\alpha$ , запрещенных эмиссий [Fe II] и других металлов, эмиссий дублета [Ca II] 7291 и 7324 Å, высоковозбужденных эмиссий [N II]

Объект	V1427 Aql	$\rho$ Cas	V509 Cas	V1302 Aql
Параметр	[16]	[26]	[27]	[28]
$W_\lambda(7773)$ , Å	2.70	1.86	2.35	2.86
$M_V$	$-8^{\text{m}9}$	$-8^{\text{m}0}$	$-8^{\text{m}8}$	$\leq -9^{\text{m}5}$
$\lg L/L_\odot$	5.47	5.11	5.43	5.71
$\Delta V_r$ , км с $^{-1}$	11	$\geq 10$	9	7
$V_{\text{exp}}$ , км с $^{-1}$	$\approx 11$	13–23	33–40	$\approx 40$
$\xi_t$ , км с $^{-1}$	6.6	12		12
	4.76 <sup>1</sup>	11.1 <sup>2</sup>	4.00 <sup>1</sup> ; 11 <sup>2</sup>	7.0 <sup>2</sup>
H $\alpha$ , эмиссия	в крыльях var	в крыльях var	+	+
			var	var
[Fe II], эмиссия	–	–	+	+
[Ca II], эмиссия	+	var <sup>3</sup>	+	+
[N II], эмиссия	–	–	+	–

<sup>1</sup> данные из работы [29]

<sup>2</sup> из [30]

<sup>3</sup> эмиссия [Ca II] присутствует в спектрах  $\rho$  Cas только вблизи минимума блеска

известного критерия светимости для проэволюционировавших F–G звезд. Далее следует абсолютная величина  $M_V$ , соответствующая интенсивности триплета кислорода с применением калибровки [31]. Как и следовало ожидать, светимость всех четырех звезд очень высока и близка к пределу. Использование интенсивности триплета кислорода OI 7773 Å для определения светимости YNGs при наличии данных Gaia обусловлено спецификой исследуемых нами звезд. Высокоточные параллаксы Gaia в таблице 1 могут обеспечить точные расстояния, но для звезд с мощными пылевыми оболочками не обеспечивают необходимой точности в оценках светимости таких звезд. Здесь полезно сослаться на работу [24], в которой проведенное сопоставление данных Gaia и данных радиоспектроскопии VLBI привело авторов к выводу о меньшей точности данных Gaia для звезд с пылевыми оболочками. Точность светимости ограничивается и ненадежностью определения покраснения для звезд с оболочками. Хорошо иллюстрирует сложности в оценке покраснения его детальное изучение для V509 Cas [12].

### 3.1. Нестабильность желтых гипергигантов

Нестабильность гипергигантов проявляется в слабой переменности блеска (с амплитудой около  $0^{\text{m}2}$ – $0^{\text{m}5}$ ), которую обычно относят к пульсационному типу [13], а также в переменности профилей спектральных деталей, формирующихся на различных глубинах атмосферы. В обзоре [2] де Ягер подчеркнул, что порой к гипергигантам относят звезду очень высокой светимости, но принципиальным признаком, отличающим спектр гипергиганта класса светимости Ia<sup>+</sup> от спектра сверхгиганта Ia, являются крупномасштабные движения в атмосфере звезды, проявляющиеся в рекордно больших ширинах абсорбций, а также наличие протяженной оболочки, обусловленной высоким темпом потери вещества. В таблице 2 приведены параметры YNGs, характеризующие динамическую нестабильность их атмосфер: амплитуда пульсаций  $\Delta V_r$ , скорость расширения газовой оболочки  $V_{\text{exp}}$ , а также значения микротурбулентной скорости  $\xi_t$ , полученные на основе однородных спектральных данных в работах, цитируемых

в таблице. Для полноты картины мы привлекли значения  $\xi_t$  из работ [29, 30]. Как следует из таблицы 2, у всех гипергигантов микротурбулентная скорость велика. В случае гипергиганта V1302 Aql, для которого обнаружена аккреция вещества, в таблице 2 приведена ее скорость. Отметим поразительно близкие значения амплитуды пульсаций,  $\Delta V_r \approx 10 \text{ км с}^{-1}$ , оценка которой получена по абсорбциям слабой и умеренной интенсивности, формирующимся в глубоких слоях атмосферы. Здесь уместно вспомнить еще одну проблему в анализе спектров YNGs, а именно вероятную переменность микротурбулентной скорости на разных глубинах в их атмосферах. Этот эффект был впервые обнаружен Боярчуком и др. (см. статью [14] и ссылки в ней) для  $\rho \text{ Cas}$ . Однако последующие исследования не подтвердили этот результат [32].

Будучи столь выделенными по фотометрическим и спектральным свойствам, гипергиганты относятся к звездам, для которых затруднена фиксация эволюционной стадии. Для каждого из них понадобились долговременные исследования, прежде чем удалось достичь определенности в этой задаче. К примеру, V1302 Aql и V1427 Aql долгое время относили к звездам на стадии после асимптотической ветви гигантов, которую заселяют звезды промежуточных масс с исходными массами в интервале  $2-9 M_{\odot}$  на продвинутой стадии эволюции с энергетически инертным ядром и двумя слоевыми источниками ядерного горения. Пройдя долгий эволюционный путь, эти звезды наблюдаются на заключительной фазе перехода к планетарным туманностям и впоследствии к белым карликам, что позволяет называть их протопланетарными туманностями (PPN). Однако данные, полученные для V1302 Aql и V1427 Aql в последние десятилетия различными методами [1, 15, 16, 28, 33-35], позволили прийти к однозначной трактовке статуса этих двух звезд в качестве YNGs. Отметим, что в базе данных SIMBAD для обеих этих звезд осталось указание на принадлежность к звездам post-AGB. А две другие звезды: V509 Cas и  $\rho \text{ Cas}$  — отнесены к долгопериодическим переменным.

Известны и обратные случаи ошибочной классификации ЗВС с ИК избытками. Примером может служить ситуация со звездой V1610 Cyg, отождествляемой с туманностью Egg (= RAFGL 2688). Эту звезду из-за ее высокой светимости, наличия избытка инфракрасного излучения относили к массивным звездам, что было отмечено в обзоре [2]. Фаза протопланетарной туманности для Egg была подтверждена особенностями спектра в радио-, ИК- и оптическом диапазонах спектра, указывающими на обогащение оболочки звезды углеродом [36, 37]. Позже была обнаружена пониженная металличность в атмосфере этой звезды и

аномалии в распространенности химических элементов [38], типичные для стадии PPN.

Ниже, рассматривая индивидуальные особенности спектров YNGs, мы остановимся и на проявлениях спектральной переменности этих объектов.

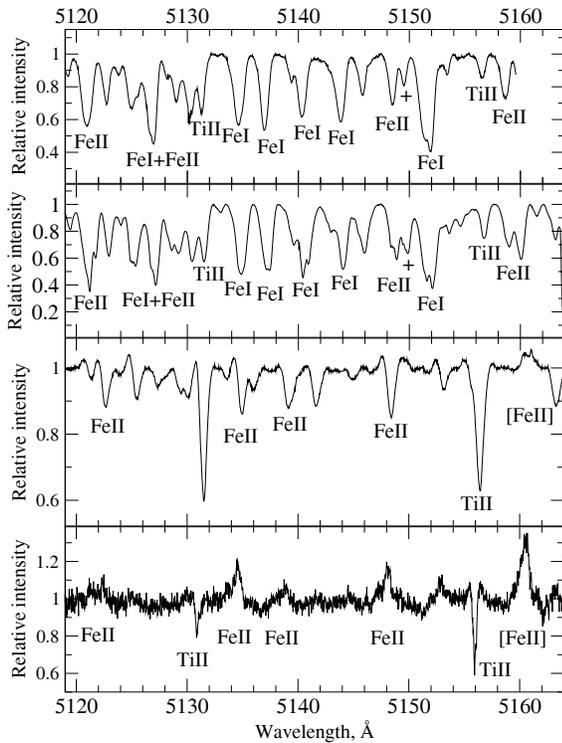
### 3.2. Различия оптических спектров YNGs

При близких фундаментальных параметрах YNGs и при наличии общих основных особенностей в спектрах представителей этого семейства ( $\rho \text{ Cas}$ , V509 Cas, V1302 Aql, HD 179821), достаточно компактно расположенных на ГРД, некоторые наблюдаемые свойства и детали их спектров значительно различаются, что хорошо видно на фрагментах, представленных на рис. 2, 3, 4 и 5. Различия зафиксированы также в разнообразии поведения во времени деталей оптических спектров, что в значительной мере обусловлено особенностями структуры, оптической плотности и кинематики оболочек. Ниже рассмотрим подробнее особенности оптических спектров четырех YNGs северной полусферы, доступных наблюдениям с высоким спектральным разрешением и поэтому наиболее изученных.

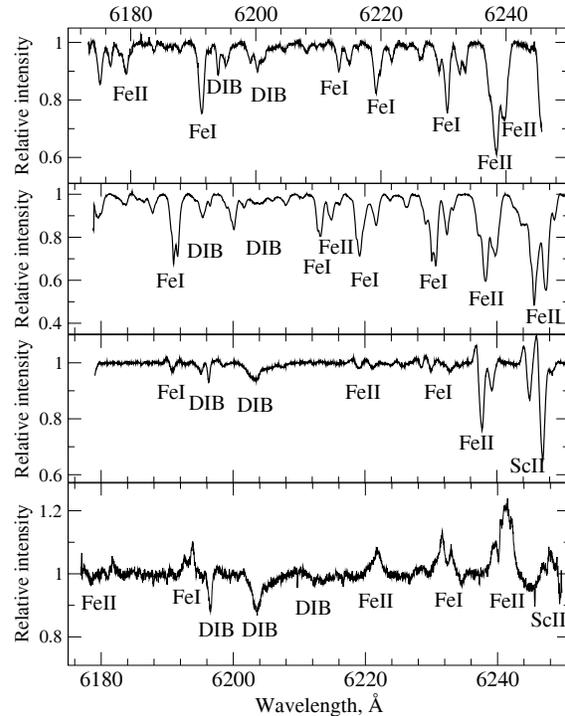
Помимо уже упомянутой большой ширины абсорбций, принципиальной особенностью оптических спектров YNGs является наличие запрещенных эмиссий атомов и ионов, формирующихся в разреженных внешних слоях протяженных атмосфер и в околозвездной среде этих объектов. Эмиссии [O I] и [Ca II], доступные для изучения и по спектрам среднего разрешения, изучены достаточно хорошо (см. [4, 39] и ссылки в этих публикациях). Эти эмиссии зарегистрированы и в наших спектрах в виде однопиковых или же двухпиковых деталей [21, 26-28, 34, 40].

#### 3.2.1. Гипергигант V1302 Aql

Гипергигант V1302 Aql ассоциирован с ярчайшим источником ИК-излучения IRC+10420. В системе этого источника зарегистрировано также излучение OH-мазера [41]. Отметим, что до этого наиболее горячие мазерные источники ассоциировались только со звездами класса M3. В рамках классической интерпретации двухпикового OH-спектра была сделана оценка кинематического расстояния до источника IRC+10420 — 6.8 кпк. Отсюда следовала оценка абсолютной величины ( $M_V < -9^m4$ ), хорошо согласующаяся с нашей оценкой в таблице 2, необычно высокая для сверхгиганта F8I. Для объяснения наличия мазерных источников в окрестностях столь горячего объекта была выдвинута гипотеза об образовании мощной газопылевой оболочки на стадии M-сверхгиганта с последующей быстрой эволюцией IRC+10420 в область



**Рис. 2.** Сопоставление интервала  $\Delta\lambda = 5119\text{--}5164 \text{ \AA}$  в спектрах: HD 179821,  $\rho$  Cas, V509 Cas и V1302 Aql (сверху вниз, в том же порядке, что и в таблице 1). Основные абсорбции фрагмента отождествлены в лабораторных длинах волн. На двух верхних панелях крестиком отмечена абсорбция Na I 5149  $\text{\AA}$ .



**Рис. 3.** То же, что и на рис. 2, но для интервала  $\Delta\lambda = 6170\text{--}6250 \text{ \AA}$ , содержащего DIBs.

более высоких температур на ГРД [42]. Предположение об эволюции звезды подтвердилось позже, на основе наблюдений с высоким спектральным разрешением [28, 34, 43].

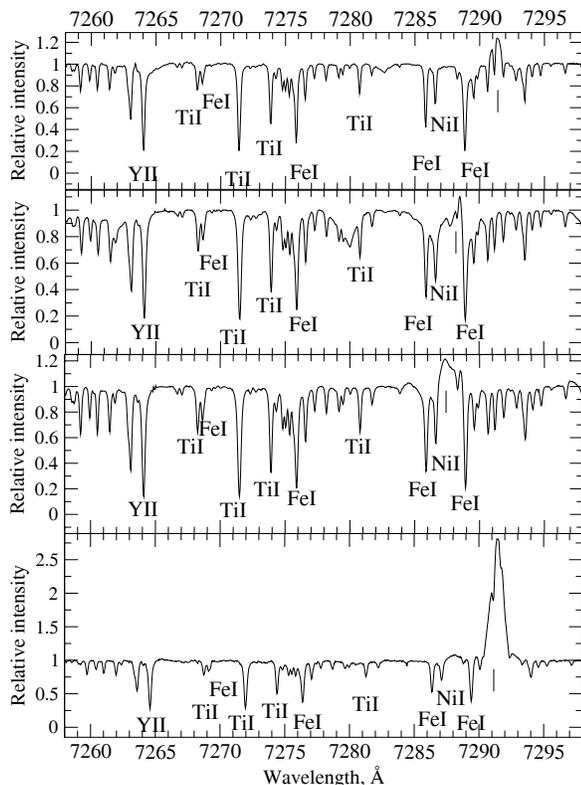
Оптический спектр V1302 Aql насыщен сложными эмиссионно-абсорбционными профилями линий, запрещенными эмиссиями [O I], [Ca II], [Fe II] и других металлов группы железа, а также межзвездными полосами DIBs. Все их разнообразие, от чистых абсорбций, до однопиковых и/или двухпиковых запрещенных и разрешенных эмиссий, хорошо иллюстрируют спектральные фрагменты на рис. 2, 3, 4 и 5 и профили избранных линий на рис. 6 и 7.

На рис. 8 приведены профили  $H\alpha$  в двух спектрах V1302 Aql, полученных в разные годы. В спектре 2014 г. видим типичное для всего 20-летнего периода наблюдений на 6-м телескопе соотношение интенсивностей эмиссионных пиков — коротковолновый пик значительно интенсивнее длинноволнового [34, 45]. Лишь в одну дату наблюдений, 24.11.2007, нами был зафиксирован необычный вид профиля  $H\alpha$ , в котором длинноволновый пик существенно превышает коротковолновый [28].

Сопоставление профилей других деталей в спектрах V1302 Aql за период 2001–2014 гг. указывает на отсутствие их существенной переменности [28].

Один из решающих аргументов, подтверждающий статус массивной далеко проэволюционировавшей ЗВС для V1302 Aql, был получен на основе спектральных данных 6-м телескопа, когда авторы [15] впервые определили химический состав атмосферы V1302 Aql и обнаружили значительный избыток азота. Обогащение звездной атмосферы азотом, синтезированного за счет CNO-процесса в недрах массивной звезды, является принципиальным признаком большой исходной массы звезды. В частности, сильная абсорбция азота, наряду с разрешенными и запрещенными линиями ионов Fe II, содержится в одном из 40 эшелле порядков спектра V1302 Aql, полученном со спектрографом НЭС 12.08.2017 и приведенном на нижней панели рис. 5. Подчеркнем, что позже авторы [46] на основе наблюдений на радиотелескопе IRAM обнаружили в околосредной среде IRC+10420 молекулу окиси азота NO, что подтверждает избыток азота в атмосфере его центральной звезды.

Интерес к гипергиганту V1302 Aql усилился в связи с обнаружением быстрого роста его эффективной температуры [15, 34, 43, 44], что позволило предположить, что звезда быстро эволюционирует (вероятно — к стадии Вольфа–Райе) с темпом увеличения  $T_{\text{eff}}$  около 120 K за год. Основной вывод,

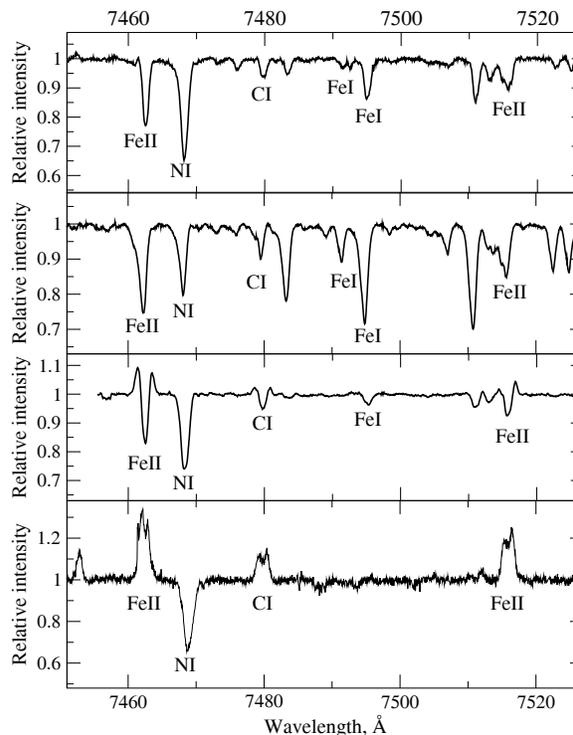


**Рис. 4.** То же, что и на рис. 2, но для интервала  $\Delta\lambda = 7258\text{--}7298$  Å. Для  $\rho$  Cas использован фрагмент спектра за 1.10.2014, т.е. после минимума блеска. Короткими вертикальными линиями отмечено положение эмиссии [Ca II] 7291 Å. Спектр HD 179821 получен с куде-эшелле спектрографом 2.7-м рефлектора обсерватории McDonald (см. детали в статье [16]).

полученный в результате многолетнего спектрального мониторинга [28], состоит в том, что этот YNG вошел в фазу замедления (или прекращения) роста эффективной температуры и приблизился на ГРД к высокотемпературной границе Желтого Войда. Очевидно, что крайне необходим дальнейший мониторинг этой звезды, наблюдаемой на эволюционном переходе, направление которого априори предсказать сложно. Данные спектроскопии высокого спектрального разрешения необходимы для уточнения строения и кинематики его околозвездной оболочки. Наиболее адекватной кинематическим данным нам представляется «дождевая» модель, предложенная Хэмфрис и др. [33, 45].

### 3.2.2. $\rho$ Cas — желтый гипергигант без пылевой оболочки

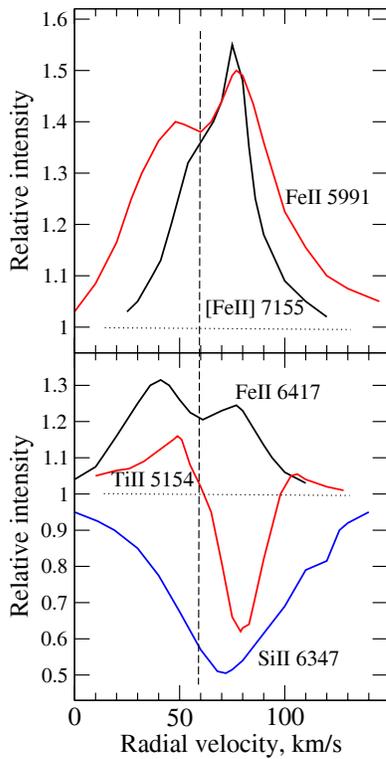
Пекулярность оптического спектра V1302 Aql наглядно проявляется в сравнении с родственным объектом — желтым гипергигантом  $\rho$  Cas, спектр которого, в отличие от спектра V1302 Aql, преимущественно абсорбционный, что иллюстрируют



**Рис. 5.** То же, что и на рис. 4, но для интервала  $\Delta\lambda = 7450\text{--}7530$  Å.

рис. 2, 3, 4 и 5. Принадлежность  $\rho$  Cas к группе YNGs подтверждается особенностями химического состава ее атмосферы: содержания CNO-элементов и избыток натрия указывают на то, что звезда уже побывала в стадии красного сверхгиганта [47]. Основные особенности  $\rho$  Cas, которая зачастую рассматривается в качестве прототипа группы YNGs, — это давно известная переменность эмиссионно-абсорбционного профиля  $H\alpha$  [48], высокий темп потери вещества (он может достигать  $10^{-4} M_{\odot} \text{год}^{-1}$ , а в эпизоде 2000 г. звезда в течение примерно 200 дней теряла вещество с темпом до  $3 \times 10^{-2} M_{\odot} \text{год}^{-1}$  [49]), а также сверхзвуковая турбулентность. Кроме того, в оптическом спектре  $\rho$  Cas наблюдается редко встречающаяся особенность — расщепление линий Ba II, Sr II, Ti II и других сильнейших абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня (пример представлен на нижней панели рис. 9). Позже эти особенности спектра  $\rho$  Cas исследовались детально посредством спектрального мониторинга [50–52], включая спектроскопию в ходе выбросов в 2013 и 2017 гг. [26, 40]. Спектральный мониторинг  $\rho$  Cas, выполняемый на БТА со спектральным разрешением  $R \geq 60\,000$ , позволил оценить степень переменности эффективной температуры: найдено изменение температуры звезды в интервале 5777–6744 K [52].

Продолжительный ряд высококачественных



**Рис. 6.** Разнообразие профилей линий в спектре V1302 Aql в 2014 г. Верхняя панель: запрещенная эмиссия [FeII]7155 Å и эмиссия FeII 5991 Å. Нижняя панель: эмиссия FeII 6417 Å, эмиссионно-абсорбционная линия TiII 5154 Å и абсорбция SiII 6347 Å. Пунктиром нанесено положение континуума. Вертикальной штриховой линией нанесена системная скорость  $V_{\text{sys}} \approx 60 \text{ км с}^{-1}$  [44].

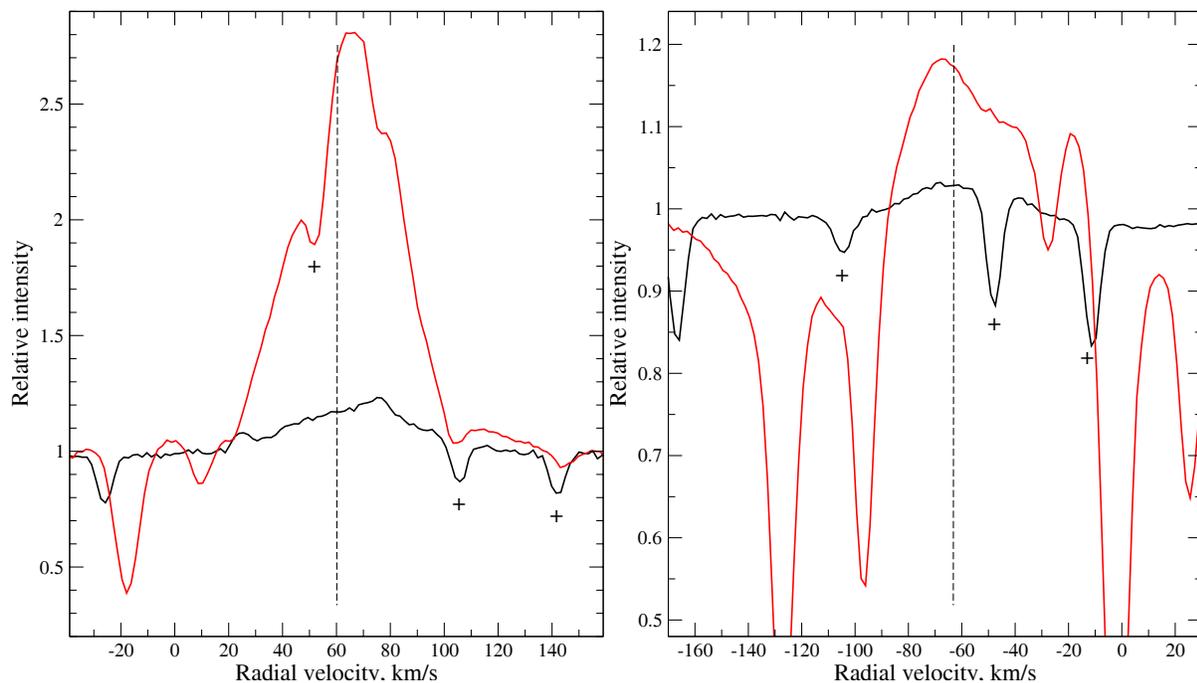
спектральных наблюдений  $\rho$  Cas позволяет изучить поведение профилей спектральных деталей со временем, а также состояние поля скоростей в протяженной атмосфере и околозвездной среде [26, 52]. Сделан вывод о близости скоростей, измеренных по абсорбциям ионов группы железа, наблюдаемых в синей части спектра и по абсорбционным компонентам линий с обратными P Cyg-профилями. Положение абсорбционных компонентов линий с обратными P Cyg-профилями, отражающих наличие сгустков вещества, падающих на звезду со скоростью около  $20 \text{ км с}^{-1}$ , оставалось стабильным для всех дат наблюдений. Положения сильных абсорбций Si II (мультиплет 2) и абсорбционных компонентов линий H $\alpha$  и H $\beta$  изменялись за период наблюдений незначительно, оставаясь, соответственно, вблизи значений  $63.7$  и  $70.5 \text{ км с}^{-1}$ .

За счет широкого интервала длин волн поле скоростей изучено по рекордно большому числу одиночных (несколько сотен в каждом спектре) и расщепленных абсорбций (от 12 в видимом диапазоне до 89 в коротковолновом). Лучевая ско-

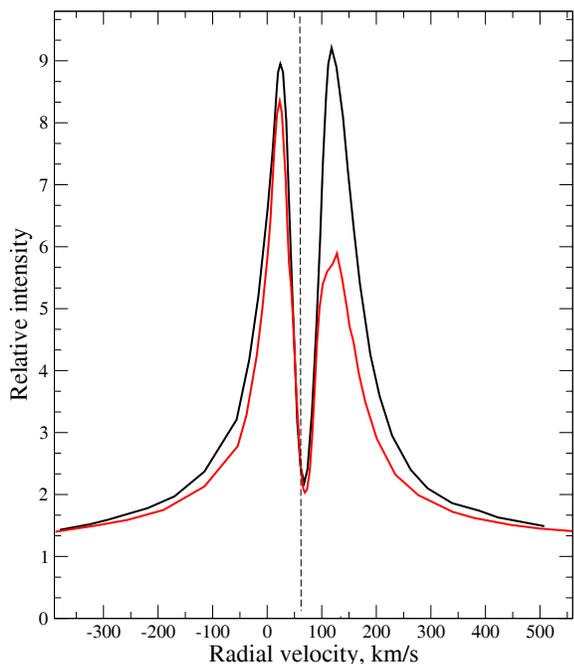
рость по слабым симметричным абсорбциям металлов меняется от даты к дате с амплитудой около  $\pm 7 \text{ км с}^{-1}$  относительно системной скорости  $V_{\text{sys}} = -47 \text{ км с}^{-1}$ , что является следствием малоамплитудных пульсаций в атмосфере звезды, которые являются общим свойством YNGs. В отдельные моменты наблюдается зависимость лучевой скорости от интенсивности линии, что указывает на существование градиента скорости в глубоких слоях атмосферы звезды. Для нескольких фаз обнаружено также различие (на  $3\text{--}4 \text{ км с}^{-1}$ ) скоростей, измеренных по абсорбциям нейтральных атомов и ионов. Таким образом, впервые обнаружена стратификация скоростей в атмосфере  $\rho$  Cas.

Авторы [26] показали, что длинноволновый компонент расщепленных абсорбций Ba II, Sr II, Ti II и других сильных линий с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня искажен стационарно расположенной эмиссией, что смещает положение линии в длинноволновую область. Таким образом, длинноволновые компоненты расщепленных абсорбций являются обычными фотосферными абсорбциями, область их формирования и соответствующая им лучевая скорость с учетом искажения стационарной эмиссией в отдельные моменты наблюдений не отличаются от таковых у одиночных абсорбций. На ГРД  $\rho$  Cas располагается на границе Желтого Войда [2], разделяющего гипергиганты и LBV в спокойной фазе. На границе Желтого Войда, по-видимому, резко возрастает амплитуда пульсаций YNGs, что приводит к повышенной нестабильности атмосферы и сбросу оболочки [2, 39]. В связи с этим отметим, что в работе [26] амплитуда найденной переменности лучевой скорости по симметричным абсорбциям  $V_r(\text{sym})$  превышает  $10 \text{ км с}^{-1}$ , что выше значения переменности  $V_r(\text{sym})$  в нашем предыдущем исследовании  $\rho$  Cas [52].

Летом 2013 г. в системе  $\rho$  Cas произошел выброс вещества, при котором блеск звезды по данным AAVSO понизился на  $0^{\text{m}}.5$ . Этот выброс произошел спустя лишь 12 лет после предыдущего в 2000–2001 гг., таким образом наблюдается учащение выбросов  $\rho$  Cas, что может свидетельствовать о приближении пересечения звездой границы Желтого Войда. После выброса вещества 2013 г. в спектре зарегистрированы полосы TiO [40] и существенные изменения типа профиля H $\alpha$  (см. детальнее в статье [26]). Как видно на верхней панели рис. 9, до вспышки, в спектре 2010 г. профиль H $\alpha$  имел типичный вид с эмиссией в коротковолновом крыле. В спектре 2014 г. ядро линии впервые раздвоено. При этом коротковолновый компонент раздвоенного ядра смещен относительно системной скорости приблизительно на  $-50 \text{ км с}^{-1}$ , что



**Рис. 7.** Профили запрещенных эмиссий [Ca II] 7291 Å (красная линия) и [O I] 6300 Å в спектрах V1302 Aql (слева) и V509 Cas. Крестиком отмечены недалежные теллурические детали вблизи эмиссий. Вертикальной штриховой линией указано принятое значение системной скорости  $V_{\text{sys}} \approx 60 \text{ км с}^{-1}$  для V1302 Aql [44] и  $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$  для V509 Cas [27].

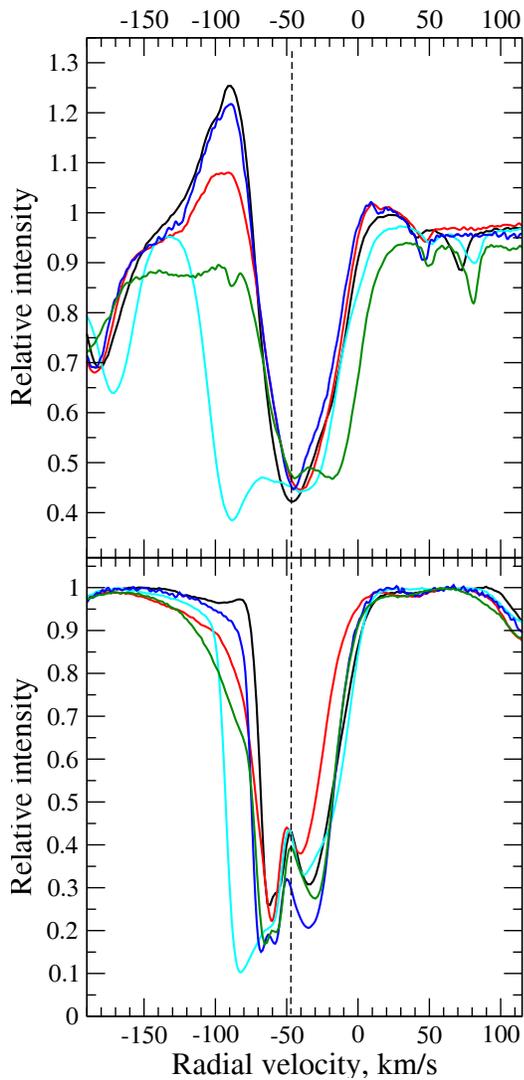


**Рис. 8.** Профиль  $H\alpha$  в спектре V1302 Aql в 2007 г. — черная линия, и в 2014 г. — красная линия. Вертикальной штриховой линией нанесена системная скорость  $V_{\text{sys}} \approx 60 \text{ км с}^{-1}$  [44]. Цветные иллюстрации доступны в электронной версии статьи.

указывает на быстрое истечение вещества верхних слоев атмосферы после минимума блеска.

По совокупности измерений лучевой скорости в спектрах  $\rho$  Cas сделан вывод об отсутствии корреляции в эволюции профилей  $H\alpha$  и расщепленных абсорбций [26]. При этом зарегистрировано большое различие скорости, соответствующее положению  $H\alpha$  и среднему положению симметричных абсорбций в спектре после выброса 2013 г. (см. результаты измерения лучевой скорости на рис. 5 в статье). Переменность типа пульсаций с амплитудой около  $10 \text{ км с}^{-1}$  присуща лишь симметричным абсорбциям слабой и умеренной интенсивности, формирование которых происходит в глубоких слоях атмосферы звезды.

Новое динамически нестабильное состояние газовой оболочки звезды зарегистрировано в 2017 г., что проявилось в существенном и быстром изменении профиля  $H\alpha$ . В спектре 13.02.2017 восстановился профиль  $H\alpha$  до вспышки 2013 г. и вновь сформировалась коротковолновая эмиссия. Однако спустя несколько месяцев, 6.08.2017 и 5.10.2017, т.е. в ходе уже нового эпизода сброса вещества в октябре 2017 г., видим значительные изменения: ядро  $H\alpha$  раздвоилось, его длинноволновый компонент сместился в длинноволновую область на приблизительно  $20 \text{ км с}^{-1}$  относительно системной скорости, что свидетельствует о падении вещества.



**Рис. 9.** Переменность профиля линий  $\text{Na}$  (верхняя панель) и  $\text{Ba II } 6141 \text{ \AA}$  в спектрах  $\rho \text{ Cas}$ , полученных на БТА в разные даты: 30.09.2009 (в спокойном состоянии — черная сплошная линия), 02.02.2013 (начало выброса 2013 г. — красная), 07.08.2014 (после минимума 2013 г. — cyan), 13.02.2017 (до выброса 2017 г. — синяя), 05.10.2017 (близко к минимуму 2017 г. — темно-зеленая). Вертикальной штриховой линией указано значение  $V_{\text{sys}} = -47 \text{ км с}^{-1}$  [50].

Значительная переменность зарегистрирована и у профилей сильных расщепленных абсорбций с низким потенциалом возбуждения нижнего уровня, представленных, в частности, на нижней панели рис. 9. В начале 2013 г. профиль  $\text{Ba II } 6141 \text{ \AA}$  отличался от профиля 2009 г. (т.е. до вспышки) только изменениями в коротковолновом крыле, где слабая эмиссия 2009 г. изменилась на вытянутую абсорбцию. В спектре 2014 г. (после минимума блеска) видим значительное смещение и уширение коротковолнового оболочечного компонента профиля, что указывает на увеличение скорости и уве-

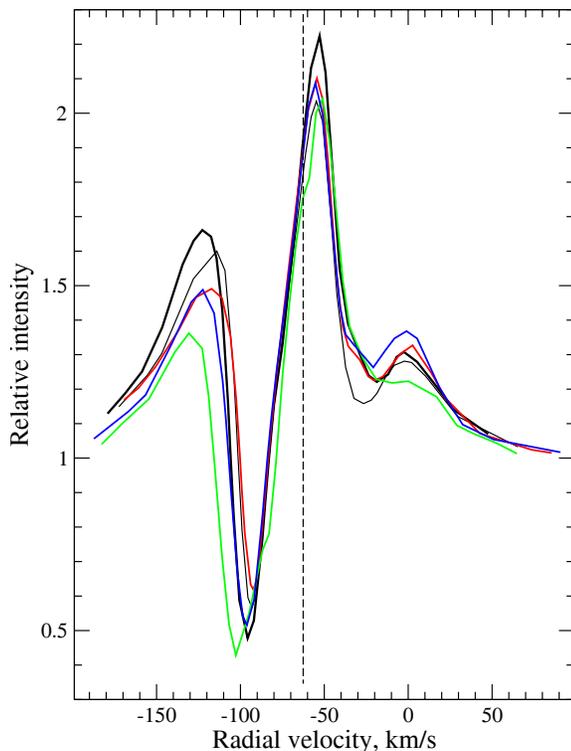
личение градиента скорости истечения вещества. Новое явление в спектре зафиксировано после выброса 2017 г.: в феврале впервые зарегистрировано расщепление профилей сильных абсорбций низкого возбуждения на три компонента, что указывает на изменение структуры верхних слоев атмосферы и оболочки звезды. Ту же самую картину видим и в октябрьских спектрах 2017 г. вблизи минимума блеска.

В длинноволновой области спектра 2013 г. отождествлены слабые оболочечные эмиссии атомов группы железа в ходе эпизода 2017 г. их интенсивность снижалась, до исчезновения. В отсутствие эмиссии в ядрах H и K линий  $\text{Ca II}$ , оболочечные эмиссии металлов постоянно присутствуют в их крыльях [26].

Трехкомпонентное расщепление сильных абсорбций позволяет говорить о расслоении в самых верхних слоях истекающей атмосферы и оболочки  $\rho \text{ Cas}$ , т.е. о возникновении двух субоболочек с различной кинематикой. Это новое явление указывает на необходимость продолжения спектрального мониторинга звезды. При появлении признаков развития нового эпизода сброса наблюдения необходимо проводить 1–2 раза в месяц, что позволит восстановить поведение во времени кинематического состояния атмосферы и оболочки и оценить характерное время изменений.

### 3.2.3. *V509 Cas* — гипергигант вблизи границы Желтого Войда

*V509 Cas* обычно считается спектральным двойником гипергиганта  $\rho \text{ Cas}$  и поэтому многие авторы сопоставляют их спектры [27, 53, 54]. Однако детальное исследование спектров двух этих гипергигантов с близкими фундаментальными параметрами (масса, светимость, стадия эволюции) выявило существенные различия в спектрах, и кинематического состояния атмосфер, что свидетельствует о различии физических процессов, вызывающих нестабильность атмосфер и оболочек. Спектральные различия проявляются прежде всего в различии типа профиля  $\text{Na}$  и его переменности. Изменения профиля  $\text{Na}$  в спектре  $\rho \text{ Cas}$  в основном связаны с выбросами оболочек. Особенно показательны изменения профиля  $\text{Na}$  на рис. 9 после выбросов 2013 и 2017 г. В спектре же *V509 Cas* профиль  $\text{Na}$  ведет себя более спокойно, как видно на рис. 10, сохраняется тип профиля, положение его длинноволновых компонентов практически не изменяется. Абсорбционные компоненты  $\text{Na}$  на этом рисунке располагаются по обе стороны от линии  $V_{\text{sys}}$ , что говорит о присутствии в атмосфере и оболочке *V509 Cas* как истекающего, так и аккрецирующего вещества. У коротковолнового компонента зарегистрированы существенные изменения в интенсивности, смещении и в его ширине, что



**Рис. 10.** Переменность профиля  $H\alpha$  в спектре V509 Cas: 2.05.1996 — зеленая (точечная) линия, 1.10.2014 — жирная сплошная линия, 26.10.2015 — синяя, 2017 г. — тонкая сплошная линия, 6.04.2018 — красная. Вертикальной штриховой линией указано принятое в [27] значение системной скорости  $V_{\text{sys}} = -63 \text{ км с}^{-1}$ .

обусловлено переменностью ветра и нестабильностью условий в оболочке, расширяющейся со скоростью  $33\text{--}40 \text{ км с}^{-1}$ .

Авторы [54], сравнивая спектры V509 Cas и  $\rho$  Cas в ближнем УФ диапазоне, также подчеркнули, что эти две звезды не являются спектральными двойниками. По особенностям спектра и эволюционному статусу V509 Cas скорее ближе к гипергиганту V1302 Aql. Прежде всего — в их спектрах близки типы профилей  $H\alpha$ , что указывает на подобие околозвездной газовой структуры, где формируются эти двухпиковые эмиссии. Однако в деталях эти профили все же различаются, что видно из сопоставления рис. 8 и 10. Эмиссии профиля  $H\alpha$  у V1302 Aql имеют стационарное положение и мало изменяющееся соотношение пиков [28]. Эмиссионные пики профиля  $H\alpha$  в спектрах V509 Cas многократно ниже, чем в случае V1302 Aql. Переменность длинноволнового пика и профиля в целом не значительна. Интенсивность коротковолнового эмиссионного пика изменяется, но он постоянно ниже длинноволнового. Не заметно существенных изменений также в форме про-

филей линий металлов и положениях их основных компонентов [27].

Оптический спектр V509 Cas богат эмиссионными деталями, которые искажают профили абсорбций не только водорода, но и металлов, что хорошо видно на фрагментах спектра этой звезды, представленных на рис. 2 и 3. На рис. 7 сопоставлены профили запрещенных эмиссий [Ca II]7291 и [O I]6300 Å в спектрах V1302 Aql и V509 Cas. Профили эмиссии [Ca II]7291 Å существенно отличаются своей интенсивностью, но они однопиковые в спектрах обеих звезд и имеют близкие полуширины:  $\Delta V_r \approx 40 \text{ км с}^{-1}$ . Учитывая наличие запрещенных эмиссий [Ca II] и [O I] в спектре (рис. 7), мы подтверждаем вывод авторов [4] о присутствии диска в системе V509 Cas. Заметим при этом, что наши однопиковые профили в спектрах V509 Cas, полученные с высоким спектральным разрешением, отличаются от двухпиковых в работе [4]. Важно также, что ширина этих эмиссий примерно в 1.5–2 раза ниже этого параметра в спектре 3 Pup — звезды с феноменом B[e]. Кроме того, как видно на рис. 5 в статье [55], в спектре 3 Pup запрещенные эмиссии [Ca II] и [O I] имеют двухпиковые профили, что указывает на формирование этих линий в околозвездном вращающемся кеплеровском диске [39, 56].

Спектр V509 Cas содержит редко наблюдаемую в спектрах холодных сверхгигантов особенность — высоковозбужденные запрещенные эмиссии [N II] 5755, 6548 и 6584 Å. Их наличие в спектре столь холодной одиночной звезды трудно объяснить. Наличие запрещенных линий [N II] в спектре желтого гипергиганта HR 5171 имеет естественное объяснение — присутствие горячего маломассивного компаньона в тесной двойной системе с общей оболочкой [57]. Однако для V509 Cas присутствие подобного горячего компаньона надежно опровергнуто [27].

Еще в 1965 г. Саргент [58] подчеркнул, что наличие запрещенных эмиссий [N II] и сложные эмиссионно-абсорбционные профили  $H\alpha$  и  $H\beta$  указывают на вероятное существование вокруг V509 Cas горячей оболочки. В работе [59], посвященной изучению химического состава атмосферы V509 Cas, Лак придерживается этой же позиции. Позже Ламберт и Лак [60] предложили несколько версий о механизме возбуждения запрещенных линий [N II] в спектре V509 Cas: диссипация механической энергии, ионизация за счет УФ-излучения горячих звезд N II области в объеме ассоциации Ser OB1 и др.

Авторы [61] также считают, что фотоны, необходимые для формирования высоковозбужденных

запрещенных линий, могут быть произведены самими желтыми гипергигантами, которые демонстрируют вспышки с масштабом времени 1–2 года с амплитудой до нескольких звездных величин. Взрывная вспышка, возникающая за счет высвобождения в ходе рекомбинации накопленной в околозвездной оболочке энергии ионизации водорода, может обеспечить необходимые высокоэнергичные фотоны. Хорошим примером служит комплексное исследование изменений параметров гипергиганта V509 Cas [12], который пережил такого рода эпизод примерно в 1973 г, во время которого он выбросил большое количество массы, имел большой диаметр и низкую температуру.

Анализ фундаментальных параметров V509 Cas в большом интервале времени [12] указывает на то, что гипергигант, подобно V1302 Aql, описал на ГРД сложную траекторию. Согласно [60], на разных этапах этой эволюции оптический спектр гипергиганта менялся в интервале спектральных классов G–K, однако при этом сохранялся класс светимости Ia. В настоящее время объект подошел к низкотемпературной границе Желтого Войда [12], что стимулирует проведение дальнейшего спектрального мониторинга этой звезды.

### 3.2.4. V1427 Aql — более холодный аналог V1302 Aql

Сложность исследований YNGs хорошо иллюстрирует история изучения холодного сверхгиганта V1427 Aql = HD 179821, отождествляемого с ИК-источником IRAS 19114+0002. Де Ягер [2], причисляя V1427 Aql к семейству желтых гипергигантов, назвал этот объект уменьшенной копией IRC+10420. Сочетание параметров этой звезды долгое время не позволяло однозначно фиксировать ее эволюционный статус (см. статью [62]). Однако в последние годы получены достаточно убедительные доказательства принадлежности V1427 Aql к семейству YNGs [16, 35]. Отметим, что результаты в статье [16] основаны на спектральных наблюдениях на 2.7-м телескопе обсерватории McDonald с эшелльным спектрографом в фокусе кудэ и на 6-м телескопе в сочетании со спектрографом НЭС. Оудмайер и др. [35], проанализировав совокупность наблюдаемых свойств V1427 Aql и V1302 Aql, пришли к выводу о том, что именно эти две звезды — очевидные желтые гипергиганты.

Сопоставляя параметры желтых гипергигантов, приведенные в таблицах 1 и 2, видим, что V1427 Aql уступает членам группы лишь по скорости истечения вещества. Основные ее параметры, включая интенсивность триплета O I 7773 Å (а, следовательно, и светимость) и темп звездного ветра близки к таковым у V1302 Aql. Моделируя карту профилей вращательных переходов полосы

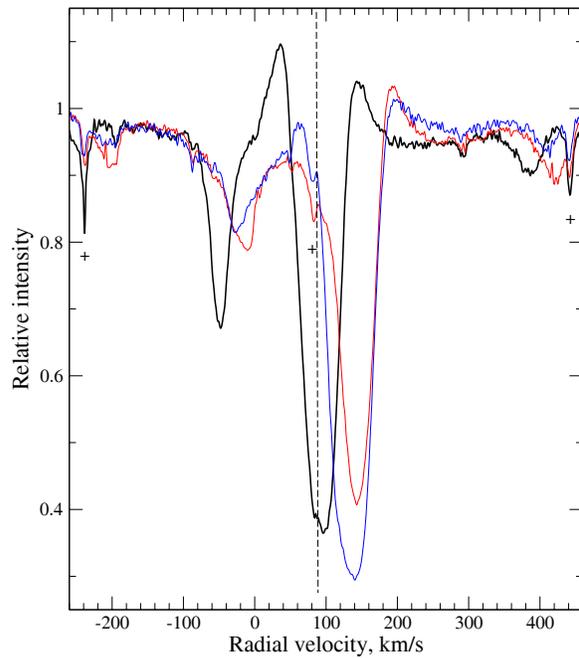


Рис. 11. Переменность профиля H $\alpha$  в спектре V1427 Aql: 24.09.2010 — синяя линия, 30.05.2013 — черная жирная линия, 09.10.2013 — красная линия. Вертикальной штриховой линией указано значение системной скорости  $V_{\text{sys}} = 86 \text{ km s}^{-1}$  [63]. Крестиками отмечены теллурические детали.

$^{12}\text{CO}$ , авторы вышеупомянутой работы [6] получили  $V_{\text{exp}}$  около  $35 \text{ km s}^{-1}$ . Эти авторы, отметившие, что у V1427 Aql около  $10^3$  лет назад темп ветра достигал экстремально высокого значения  $3 \times 10^{-3} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ , считают этот объект ближайшим родственником V1302 Aql. По их расчетам, полная масса оболочки V1427 Aql вчетверо превышает массу оболочки V1302 Aql.

Рисунки 2, 3, 4 и 5, иллюстрируют тот факт, что спектр V1427 Aql, как и спектр  $\rho$  Cas, содержит преимущественно абсорбционные детали. Исключением являются эмиссии в крыльях H $\alpha$ , зарегистрированные в отдельные моменты, а также эмиссия [Ca II] 7291 Å, которая, как и в спектрах V1302 Aql и V509 Cas, является одиноковой — узкая абсорбция, налагающаяся на эту эмиссию, является теллурической деталью на длине волны  $\lambda = 7291.4 \text{ Å}$ .

Рисунок 11 иллюстрирует переменность профиля H $\alpha$  в спектре V1427 Aql. Больше информации о переменности этой линии содержит рис. 2 в статье [16]. Эмиссия в крыльях профиля, если она и появляется, не превышает 20% от уровня локального континуума. Тип профиля H $\alpha$  и его поведение в спектре V1427 Aql ближе к таковым у  $\rho$  Cas. Если оптический спектр V1427 Aql близок к спектру  $\rho$  Cas, то протяженная околозвездная

оболочка V1427 Aql, а также наличие слабой эмиссии [Ca II], формирующейся в оптически тонкой оболочке, роднит эту звезду скорее с V1302 Aql.

Авторы [16] получили важнейшие аргументы, подтверждающие для V1427 Aql статус массивной далеко проэволюционировавшей звезды, а именно большие избытки содержания азота и натрия, высокое значение микротурбулентной скорости и сверхзвуковую макротурбулентную скорость. Как видно из таблицы 1, высокая светимость звезды соответствует большому значению эквивалентной ширины ИК-триплета кислорода:  $W_\lambda(7773) = 2.7 \text{ \AA}$ . Подчеркнем, что столь высокое значение  $W_\lambda(7773)$  измерено в спектре звезды, для которой по слабым абсорбциям определено пониженное содержание кислорода в атмосфере [16]. В целом, усиливая вывод де Ягера [2], можем утверждать, что V1427 Aql является более холодным и пока менее изученным аналогом гипергиганта V1302 Aql (IRC+10420), последний при этом считается краеугольным камнем в исследовании поздних фаз эволюции массивных звезд [64].

Очевидно, что в Галактике существуют и слабые в оптическом диапазоне, а потому пока мало изученные YNGs. К примеру, по мнению авторов [64], удаленный источник IRAS 18357–0604 является еще одним близнецом IRC+10420. Имея высокую светимость, центральная звезда IRAS 18357–0604 недоступна для спектроскопии высокого разрешения из-за удаленности объекта и большого поглощения в околозвездной среде. Однако по данным [64], ее длинноволновый спектр, как и спектр V1302 Aql, насыщен асимметричными двухпиковыми эмиссиями линий H I Пашеновской серии, Ca II, низковозбужденных линий металлов. Наличие эмиссий азота N I 8630 и 8729 Å в спектре IRAS 18357–0604 — свидетельство обогащения азотом атмосферы и оболочки, как и в случае IRC+10420. Особо интересный объект из семейства YNGs известен на южном небе — это гипергигант V766 Cep = HR 5171 в двойной взаимодействующей системе с общей оболочкой [57].

### 3.3. Возможная взаимосвязь YNGs и сверхгигантов с феноменом B[e]

Вышеупомянутые YNGs изучены различными методами во всех диапазонах длин волн, однако их эволюционный статус все же не вполне определен, поскольку их можно отнести либо к звездам, которые эволюционируют к RSG, либо к звездам на стадии после RSG. По завершении выгорания водорода в ядре потомки RSGs направляются в горячую область ГРД. Типичные представители RSGs — это холодные красные сверхгиганты VY CMa, Бетельгейзе и  $\mu$  Cep со спектральными классами Sp = M2–M5 Ia. Ключевым

моментом, который может помочь в решении проблемы эволюционного статуса является наличие или отсутствие околозвездной оболочки, а также особенности ее структуры, поскольку оболочка, отражая историю изменений параметров потери вещества, является своеобразной записью истории звезды. Давней загадкой в семействе YNGs является отсутствие пылевой оболочки у  $\rho$  Cas с темпом потери вещества  $\geq 10^{-4} M_\odot \text{ год}^{-1}$  (и выше  $10^{-3} M_\odot \text{ год}^{-1}$  в ходе эпизодов сброса оболочки [49]). ИК-избыток, который естественно ожидать у звезды столь высокой светимости с высоким темпом потери вещества, долгое время у  $\rho$  Cas не был обнаружен (см. ссылки в [8, 65]). При этом наличие околозвездной газовой оболочки проявляется в полосах молекулы CO (см. статьи [51, 53] и ссылки в них), а также в компонентах профилей Na I, K I и низковозбужденных линий ряда ионов [26]. Наиболее естественным фактором, объясняющим наличие (или отсутствие) мощной пылевой оболочки и ее свойства, может быть различие в светимости звезды, в связанном с нею темпом потери вещества и, в конечном счете — в исходной массе и особенностях прохождения эволюционной фазы. По видимому, как и предположили авторы [66], мы наблюдаем  $\rho$  Cas на более раннем этапе эволюции, чем гипергиганты с большим избытком ИК-потока.

В связи с проблемой фиксации эволюционной стадии у индивидуальных YNGs актуальной задачей является изучение эволюционной связи между ними и сверхгигантами с феноменом B[e]. Возможность такой связи следует уже из взаимного расположения этих двух групп типов звезд на ГРД. Арет и др. [39] проанализировали такого рода связь между двумя группами массивных ЗВС, основываясь на сочетании избытков ИК потока с наличием в спектрах обеих групп звезд запрещенных эмиссий [O I] и [Ca II], формирование которых идет в оптически плотном околозвездном диске у сверхгигантов с B[e]-феноменом и у подгруппы горячих YNGs. Отметим, что на рис. 7 в спектре  $\rho$  Cas 1.10.2014 эмиссия [Ca II] 7291 Å хорошо видна. Однако эта деталь не превышала уровень континуума в наших спектрах до вспышки и после 2017 г., когда звезда была в спокойном состоянии и ее поток в локальном континууме значительно превышал поток в эмиссии [Ca II] 7291 Å. Эмиссию в линии [O I] 6300 Å в спектрах  $\rho$  Cas мы не зарегистрировали ни в одну из дат наших наблюдений.

Оптический спектр V509 Cas имеет сходство со спектром звезды 3 Pup с феноменом B[e]. В спектре этого наиболее холодного представителя (ее спектральный класс Sp = A4 Iab) семейства сверхгигантов с феноменом B[e] зарегистрированы

раздвоенная  $H\alpha$  с более сильным красным компонентом, эмиссии запрещенных линий [O I] 1F 6300, 6364 Å, дублет [Ca II] 1F 7291, 7324 Å и эмиссии в некоторых линиях Fe II. Согласно [55], в спектре 3 Pup фотосферной может считаться только линия Mg II 4481 Å, а в линиях Fe II очевиден вклад оболочки, которая придает профилям специфическую форму: крылья приподняты эмиссиями. Эта же особенность присуща профилям и в спектре V509 Cas, в котором крылья даже слабых линий искажены эмиссиями, что хорошо видно на верхней панели рис. 5 у линии Fe II 7462 Å с глубиной не более 0.2 от уровня локального континуума.

Отметим, что авторы [57] предположили, что вышеупомянутый гипергигант V766 Cen по мере продвижения в горячую область ГРД может эволюционировать в систему типа 3 Pup. Очевидно, что гипотеза о возможной эволюционной связи двух групп ЗВС требует дополнительных исследований, в том числе и в рамках звездно-астрометрического подхода.

#### 4. ВЫВОДЫ

Представлены итоги многолетнего мониторинга желтых гипергигантов северной небесной полушеры. По однородным данным спектроскопии с высоким спектральным разрешением определены фундаментальные параметры звезд. ИК триплет кислорода OI 7773 Å с экстремальными значениями эквивалентной ширины послужил критерием светимости: у рассматриваемых звезд среднее значение  $\lg L/L_{\odot} = 5.43 \pm 0.14$ .

По совокупности данных детальных позиционных измерений сделана оценка скорости расширения околзвездных оболочек в интервале 11–40 км с<sup>-1</sup>, по слабым абсорбциям для четырех объектов определена амплитуда пульсаций в узком интервале значений  $\Delta V_r = 7\text{--}11$  км с<sup>-1</sup>.

Продемонстрировано разнообразие наблюдаемых спектральных особенностей у звезд предельно высокой светимости, компактно расположенных в верхней части диаграмме Герцшпрунга–Рессела, а именно наличие (или отсутствие) разрешенных и запрещенных эмиссий, эмиссионных компонентов сложных профилей, особенности поведения во времени спектральных деталей различной природы.

Показана эффективность мониторинга с высоким спектральным разрешением для выявления переменности динамического состояния на разных глубинах протяженной атмосферы и околзвездной оболочки гипергигантов. В частности, за счет многолетнего мониторинга гипергиганта V1302 Aql сделан вывод о его приближении к низкотемпературной границе Желтого Войда, что указывает

на актуальность продолжения мониторинга этой звезды.

Доказана достоверность статуса гипергиганта для V1427 Aql и отсутствие компаньона в системе V509 Cas. Мониторинг  $\rho$  Cas позволил зафиксировать динамическую нестабильность верхних слоев атмосферы звезды и впервые обнаружить расслоение ее газовой оболочки в ходе эпизода сброса вещества в 2017 г. В связи с участвовавшими эпизодами сброса мы особо отмечаем необходимость продолжения спектрального мониторинга  $\rho$  Cas.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарен своим соавторам, участвовавшим в выполнении программы спектроскопии сверхгигантов на БТА и в подготовке совместных публикаций. В работе использованы базы астрономических данных SIMBAD, SAO/NASA ADS, AAVSO и VALD.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Наблюдения на телескопах САО РАН выполняются при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Автор благодарит за поддержку Российский Фонд Фундаментальных Исследований (проект 18–02–00029 а).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. M. Humphreys and K. Davidson, *Astrophys. J.* **232**, 409 (1979).
2. C. de Jager, *Annual Rev. Astron. Astrophys.* **8**, 145 (1998).
3. R. M. Humphreys, K. Davidson, D. Hahn, et al., *Astrophys. J.* **844**, 40 (2017).
4. A. Aret, M. Kraus, I. Kolka, and G. Maravelias, *ASP Conf. Series* **510**, 162 (2017).
5. Gaia Collaboration, A. G. A. Brown, A. Vallenari, et al., *Astron. and Astrophys.* **616**, A1 (2018).
6. A. Castro-Carrizo, G. Quintana-Lacaci, V. Bujarrabal, et al., *Astron. and Astrophys.* **465**, 457 (2007).
7. T. J. Jones, R. M. Humphreys, R. D. Gehrz, et al., *Astrophys. J.* **411**, 323 (1993).
8. M. T. Schuster, R. M. Humphreys, and M. Marengo, *Astron. J.* **131**, 603 (2006).
9. G. Meynet, P. Eggenberger, and A. Maeder, *IAU Symposium* **241**, 13 (2007).
10. M. Jura, T. Velusamy, and M. W. Werner, *Astrophys. J.* **556**, 408 (2001).
11. P. Massey, *New Astron. Revies* **57**, 14 (2013).

12. H. Nieuwenhuijzen, C. De Jager, I. Kolka, et al., *Astron. and Astrophys.* **546**, A105 (2012).
13. C. de Jager, A. Lobel, H. Nieuwenhuijzen, and R. Stothers, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **327**, 452 (2001).
14. A. A. Boyarchuk, I. Gubeny, I. Kubat, et al., *Astrophysics* **28**, 202 (1988).
15. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **292**, 19 (1997).
16. T. Şahin, D. L. Lambert, V. G. Klochkova, and V. E. Panchuk, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **461**, 4071 (2016).
17. V. E. Panchuk, V. G. Klochkova, M. V. Yushkin, and I. D. Najdenov, *Journal of Optical Technology* **76**, 87 (2009).
18. В. Е. Панчук, В. Г. Клочкова и М. В. Юшкин, *Астрон. ж.* **94**, 808 (2017).
19. М. В. Юшкин и В. Г. Клочкова, Препринт САО No. 206, (2004).
20. Г. А. Галазутдинов, Препринт САО No. 92, (1992).
21. E. L. Chentsov, V. G. Klochkova, and N. S. Tavolgenskaya, *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* **48**, 25 (1999).
22. V. G. Klochkova, G. Zhao, V. E. Panchuk, and S. V. Ermakov, *Chin. J. Astron. and Astrophys.* **4**, 279 (2004).
23. J. H. Kastner and D. A. Weintraub, *Astrophys. J.* **452**, 833 (1995).
24. S. Xu, B. Zhang, M. J. Reid, et al., *Astrophys. J.* **875**, 114 (2019).
25. В. Г. Клочкова и Н. С. Таволжанская, *Астрофизический бюллетень* **74**, 279 (2019).
26. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук и Н. С. Таволжанская, *Астрон. ж.* **95**, 659 (2018).
27. В. Г. Клочкова, Е. Л. Ченцов и В. Е. Панчук, *Астрофизический бюллетень* **74**, 45 (2019).
28. V. G. Klochkova, E. L. Chentsov, A. S. Miroschnichenko, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **459**, 4183 (2016).
29. R. E. Luck, *Astron. J.* **147**, 137 (2014).
30. Y. Takeda and M. Takada-Hidai, *Publ. Astron. Soc. Japan* **50**, 629 (1998).
31. V. V. Kovtyukh, N. I. Gorlova, and S. I. Belik, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **423**, 3268 (2012).
32. A. Lobel, L. Achmad, C. de Jager, and H. Nieuwenhuijzen, *Astron. and Astrophys.* **256**, 159 (1992).
33. R. M. Humphreys, N. Smith, K. Davidson, et al., *Astron. J.* **114**, 2778 (1997).
34. В. Г. Клочкова, М. В. Юшкин, Е. Л. Ченцов и В. Е. Панчук, *Астрон. ж.* **79**, 158 (2002).
35. R. D. Oudmaijer, B. Davies, W. J. de Wit, and M. Patel, *ASP Conf. Series* **412**, 17 (2009).
36. E. J. Bakker, E. F. van Dishoeck, L. B. F. M. Waters, and T. Schoenmaker, *Astron. and Astrophys.* **323**, 469 (1997).
37. C. Loup, T. Forveille, A. Omont, and J. F. Paul, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **99**, 291 (1993).
38. В. Г. Клочкова, Р. Щерба и В. Е. Панчук, *Письма в АЖ* **26**, 510 (2000).
39. A. Aret, M. Kraus, I. Kolka, and G. Maravelias, *ASP Conf. Series* **508**, 357 (2017).
40. M. Kraus, I. Kolka, A. Aret, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **483**, 3792 (2019).
41. P. T. Giguere, N. J. Woolf, and J. C. Webber, *Astrophys. J.* **207**, L195 (1976).
42. R. L. Mutel, J. M. Benson, J. D. Fix, and J. C. Webber, *Astrophys. J.* **228**, 771 (1979).
43. R. D. Oudmaijer, *Astron. and Astrophys. Suppl.* **129**, 541 (1998).
44. R. D. Oudmaijer, M. A. T. Groenewegen, H. E. Matthews, et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **280**, 1062 (1996).
45. R. M. Humphreys, K. Davidson, and N. Smith, *Astron. J.* **124**, 1026 (2002).
46. G. Quintana-Lacaci, M. Agúndez, J. Cernicharo, et al., *Astron. and Astrophys.* **560**, L2 (2013).
47. Y. Takeda and M. Takada-Hidai, *Publ. Astron. Soc. Japan* **46**, 395 (1994).
48. W. L. W. Sargent, *Astrophys. J.* **134**, 142 (1961).
49. A. Lobel, A. K. Dupree, R. P. Stefanik, et al., *Astrophys. J.* **583**, 923 (2003).
50. A. Lobel, G. Israelian, C. de Jager, et al., *Astron. and Astrophys.* **330**, 659 (1998).
51. N. Gorlova, A. Lobel, A. J. Burgasser, et al., *Astrophys. J.* **651**, 1130 (2006).
52. В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Н. С. Таволжанская и И. А. Усенко, *Астрон. ж.* **91**, 153 (2014).
53. D. L. Lambert, K. H. Hinkle, and D. N. B. Hall, *Astrophys. J.* **248**, 638 (1981).
54. G. Israelian, A. Lobel, and M. R. Schmidt, *Astrophys. J.* **523**, L145 (1999).
55. Е. Л. Ченцов, В. Г. Клочкова и А. С. Мирошниченко, *Астрофизический бюллетень* **65**, 159 (2010).
56. A. Aret, M. Kraus, and M. Šlechta, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **456**, 1424 (2016).
57. O. Chesneau, A. Meilland, E. Chapellier, et al., *Astron. and Astrophys.* **563**, A71 (2014).
58. W. L. W. Sargent, *The Observatory* **85**, 33 (1965).
59. R. E. Luck, *Astrophys. J.* **202**, 743 (1975).
60. D. L. Lambert and R. E. Luck, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **184**, 405 (1978).
61. A. M. van Genderen, H. Nieuwenhuijzen, and A. Lobel, *Astron. and Astrophys.* **583**, A98 (2015).
62. B. E. Reddy and B. J. Hrivnak, *Astron. J.* **117**, 1834 (1999).
63. L. Likkel, A. Omont, M. Morris, and T. Forveille, *Astron. and Astrophys.* **173**, L11 (1987).
64. J. S. Clark, I. Negueruela, and C. González-Fernández, *Astron. and Astrophys.* **561**, A15 (2014).
65. D. Shenoy, R. M. Humphreys, T. J. Jones, et al., *Astron. J.* **151**, 51 (2016).
66. G. Quintana-Lacaci, V. Bujarrabal, and A. Castro-Carrizo, *Astron. and Astrophys.* **488**, 203 (2008).

## Unity and Diversity of Yellow Hypergiants Family

V. G. Klochkova

We present the results of long-term spectral monitoring of yellow hypergiants (YHG) of northern hemisphere with a  $R \geq 60\,000$  resolution. The spectra of these F–G stars of extreme luminosity, compactly located at the top of the Hertzsprung–Russell diagram revealed a variety of spectral features: various types of  $H\alpha$  profile, the presence (or absence) of forbidden and permitted emissions, as well as circumstellar components. Variability of spectral features of various nature is studied. Absolute luminosity, circumstellar envelope expansion rate and amplitude of pulsations are determined. The reliability of the YHG status for V1427 Aql is confirmed; manifestations of a significant dynamic instability of the upper layers of the atmosphere of  $\rho$  Cas after the 2017 ejection and stratification of its gas envelope are registered; the lack of companion in the system of the V509 Cas hypergiant is proven; a conclusion is made that the V1302 Aql hypergiant is approaching the low-temperature boundary of the Yellow Void.

Keywords: *stars: AGB and post-AGB—stars: evolution—stars: oscillations*